



Introducción a los Sistemas Emergentes

Jose Aguilar

Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela

Primera Edición, 2014

© Jose Aguilar, 2014.

© Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2014.

Título de la obra:

Introducción a los Sistemas Emergentes

Autor:

Jose AGUILAR, Dr.

Diseñador gráfico:

Anaverónica Rodríguez

HECHO EL DEPÓSITO DE LEY

Depósito Legal: If074201400417

ISBN: 978-980-12-7106-2

Impresión; Universidad de Los Andes
Talleres Gráficos Universitarios, Mérida
Impreso en Venezuela

Dedicatoria

A mis cinco mujeres amadas

A mi madre, luz y fuente de inspiración y energía permanente

A mi hermana, otra madre más en mi vida

A mi esposa amada, compañera de este hermoso viaje por hacer familia

A mis dos hermosas hijas, mi futuro y mi lucha del presente

En tus ochentas años

En este día tan maravilloso para tu vida, para nuestras vidas

Que podríamos ofrecerte sino lo mejor de cada uno de nosotros, de
nuestros seres

Este es el fruto de mis años de trabajo,

En el que todos han participado de una u otra forma

Por eso es de todos y todos te lo ofrecemos

Tu mirada dulce y alegre es la mejor inspiración de cada letra que veras
aquí

Para tí, hoy en un día tan simbólico te lo ofrezco

Como el mejor regalo desde nuestro ser

Jose, Enero 2013

Prefacio

Remonta a 1862 cuando se encuentra en *A system of logic*, de JS Mill, la idea de que, para los vivientes, la yuxtaposición y la interacción de las partes constitutivas, no es suficiente para explicar las propiedades observadas. Este es el origen del concepto de *emergencia*, llamado así por los filósofos británicos, del latín *emergere* que significa “salir de”.

La filosofía emergentista se desarrolla a partir del año 1920, como una alternativa a la visión reduccionista de la evolución cultural. Entre los sociólogos, aparece la idea de que la evolución cultural no puede reducirse a la evolución biológica, sino que tiene su propia autonomía, es decir, no se puede entender la evolución cultural concentrándose sólo en las características biológicas de los individuos. Hay una “discontinuidad” ontológica.

Se encuentran fenómenos emergentes en todas partes. La conciencia es un fenómeno que surge de las “interacciones” entre las neuronas. El agua es el resultado que emerge de la unión de dos moléculas de hidrógeno y de una molécula de oxígeno. El mercado es un fenómeno emergente resultado de las interacciones entre los individuos que intercambian bienes y servicios.

La ciencia clásica tiene dificultades para concebir la idea de organización, ya que todos sus enfoques se orientan hacia la búsqueda de lo simple. Su tesis, que resume la visión reduccionista, es la siguiente: cualquier nivel superior de organización N es el resultado estricto, sin ninguna adición o diferencia, de la composición aditiva o causal de los elementos del nivel $N-1$, y así sucesivamente, hasta el último nivel, el más básico, el de las partículas sub-atómicas. Este último nivel constituye verdaderamente, ontológicamente, el mundo.

El emergentismo defiende una posición opuesta, según la cual, un nivel de organización superior N es el resultado de la composición de los elementos del nivel $N-1$, pero además, posee una autonomía y características propias. Todos los niveles constituyen auténticamente el mundo. Este punto de vista, permite no tener que preocuparse por los detalles de la causalidad subyacente y, de hecho, contingentes. Consideremos,

por ejemplo, que el enfriamiento del agua dará lugar a su organización como hielo, sin tener que bajar al nivel del comportamiento de cada molécula.

La emergencia es el concepto por el cual se explica la transición de un tipo de organización a otra, de complejidad superior. Decimos que cualquier forma de organización, surge del modo inmediatamente inferior en complejidad. La emergencia es una manera de identificar y concebir la relación entre los dos.

La emergencia está muy vinculada a la auto-organización. La organización es espontánea, sin ningún agente externo. Las entidades de nivel inferior interactúan espontáneamente, según sus propias propiedades, y ese proceso resulta en entidades más complejas. La emergencia, de hecho, se refiere a un mundo que no es estático, un mundo en evolución, en el que se pueden producir nuevas formas de vida.

No hay un consenso sobre la emergencia. Este concepto está actualmente insuficientemente desarrollado. Es incompatible con la visión científica tradicional, y sigue siendo poco estudiado y enseñado. Por consiguiente, aún no hay una explicación científica satisfactoria en relación con el proceso de emergencia.

Sin embargo, desde el siglo XIX, el concepto de emergencia re-appearece regularmente. Su aceptación por parte de la comunidad académica es un reto epistemológico de importancia, ya que la emergencia conduce a un cambio de paradigma.

Independientemente de si se acepta o no el principio de emergencia, debemos reconocer que este principio ha inspirado muchos trabajos, que han dejado su huella en el campo algorítmico.

Un *algoritmo emergente* es un proceso de resolución de problemas, que se basa en un conjunto de reglas simples, para hacer emerger un comportamiento global más complejo, sin que este último se haya detallado explícitamente. Él puede ser descrito por las siguientes propiedades:

- Tiene objetivos globales
- No requiere visibilidad global, ni mecanismo de control centralizado

- Converge de forma autónoma a un estado estable.

La emergencia proviene de la cooperación de una multitud de procesos algorítmicos sencillos, y el comportamiento de alto nivel es el resultado de la interacción de bloques de cálculo simples de bajo nivel.

Los sistemas de insectos sociales proporcionan modelos simplificados de procesos de auto-organización no supervisados. Se han deducido formalizaciones matemáticas y modelos informáticos descentralizados, cuyos comportamientos globales emergen de las interacciones. Entre las clases de algoritmos emergentes más conocidas, inspiradas en los insectos, están los *algoritmos de colonias de hormigas*, que se inspiran en diversos aspectos del comportamiento de las hormigas, por ejemplo, en la búsqueda de un camino entre su colonia y una fuente de alimentación; ellos constituyen una familia de meta-heurística de optimización.

Una *red neuronal artificial* también se puede considerar como un algoritmo emergente: consiste en agentes simples, pero su número y sus interconexiones, permiten resolver problemas con un nivel muy alto de complejidad.

Por último, citemos un ejemplo proporcionado por el amplio campo de la *computación evolutiva*, que aborda problemas de optimización continua como combinatorios. Los algoritmos de computación evolutiva proceden de manera iterativa, imitando el crecimiento o el desarrollo de una población que se selecciona al azar. Ellos proporcionan soluciones óptimas globales, guiados por una meta-heurística de optimización estocástica, muy eficiente en el caso de problemas caja negra difíciles.

Este libro explora en profundidad, todas las áreas algorítmicas inspiradas en la emergencia, mostrando que este concepto puede producir procesos e interacciones altamente optimizadas, y que sus aplicaciones en ciencias de la computación son muchas y variadas.

Después de una introducción, que resume la historia y analiza la emergencia en varios campos de la ciencia, este libro presenta diferentes diseños inspirados en los sistemas biológicos auto-organizados, que son la base de muchos algoritmos de optimización global. El libro extiende el análisis de la emergencia en el campo de la algorítmica, al estudiar

los sistemas emergentes artificiales y sus diversas instancias. Los sistemas multiagentes Cognitivos y MASOES (Multi-Agent Self-Organizing Emergent Systems), son el tema del último capítulo del libro, que concluye con el modelado de redes sociales artificiales y las nuevas relaciones sociales que emergen.

En particular, el libro inicialmente describe y analiza en profundidad, el concepto de emergencia. Después, estudia la relación entre la emergencia y otras áreas científicas, en las cuales ese término ha sido usado para explicar fenómenos en las mismas. Seguidamente, el libro continúa con el estudio de conceptos vecinos, pero fundamentales, para comprender y complementar la emergencia. A continuación, el libro se dedica a presentar los modelos de emergencia más conocidos en la actualidad, algunos de ellos bio-inspirados. El libro culmina presentando algunas aplicaciones actuales de la emergencia, que sirven para comprender sistemas reales complejos, o resolver problemas de gran complejidad.

Este libro ofrece una visión completa de los sistemas emergentes, y convence al lector de la potencia de este concepto desde el punto de vista teórico como operacional. Su enfoque innovador y su presentación, lo hacen una verdadera guía teórica y práctica para estudiantes, ingenieros y académicos, quienes pueden encontrar en él una descripción completa, así como la respuesta, a muchos problemas de optimización y modelado complejo. Muy didáctico, acompañado de ejemplos de problemas concretos, presenta desde los conceptos básicos hasta las nociones más profundas, relacionadas con la emergencia y los algoritmos emergentes.

La comunidad hispana encontrará en este libro, una referencia actualizada de temas vinculados a la emergencia, en el cual, el autor, profesor de la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, contribuye extensamente.

Louise Travé-Massuyès
Directora de Investigación del CNRS
Laboratoire d'Analyse et d'Architecture de Systèmes
Toulouse, Francia

Agradecimientos

Este trabajo es fruto de mis años de trabajo de investigación en el área de Inteligencia Artificial, y en particular, en mi esfuerzo por estudiar el problema de la inteligencia desde el punto de vista colectivo, emergente. Durante la realización de este libro, y en particular, los productos de investigación y reflexiones que aparecen en el mismo, son resultados de esos años de investigación en los que muchos colegas y estudiantes míos han participado, a todos ustedes se les agradece eternamente por haberme acompañado en ese camino. En particular, a mis colegas del CEMISID, del Departamento de Computación y Sistemas de Control de la Escuela de Ingeniería de Sistemas, y del LAAS-Francia, así como a mis estudiantes doctorales del programa de Ciencias Aplicadas, como de la Maestría de Computación.

También, varias fuentes de financiamiento han tenido algunos de los trabajos referenciados en este libro, en particular del FONACIT y sus diferentes programas de promoción a la investigación Agenda Petróleo, de Estímulo a la Investigación, de Cooperación Internacional PCP Francia-Venezuela, así como del CDCHTA de la Universidad de Los Andes. Sin ese aporte financiero, muchos de los trabajos, estadías de investigación, que coadyuvaron a este libro, no hubieran sido posibles.

No puedo dejar por fuera a mi familia, a quienes les he robado horas de familia, de paseo, de construir vida juntos por llenar esta pasión. Ustedes han sido mi más grande inspiración, mi fuente de energía, a mis queridos padres, a mi amada esposa, a mis hijas de mis sueños, a mis adorados hermanos, a mis abuelos compañeros de este sueño, y al resto de la familia. Ustedes son testigos de este triunfo.

Finalmente, mi más profundo agradecimiento a las secretarías que me han facilitado la vida universitaria y profesional, aportando su granito de arena para hacer factible este libro, en particular a la Sra. Alis Becerra, Secretaria de la Fundación Centro Nacional de Desarrollo e Investigación en Tecnologías Libres, CENDITEL, y a la Lic. Luisa Díaz, Secretaria del Doctorado de Ciencias Aplicadas de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de Los Andes.

Índice

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 ¿Por qué estudiar la emergencia?	1
1.2 Conceptualización Inicial	8
1.3 Extensiones Conceptuales.	15
1.4 Tipos de Emergencias	24
Capítulo 2: La Emergencia en la Vida	41
2.1 Emergencia y Sociedad	41
2.2 Emergencia en el Reino Animal	59
2.3 Emergencia y Biología	62
2.4 Emergencia e Internet	74
2.5 Emergencia y Filosofía	86
2.6 Emergencia y Complejidad	91
2.7 Emergencia y Teología	94
Capítulo 3: Conceptos Vecinos a la Emergencia	105
3.1 Auto-organización	105
3.2 Autopoyesis	118
3.3 Estigmergia	124
3.4 Retroalimentación	138
3.5 Inteligencia Colectiva	142
Capítulo 4: Modelización de la emergencia	151
4.1 Introducción	151
4.2 Modelos de Insectos	153
4.2.1 Modelos de las Colonias de Hormigas	155
4.2.1.1 Búsqueda de Alimento	171
4.2.1.2 División del trabajo	186
4.2.1.3 Reclutamiento (migración de nidos, etc.)	200
4.2.1.4 Organización del ambiente (construcción de nidos, etc.)	210
4.2.1.5 Agregación (cementeros, clasificación de crías)	216
4.2.1.6 Transporte de Objetos	227
4.2.2 Modelos de las Abejas	230
4.2.2.1 Escogencia del sitio para construir el Nido	235
4.2.2.2 División del trabajo	252
4.2.2.3 Búsqueda de Néctar	255
4.2.2.4 Comportamiento Defensivo	272
4.2.2.5 Construcción de Panales (Colmenas)	274

4.2.2.6 Colonia Artificial de Abejas (ABC)	277
4.2.3 Modelo de las Cucarachas	280
4.2.4 Modelo de enjambre	288
4.2.4.1 Algoritmo GBEST	292
4.2.4.2 Algoritmo LBEST	293
4.2.4.3 Algunas mejoras	295
4.3 Modelos Sociales	297
4.3.1 Modelos de Preferencia	298
4.3.2 Modelo de los Peatones	303
4.3.3 Modelo de Ciudades	307
4.3.4 Comunidades de acceso libre: software libre	311
4.3.5 Modelo de Burocracia	314
Capítulo 5: Algunos Retos de la Emergencia	321
5.1 Sistemas Emergentes Artificiales Computacionales	321
5.1.1 Juegos Emergentes	322
5.1.1.1 Bases Teóricas	323
5.1.1.2 Metrópolis	328
5.1.1.2.1 Diseño del Juego	329
5.1.1.2.2 Experimentación	335
5.1.1.2.3. Caso 1: Emergencia de patrones urbanísticos	337
5.1.1.2.4. Caso 2: Estudio de patrones de ciudad particulares, debido a necesidades específicas de los agentes	343
5.1.2 Conciencia Artificial	346
5.1.3 Sistemas Multiagentes	350
5.1.4 Ejemplos de Técnicas Inteligentes y su relación con la emergencia	354
5.1.5 Robótica Colectiva	356
5.2 Constatación de la emergencia	357
5.2.1 La emergencia en los SMA cognitivos	357
5.2.2 MASOES	367
5.2.2.1 Aspectos Generales Acerca de MASOES	368
5.2.2.2 Descripción de MASOES	370
5.2.2.3 Componentes de la Arquitectura a Nivel Colectivo o Social	371
5.2.2.4 Componentes de la Arquitectura a Nivel Individual	372
5.2.2.5 Metodología para el Modelado de Sistemas Emergentes y Auto-Organizados, a través de	

MASOES	375
5.2.2.6 Bases Teóricas del Método de Verificación para MASOES	377
5.2.2.7 Descripción del Método de Verificación para MASOES	378
5.2.2.7.1 Definición de los Criterios de Verificación	379
5.2.2.7.2 Mapas Cognitivos Difusos Propuestos	379
5.2.2.8. Metodología para usar el Método de Verificación para MASOES	384
5.2.2.9 Modelado de Wikipedia con MASOES	388
5.2.2.9.1 Escenarios y Resultados Aplicados en la Wikipedia en Inglés y Español	397
5.3 Algunas ideas finales	402
5.3.1 Objetos Comunicantes	404
5.3.2 La Web 2.0 y 3.0: Redes sociales virtuales (facebook, Twitter, etc.) y las nuevas relaciones sociales (publicidad, social gaming (zynga), social media, etc.)	407
Referencias	409

Figuras

Figura 1.1. Doble lectura del fenómeno de emergencia (inspirado en [21])	3
Figura 2.1. Transformación de los objetivos tecnológicos en una organización emergente (SI: Sistemas de Información) [191].	53
Figura 2.2. La emergencia como producto del proceso adaptativo de la especies (basado en [21])	63
Figura 2.3. La emergencia de propiedades, entendida como un proceso de construcción abstracta	71
Figura 2.4. Proceso de decisión colectiva en Smartocracy [152].	76
Figura 2.5. Ejemplo de democracia directa (inspirado en [152])	78
Figura 2.6. Ejemplo de Democracia dinámicamente distribuida (inspirado en [152])	79
Figura 2.7. Ejemplo de Voto de poder (inspirado en [152])	80
Figura 3.1. Sistema auto-organizado no emergente	115
Figura 3.2. Sistema Emergente no auto-organizado	115
Figura 3.3. Sistema en que la auto-organización es el resultado de la emergencia	117
Figura 3.4. Diferencia entre la organización y la estructura de un sistema	121
Figura 3.5. Ejemplo de un proceso estigmérgico en la construcción de pilares en las termitas (E_i : estado actual, R_i : respuesta de la termita).	130
Figura 3.6. Fenómeno de estigmérgia en las colonias de hormigas.	131
Figura 4.1. Experimento sobre el comportamiento de las Hormigas (proceso auto-catalítico) (tomado de [65]).	156
Figura 4.2. Experimento sobre el comportamiento de las Hormigas que produce el efecto diferencial de longitud. a) Experimento donde una colonia de Hormigas <i>Linepithema humile</i> selecciona la rama corta después de 8 minutos de que el puente fue colocado. (b) Porcentaje de hormigas que seleccionan la rama más corta de n experimentos. La rama más larga es r veces más larga que la rama corta. El gráfico a la derecha ($n=18$, $r=2$) es un experimento en el que la rama corta es presentada a la colonia 30 min después de la larga rama: la rama corta no es	

- seleccionada, y la colonia queda atrapada en la rama larga (tomado de [65]). 157
- Figura 4.3. Ejemplo del efecto de las retroalimentaciones positivas y negativas en las colonias de hormigas buscando alimentos (basado en [65]). 162
- Figura 4.4. Fase de transición entre un comportamiento colectivo desordenado y otro determinista. El Factor F representa los efectos combinados del tamaño de la colonia (flujos de recolectores), intensidad de los caminos y la vida del rastro (tomado de [65]). 164
- Figura 4.5. Sensibilidad al ambiente: distintos patrones de forrajeo de las hormigas resultados de simulaciones basadas en el mismo modelo con dos distribuciones de alimentos diferentes. A) cada punto tiene una probabilidad de 0,5 de contener 1 alimento; B) cada punto tiene una probabilidad de contener 400 alimentos. En el modelo de simulación, diez hormigas por paso entran al área de alimentación y si encuentran alimento, vuelven al nido dejando un rastro de feromona. En cada punto, la probabilidad de movimiento a la izquierda y derecha es dada por la ecuación 3.1 (tomado de [65]). 165
- Figura 4.6. El papel del ruido en las Colonias de Hormigas: A) Para un nivel alto de ruido (pobres rastros), las hormigas se encuentran dispersas en el forraje (t_1) y, si un alimento más rico se introduce más tarde (t_2), es probable que descubran y exploten preferiblemente esa nueva fuente. B) Para un bajo nivel de ruido (rastros fuertes), todas las hormigas se centran en el primer sendero (t_1) y cuando una nueva fuente más rica es introducida (t_2), la mayoría se mantendrá “atrapada” en la primera explotada la cual es subóptima (inspirado en [65]). 167
- Figura 4.7. Ejemplo de un criterio inteligente. La capacidad de un insecto para recuperar una presa determina su decisión de reclutamiento colectivo, y por lo tanto el patrón de forrajeo. Varios parámetros son integrados en el criterio “recuperación de una presa” (tomado de [65]). 169
- Figura 4.10. Resultados del modelo presentado en las ecuaciones

- 4.36 a 4.41: efecto del quórum en el tamaño de la población encada nido (dos sitios con sitio 2 mejor que el sitio 1 (tomado de [142]). 209
- Figura 4.11. Resultados de simulaciones con el modelo de recolección y depósito de objetos (tomado de [26]). 219
- Figura 4.12. Resultados de simulaciones con el modelo de recolección y depósito de dos tipos de objetos planteado en [26], en diferentes momentos de la simulación: a) inicial, b) intermedia y c) hacia el final (tomado de [26]). 222
- Figura 4.13. Crías completamente ordenadas de una colonia. Las crías están agrupadas a la izquierda del nido, lejos de la única entrada, en el medio de la pared del nido en el lado derecho (no se muestra). El nido fue fotografiado sobre un fondo negro, para resaltar las crías de blanco; las obreras oscuras, y las reinas apenas visibles (tomado de [65]). 225
- Figura 4.14. El mapa representa la región boscosa alrededor del lago Cranberry, en Estados Unidos. Los puntos representan las ubicaciones de los nidos inferidas por las danzas de los exploradores del enjambre, la ubicación del enjambre es señalado por una cruz cerca de la orilla sureste del lago (tomado de [34]). 239
- Figura 4.15. Distancia inferida por las danzas del enjambre, en el lago Cranberry 240
- Figura 4.16. Lugares de baile en el proceso de buscar un nido en tres momentos distintos: A) al inicio, B) un momento posterior C) hacia el final del proceso de selección (tomado de [34]). 240
- Figura 4.17. Historia de toma de decisiones en un enjambre, desde el momento en que el primer sitio potencial fue anunciado al enjambre (Día 1: 11 horas), hasta cuando tomaron la decisión de su nueva casa (Día 3: 12). El círculo representa la ubicación del enjambre; cada flecha que apunta hacia fuera indica la distancia y la dirección de un sitio dado; la anchura de cada flecha indica el número de abejas que bailó para ese sitio en ese período de tiempo. El conjunto de números en cada flecha indican tres cosas: el número superior las abejas que bailan para el sitio, el del medio

- las oscilaciones realizadas para el sitio, y el de abajo el promedio de oscilaciones por danza para el sitio. Los números después de las palabras “abejas”, “baile”, y “oscilaciones”, indican el número total de cada uno de ellos, para ese período de tiempo (tomado de [162]). 249
- Figura 4.18. Patrón de explotación selectiva de fuentes de néctar. El número debajo de cada fuente, denota el número del grupo de abejas que han visitado a cada fuente de alimentos, media hora antes a la hora que se muestra a la izquierda. Las fuentes se encuentran a 400 metros de la colmena, y son idénticas, excepto por la concentración de azúcar (inspirado en [162]). 259
- Figura 4.19. Proceso de ajuste de las tasas de reclutamiento y de abandono (basado en [162]). 259
- Figura 4.20. Flujo de Información para la danza por meneo. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]). 265
- Figura 4.21. Retroalimentación en la danza por meneo, para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]). 265
- Figura 4.22. Flujo de Información para la danza temblando. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]). 266
- Figura 4.23. Retroalimentación en la danza temblando para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]). 267
- Figura 4.24. Flujo de Información por la señal de agitación. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]). 268
- Figura 4.25. Retroalimentación en la señal de agitación para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]). 268
- Figura 4.26. Flujo de Información por el mecanismo de abandono. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]). 269
- Figura 4.27. Retroalimentación en el mecanismo de abandono para

la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]).	269
Figura 4.28. Distribución de las picaduras en un blanco, para diferentes valores de N	273
Figura 4.29. Panal en las Abejas melíferas (tomado de mielarlanza.com)	275
Figura 4.30. Topologías de Interconexión de Partículas (tomado de http://www.scholarpedia.org/article/Particle_ swarm_optimization).	289
Figura 4.31. Burocracia representada como red. a) Red jerárquica estricta. b) El aumento de interacciones y dependencias rompe la jerarquía. c) Módulos pueden ser creados, cuando demasiadas interacciones causan retrasos. d) “Atajos” se pueden hacer, para evitar intermediarios (basado en [73, 76]).	317
Figura 5.1. Pantalla principal de Metrópolis	336
Figura 5.2. Ventana de configuración del juego	336
Figura 5.3. Panel de Visualización	337
Figura 5.4. Construyendo en el Mapa	337
Figura 5.5. Índices de Avance de la Ciudad. Año 1	338
Figura 5.6. Caso 1. Turno 18	338
Figura 5.7. Caso 1. Turno 29	339
Figura 5.8. Índices de Avance de la Ciudad. Año 2	339
Figura 5.9. Índices de Felicidad para los Agentes	340
Figura 5.10. Índices de Avance de la Ciudad. Año 3	340
Figura 5.11. Estudio de la Densidad de construcción en la Ciudad	340
Figura 5.12. Densidad de Instituciones de Educación en la Ciudad	341
Figura 5.13. Densidad de Instituciones de Salud en la Ciudad.	342
Figura 5.14. Densidad de Instituciones de Salud en la Ciudad (Salida por Consola)	342
Figura 5.15. Caso 2. Juego Culminado	343
Figura 5.16. Caso 2. Índices de Avance de la Ciudad. Año 1.	344
Figura 5.17. Caso 2. Índices Finales del Avance de la Ciudad.	344
Figura 5.18. Caso 2. Índices de Felicidad para los Agentes Año 2.	344
Figura 5.19. Modelo de conciencia artificial	348
Figura 5.20. Ciclo que alimenta el proceso de conciencia artificial	348
Figura 5.21. Comparación entre el Modelos de Coordinación Convencional y uno basado en Feromona	352
Figura 5.22. Ejemplo de una Simulación de un Autómata Celular en el caso del Juego de la Vida, basado en las 3 reglas	

simples antes enunciadas, que generan ese efecto de oscilación.	355
Figura 5.23. Ejemplo de Modelo de un SMA (basado en [149]).	359
Figura 5.24. Tipos de Conocimiento y Aprendizaje en MASOES (tomado de [136, 138]).	369
Figura 5.25. Fases involucradas en la Gestión General del Conocimiento en MASOES (tomado de [136, 138]).	369
Figura 5.26. Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados (tomado de [136, 138]).	370
Figura 5.27. Componentes de MASOES a Nivel Colectivo (tomado de [136, 138]).	372
Figura 5.28. Componentes de MASOES a Nivel Individual (tomado de [136, 138]).	374
Figura 5.29. MCD del Nivel I para la verificación de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (criterios de verificación) (tomado de [135, 138])	381
Figura 5.30. MCD del nivel II para verificar los conceptos arquitectónicos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas del nivel I (tomado de [135, 138])	382
Figura 5.31. MCD del Nivel III para verificar los conceptos arquitectónicos del nivel II y III (tomado de [135, 138]).	383
Figura 5.32. Ejemplo para establecer las relaciones entre los distintos conceptos dinámicamente (tomado de [135, 138]).	386
Figura 5.33. MCD integrado con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos (tomado de [135, 138])	387
Figura 5.34. MCD Inicial para Wikipedia en Inglés (tomado de [135, 138]).	399
Figura 5.35. Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés (tomado de [135, 138]).	400
Figura 5.36. MCD Inicial para Wikipedia en Español (tomado de [135, 138]).	401
Figura 5.37. Resultados obtenidos para Wikipedia en Español (tomado de [135, 138]).	402

Tablas

Tabla 1.1. Clasificación basada en causalidad según [67]	34
Tabla 3.1. Algunos ejemplos de enjambres en la naturaleza y sus comportamientos colectivos [29, 138].	149
Tabla 5.1. Radios, Bonos y Penalizaciones Según el Tipo de Construcción	330
Tabla 5.2. Tabla de índices de Felicidad y Tipos de Personalidad	332
Tabla 5.3. Bonificación y Penalización según la cercanía de los tipos de construcción	333
Tabla 5.4. Asociación de las fases para la gestión de conocimiento propuestas en MASOES, y los criterios de verificación definidos	379
Tabla 5.5. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MCD del nivel I	380
Tabla 5.6. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel I	382
Tabla 5.7. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III	383
Tabla 5.8. Valores posibles para las relaciones	385
Tabla 5.9. Agentes con algunas de sus tareas en Wikipedia	390
Tabla 5.10. Componentes Individuales de MASOES en Wikipedia	391
Tabla 5.11. Componentes Colectivos de MASOES en Wikipedia	392
Tabla 5.12. Procesos Colectivos de MASOES en Wikipedia.	393
Tabla 5.13. Wikipedia a través de las fases de gestión general del conocimiento	394
Tabla 5.14. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación), involucrados en el MCD del nivel I, para Wikipedia	395
Tabla 5.15. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II para Wikipedia	397
Tabla 5.16. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III para Wikipedia	397
Tabla 5.17. Estadísticas Generales para las dos Wikipedias	398
Tabla 5.18. Proporción del número total de páginas para las dos Wikipedias	398

Capítulo 1: Introducción

1.1 ¿Por qué estudiar la emergencia?

En esta parte inicial del libro comenzaremos por explorar la noción de “emergencia”. Dicha idea la asociaremos a un comportamiento de un sistema, que “emerge” de las interacciones entre sus componentes, difíciles o imposibles de predecir. Aristóteles, hace millones de años introdujo la idea de que “un sistema es más que la suma de sus partes”. En general, la emergencia es un concepto que típicamente se define como una característica de un sistema, la cual no se limita a la suma de las características de los componentes individuales de dicho sistema.

La emergencia de orden y de organización en los sistemas compuestos de muchas entidades autónomas, tiene que ver con la pregunta fundamental: “¿Cómo un sistema llega a existir? El aspecto sorprendente en un proceso de emergencia, es la observación de un efecto sin una causa aparente. Tal proceso puede aparecer inesperadamente. Además, dicho proceso podría parecer misterioso, pero no hay nada místico, o mágico, al respecto.

La naturaleza relativamente abstracta de la emergencia, ha dado lugar a numerosas maneras de definirla y de clasificarla. Dicho término es utilizado de forma diferente por diversos autores. La emergencia todavía carece de una clara, estándar y aceptada definición general. Por ejemplo, analicemos los trabajos de Turing alrededor del concepto de *morfogénesis* [21, 37, 39, 68, 90, 96, 139], entendida como la capacidad de todas las formas de vida para desarrollar cuerpos cada vez más complejos a partir de orígenes increíblemente simples. Básicamente, Turing, usando herramientas matemáticas, demostró cómo un organismo complejo podía desarrollarse sin ningún tipo de coordinación central o plan maestro. Eso daba cuenta de algo distinto a lo que estamos acostumbrados a creer, que consiste en pensar que todo está gobernado por un ente (sistemas de mando, modelos de poder basados en jerarquías, etc.). Los trabajos de Turing sobre morfogénesis esbozan como agentes simples, miembros de un sistema más complejo, interactúan dinámicamente en formas múltiples usando reglas sencillas, independientes de cualquier orden de nivel superior [21, 37, 39, 68, 90, 96, 139]. Ahora bien, lo anterior sería considerado emergente si tenemos indica-

dores del fenómeno en un nivel macro (es observable). Un clásico indicador de emergencia son *patrones* observables en un nivel superior, con características temporales y espaciales específicas. Las reglas simples permiten que emerjan formas coherentes en un nivel superior, vistas como comportamientos que responden a necesidades cambiantes y específicas del entorno. Así, un sistema es emergente debido a su ambiente. Un sistema emerge en un ambiente dado capaz de detectarlo, cuando esa detección le es útil.

En lo expuesto anteriormente, está la idea de que el conjunto trasciende sus elementos. Así, un sistema con muchos componentes simples, exhibirá un comportamiento del conjunto que organiza el comportamiento de las partes individuales del mismo. Un ejemplo es un copo de nieve. Formas simétricas de cristales se van repitiendo en el hielo, conformándose un patrón a diversas escalas. Las formas que genera el hielo son consecuencias de las reglas locales de interacción que conectan las gotas de agua congeladas.

Muchas veces esas reglas de interacción no se conocen o no son claras (en nuestro ejemplo ¿Las mismas reglas de interacción ocurren en el punto de ebullición y de congelamiento?). Lo que sí es claro, es que esas reglas que gobiernan las interacciones (en nuestro ejemplo, las relaciones entre las moléculas de agua) parecen mucho más simples que los patrones que se generan (cristales, torbellinos, puntos de ebullición, etc.), y todos estos fenómenos complejos son de alguna manera consecuencia de esas reglas. A tales fenómenos llamaremos comportamientos emergentes del sistema.

Pero, podemos preguntarnos ¿Qué permite la emergencia? Pareciera que fueran las interacciones entre dichos elementos, como también la capacidad de detectar e integrar en una forma espacio-temporal lo percibido. Veremos qué otros aspectos también son fundamentales. Concretamente, dichas interacciones tienen un aspecto semántico que les permite a los componentes interactuar, comprenderse, y de manera inconsciente, generar formas de organización colectivas espectaculares (por ejemplo, las olas que hace el público en un estadio). Si bien los elementos pueden ser conscientes de su movimiento repetido, no logran descubrir esa impresión del conjunto de la cual forman parte.

La posibilidad de observar el fenómeno coloca a dicho fenómeno en un dominio semántico distinto a donde acontece el fenómeno (el del observador), compuesto de nuevas expresiones diferentes a las usadas para generarlo (en particular, producto de las capacidades sensoriales del observador), lo cual permite comprender sus interacciones. Por esa doble lectura del fenómeno (según se vea desde sus partes o desde el conjunto), es que se es capaz de descubrir la naturaleza emergente del mismo (ver figura 1.1).

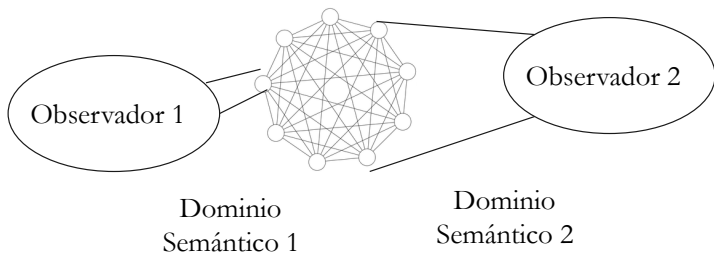


Figura 1.1. Doble lectura del fenómeno de emergencia (inspirado en [21])

Como hemos visto, existen diferentes puntos de vista para acercarnos a un fenómeno emergente. Como psicólogos del comportamiento individual (se estudian los comportamientos de los miembros de una sociedad, los sistemas de coordinación, etc.), o como observadores de la evolución del sistema. Cada punto de vista nos da lecturas diferentes. En el primer caso veremos las actuaciones de cada uno de los miembros (por ejemplo, depósito de señales, sus relaciones, etc.); en el segundo caso veremos comportamientos colectivos (por ejemplo, patrones). Un aspecto fundamental es que las dos visiones se pueden retroalimentar, enriqueciendo el proceso de emergencia. Así, estamos en presencia de una influencia bidireccional, donde el nivel micro caracteriza el fenómeno (es donde se expresa), y el nivel macro explica la naturaleza de lo que se está percibiendo, pudiendo recurrir al nivel micro para dicha explicación. En síntesis, la emergencia hace posible entender el acoplamiento entre el comportamiento microscópico y macroscópico. Al modelar los flujos de información macroscópicos, relacionándolos con las acciones microscópicas, se pueden diseñar soluciones a problemas reales.

Pero cuidado, algunos autores limitan la emergencia a un problema de descripción y de explicación [68]. En esa caracterización de la emergencia se dice que ella no está en las cosas, sino en la mirada dada a los fenómenos. No obstante, desde nuestro punto de vista la emergencia es mucho más que eso. Hay que tener en cuenta que si bien el concepto de emergencia permite explicar algunos fenómenos habitualmente inexplicables, provenientes del ámbito de la “magia”, estos fenómenos preexisten a nuestra observación, explicación e interpretación. En otros términos, la emergencia de una entidad, de una estructura, de una función, o de un proceso en un sistema, es independiente de nuestra mirada como observador; pero la mirada del observador permite percibir esa emergencia (le da la calificación de emergente). Por ejemplo, los hormigueros con sus puentes y los termiteros con sus obras arquitectónicas están en la naturaleza desde hace años, sin que dependan de la presencia de un observador. El observador lo que hace es constatar dichos puentes y obras arquitectónicas.

Un atractivo del enfoque emergente es el poder de adaptación de las estructuras que emergen a los riesgos y cambios del medio ambiente. El medio ambiente está allí para instanciar las normas comportamentales y estructurales de base que conducen a la emergencia del fenómeno global, por lo que, obviamente, no puede haber emergencia sin el medio ambiente. Esa capacidad de adaptación a los cambios exteriores es inmediata, ya que se apoya en una representación interna del medio ambiente (por ejemplo, los rastros), por lo tanto, no requiere la reactualización de datos o la modificación de representaciones.

Son muchos los sistemas naturales que muestran las características antes nombradas, cuya estructura, funcionamiento u organización aparece a un nivel macro. Ejemplos de tales sistemas incluyen las galaxias, los sistemas planetarios, las sociedades, los organismos y las células. También, la idea de emergencia la encontramos en todos los ámbitos científicos, biológicos, etc. Así, se habla de la emergencia de la vida, de la emergencia de la conciencia, entre otros. Es un tema de gran interés para la filosofía de la ciencia, y se encuentra en la encrucijada de varias disciplinas y prácticas. La frase “el conjunto es más que la suma de sus partes” se usa con frecuencia en muchas áreas. Incluso, la emergencia ha permitido que converjan la ciencia y la teología, partiendo de la premisa de que hay realidades inesperadas, sin ir al extremo de la reproducción espontánea anterior a la revolución científica Darwiniana.

Tradicionalmente, los científicos han intentado explicar muchos de esos fenómenos referenciando a las propiedades que aparecen a nivel micro (por ejemplo, leyes aplicables a sus componentes). En esa visión, cada fenómeno observado se reduce a una colección de partículas, cuyo movimiento es gobernado por leyes deterministas. Este método se llama *reduccionismo*, dejando poco espacio para explicar la emergencia espontánea que se ha observado en multitud de sistemas, incluida la vida misma. Si bien esta visión reduccionista es muy útil, cada vez es más reconocido que esta visión es incompleta, porque no permite la comprensión de lo que da lugar a los comportamientos observados en los niveles más altos de una organización.

Entre los años 1930 y 1960 el enfoque reduccionista de la ciencia tuvo mucho apogeo, dejando poco espacio a las propuestas emergentistas, a pesar de que ciertos investigadores desarrollaron temas vinculados a dicha teoría (particularmente, las obras de Alan Turing, Claude Shannon y John von Neumann entre los años 1940 y 1950 [38]). Desde la década de los 70 la idea de la emergencia se ha rejuvenecido, recibiendo el apoyo de movimientos anti-reduccionistas dentro de la filosofía de la ciencia, lo que ha permitido una pluralidad de explicaciones sobre la emergencia, cada una con sus propios dominios de acción. Para llenar los vacíos de la visión reduccionista el tema de la emergencia ha sido abordado de una manera holística, buscando propiedades en los sistemas. Es bueno acotar que esta forma de ver a los sistemas es diferente a la manera como las metodologías tradicionales de ingeniería los caracterizan.

Un aspecto central de la emergencia es que produce resultados impredecibles desde interacciones que, en sí mismas, parecen simples. Un ejemplo donde se pone esto de manifiesto claramente es en las crisis sociales y en las crisis políticas que han venido ocurriendo en los países árabes desde el 2011, o el caos que generan los virus informáticos en los entornos organizacionales. Allí vemos la emergencia de comportamientos sociales. Además, en esos ejemplos la sociedad y la tecnología se interconectan, son dependientes una de la otra, enriqueciendo el fenómeno emergente. Otros ejemplos de comportamientos emergentes bajo esas características aparecen en las colonias de insectos (algoritmos inspirados en el comportamiento de las colonias de hormigas se han usado en el enrutamiento de llamadas telefónicas), o en las congregaciones de aves (dichos modelos se han usado en Internet para modelar

los procesos de auto-organización comunitaria para varios proyectos como Wikipedia). Finalmente, otro ejemplo de fenómeno emergente ocurre en los sistemas autonómicos cuando se produce un error en los mismos. Las interacciones locales servirán para estudiar dicho error: detectarlo, diagnosticarlo, auto-repararse.

Algunos científicos y filósofos han tratado de entender la emergencia de la vida y de la mente a través de una conceptualización amplia de la idea de causalidad [37]. La teoría de la causalidad puede contribuir a una mejor comprensión del concepto de emergencia. Ejemplos de análisis de la causalidad y la emergencia los tenemos desde tiempos remotos [37]; en la última parte de este capítulo damos una discusión al respecto. Por ahora, exploremos las ideas de Aristóteles. Él postuló un principio de crecimiento dentro de los organismos tal que, la forma adulta del animal o ser humano emergía desde su forma joven [37]. Para ello, Aristóteles señaló que existían por lo menos cuatro clases de causas necesarias para explicar la emergencia [37]: causas materiales (la manera en que la materia de una cosa afecta a otra); causas formales (que funcionan a través de formas internas, intrínsecas a la constitución del organismo); causas eficientes (que trabajan sobre los objetos para cambiarlos buscando mejorarlos); y causas finales (que llevan al organismo hacia su perfección). Una adaptación o versión similar de la causalidad es visible en los trabajos de Tomas Aquino (directamente adoptó la teoría de las cuatro causas [39]), así como en alguno trabajos de científicos británicos de los años 20 referentes a la naturaleza de la mente [12, 123].

En general, la emergencia, en el lenguaje ordinario ha sido usada para referirse a los estados de cosas que surgen de forma inesperada. Como tal, el término fue utilizado por el padre de la química, Robert Boyle, para referirse a las sustancias que surgen en la superficie de los líquidos [38], y por Isaac Newton para describir la aparición de las refracciones de luz [38]. Sin embargo, fueron los científicos británicos de la década de los 20 que desarrollaron una teoría de la emergencia como una interpretación meta-científica de la evolución en todas sus formas [12, 123]: cósmica, biológica, mental y cultural. Dichos científicos británicos diferían tanto ontológicamente como en sus puntos de vista con la religión, pero compartían tres principios [38]: En primer lugar, que eran propiedades cualitativas emergentes que debían distinguirse de otras propiedades que se derivan por el mero hecho de que se producen por

una incorporación cuantitativa de partes (por ejemplo, el peso es una propiedad que resulta de la agregación de la materia, mientras que la presión y la temperatura del agua son nuevas cualidades emergentes en relación con los compuestos químicos de hidrógeno y oxígeno). En segundo lugar, suponían un entramado jerárquico de niveles ontológicos de manera que debajo de los niveles más altos emergentes (por ejemplo, los organismos vivos) se encuentran los niveles más bajos de base (por ejemplo, la química inorgánica), existiendo una base causal de abajo hacia arriba. En tercer lugar, tenían una versión holística del fenómeno (sostuvieron que los niveles más altos son impredecibles desde sus partes constituyentes, y en principio, irreductible a los niveles inferiores). De esta manera, establecieron que la relación de causalidad microfísica de abajo hacia arriba debía ser complementada con diversas formas de relación de causalidad de arriba hacia abajo, con el fin de dar cuenta de las propiedades y funciones de los niveles más altos.

Fenómenos emergentes se pueden constatar en todas las ciencias, ya vimos algunos ejemplos en el caso de las ciencias sociales o biológicas. En la física, el fenómeno del electromagnetismo produce un efecto emergente magnético cuando el imán se coloca en la dirección de otras sustancias metálicas; es sólo dentro de esos campos que el efecto magnético se lleva a cabo. En la psicología, podríamos pensar en la emergencia del pensamiento, la sensibilidad, la atención y la conciencia, sin las cuales las acciones dirigidas a un objetivo no serían posibles. Otro ejemplo en biología es la formación de bandadas de aves (y los patrones de migración que surgen), que tienen como consecuencia, que se muevan kilos de átomos y moléculas, inexplicable en términos de la física y biología en general. Otro ejemplo interesante es la emergencia del lenguaje humano, que ha evolucionado a través de una intrincada interacción de procesos sociales. Vemos así que la vida, y la naturaleza, son fuentes continuas de emergencias.

A nivel de su estudio, la emergencia ha pasado por varias etapas [29]. La primera etapa fue dedicada a entender qué era la emergencia, muchas veces sin llamarla así. Esa primera fase consistió en estudiar los “fenómenos” que ocurrían en “colectivos”, naturales (comunidades humanas, jauría de lobos, colonia de hormigas, etc.) o artificiales (equipos de robots futbolistas, agentes informáticos, etc.). En la segunda etapa, ya definida la emergencia como un problema transdisciplinario, se empezó a estudiar y carac-

terizar dicho fenómeno en diferentes contextos, así como su complejidad. La actual fase busca generarla artificialmente, a nivel de juegos, en el arte, sobre internet, etc. Se trata de sistemas que son regidos por las leyes de la emergencia, contruidos sobre sus bases teóricas, buscando crear un orden en un nivel superior a partir de las interacciones entre agentes/componentes en un nivel inferior. Son formas y organizaciones que se generan a partir de fuerzas ascendentes, como se encuentran en muchos procesos sociales (fuerzas políticas, formas comunicacionales, etc.).

En el libro exploraremos el universo de la emergencia, y nos detendremos en los cuatro principios fundamentales para su caracterización y posible generación artificial: las interacciones entre vecinos, el reconocimiento de patrones, la retroalimentación y el control indirecto.

1.2 Conceptualización Inicial

En la literatura existen muchas definiciones de la emergencia, que tienen visiones distintas, dependiendo del área desde la que se esté considerando. Por ejemplo, Estefanía Forrest ha introducido el concepto de “cálculo emergente” [36, 44, 53, 141], Marvin Minsky introdujo el concepto de “fenómeno emergente” [121], muchos autores han venido definiendo tipos de emergencia, como Yves-Marie Visetti para las ciencias cognitivas [196]. Ahora bien, la mayoría de las tentativas modernas de definir la emergencia se basan en un análisis sobre:

- La naturaleza de las relaciones entre “las partes” y “el todo”;
- La naturaleza de las propiedades que toman las “partes” y el “todo”;

Forrest sostiene en [61], que un sistema exhibe emergencia cuando hay una coherencia macroscópica (características, comportamientos, estructuras, etc.), a partir solamente de las interacciones microscópicas o locales entre agentes que no tienen ningún conocimiento explícito de las características macroscópicas deseadas. Desde esa definición, la emergencia permite hallar soluciones descentralizadas, flexibles, y robustas. La capacidad de resolución del problema reside principalmente en las interacciones y coordinación entre los agentes, en vez de inteligentes razonamientos de agentes individuales. El comportamiento complejo resultante de las interacciones y acciones de los agentes, es, a menudo, imprevisible. Ejemplos típicos de mecanismos descentralizados de coordinación son los feromonas, el

gradiente de campos, etc. En este concepto de emergencia, los flujos descentralizados, con mecanismos de retroalimentación, son esenciales para alcanzar un sistema coordinado.

En [44] indican que la emergencia se utiliza para describir la aparición de nuevas propiedades que surgen cuando un sistema supera un cierto nivel o complejidad, y dichas propiedades están ausentes en los componentes del sistema. La vida es citada como un ejemplo de ese concepto: los organismos biológicos dependen de los procesos de sus partes constituyentes, no obstante, presentan un elevado grado de autonomía de sus partes.

El filósofo Inglés G. Lewes, en 1874, utilizó el concepto de “emergencia” para explicar una reacción química [111]: “... Aunque cada efecto es el resultado de sus componentes, no podemos siempre seguir los pasos del proceso a fin de ver en el producto el modo de operación de cada parte. En ese caso, propongo llamar el efecto como *emergente*. Surge de la combinación de los agentes, pero en una forma que no muestra la acción de los agentes”. Así, en esa propuesta subyace una definición de la emergencia para describir un fenómeno, el cual no se puede explicar desde las acciones de sus partes.

La definición que proponen en [54] de la emergencia es la siguiente: Un sistema presenta emergencia cuando hay coherencias que emergen dinámicamente en el macro-nivel, derivado por las interacciones entre los partes del nivel micro. Esos son aspectos nuevos del sistema que van más allá de las partes individuales de sus componentes

La definición de Hempel et al., pone de manifiesto que la caracterización de la emergencia de una propiedad se vincula, por una parte, con un objeto, y por otra, con su composición [84]. Básicamente, ellos establecen que una dada teoría T no permite inducir/caracterizar la emergencia de una propiedad W, y es en otro ámbito del discurso en el cual W toma su sentido.

Cummins et al. [42], parten de la micro-estructura de un objeto x : $x = [C_1, C_2, \dots, C_n; R]$, donde C_i son los componentes y R su organización. Ellos establecen que las definiciones de las propiedades de x son establecidas a través de funciones F_j . Pero para explicar que $x = [C_1, C_2, \dots, C_n; R]$ produce las F_j , se requiere de una teoría de componentes (Tc). Además, definen el concepto de *micro-reducción*: F_j es micro-reductible a $[C_1, C_2, \dots,$

$C_n; R$] si usando T_c para F_j se puede construir su imagen en $[C_1, C_2, \dots, C_n; R]$. Finalmente, la definición de emergencia es: F_j es una propiedad emergente de $x = [C_1, C_2, \dots, C_n; R]$ si F_j no es micro-reductible. De esta manera, la propiedad de un sistema es emergente si no es reducible desde sus partes. Ellos precisan que las propiedades funcionales de un sistema son generalmente emergentes.

Mario Bunge [30] define a P como una propiedad de un sistema complejo x desde dos miradas: P es una propiedad resultante o hereditaria si P es una propiedad que pertenece a uno de los componentes del sistema. En el caso que ningún componente de x posee P , entonces P es emergente. Añade como postulado que toda propiedad emergente puede explicarse a partir de las propiedades de sus componentes y acoplamientos entre estos últimos, algo que en general, la literatura en emergencia ha negado.

John Searle [157], parte del hecho que “un sistema S está constituido de elementos a, b, c , etc.” (por ejemplo, S podría ser una piedra y sus elementos serían las moléculas). Además, indica que habrán características de S que no son necesariamente características de a, b, c , etc. (por ejemplo, la piedra podría pesar cinco kilos que no es la suma de las moléculas tomadas individualmente). Él llama esas características como “características del sistema” (por ejemplo, la forma y el peso son características de un sistema). En específico, él señala que algunas características del sistema pueden deducirse, o concebirse, o calcularse, a partir de las características de a, b, c , etc. y las composiciones o relaciones que existen entre ellos o con el ambiente (por ejemplo: la forma, la velocidad, etc.). Pero hay otras características que no pueden concebirse a partir de la composición/relación entre los elementos, y solo se pueden explicar en término de las interacciones causales que se producen entre dichos elementos, a estas las llama “características del sistema causalmente emergentes” (por ejemplo, la solidez). A esta concepción de la emergencia causal, añade otro tipo de emergencia: cuando F es una emergencia causal, pero a su vez F tiene poderes causales que no pueden ser explicados por las interacciones causales de a, b, c , etc. A esta emergencia la llama “emergencia causal extendida”.

Según M. Scaglione [156], la emergencia es lo contrario de la realización, desde el punto de vista matemático. La diferencia viene dada por el hecho de que la realización tiene un carácter descendente, mientras que la

emergencia tiene un carácter ascendente. Una de las consecuencias importantes es que la emergencia es pues explicable, lo que no elimina de ningún modo su carácter emergente.

Clayton escribe [38]: “Si estoy obligado a dar una definición en una sola frase, diría que la emergencia es la teoría que incluye la evolución cósmica, la cual ha sido en varias ocasiones impredecible, irreductible, ...”. Además, da una lista de las ocho características de la emergencia, entre las cuales cabe resaltar la complejidad jerárquica, la no existencia de una ley monolítica de emergencia, la aparición de patrones en todos los niveles, la baja relación de causalidad, y el pluralismo emergente. Esto es una visión del mundo el cual es visto a través de una jerarquía o escala de complejidad, donde cada nivel es irreductible al primero.

En [141] definen un sistema emergente como un sistema cuyo comportamiento final es discontinuo del comportamiento observado en los niveles inferiores. Citan ejemplos de sistemas emergentes en colectivos, o comunidades como las hormigas buscando alimentos, las termitas construyendo, las aves volando (comportamiento de enjambre), etc. En la descripción de tales sistemas, ellos indican que en el bajo nivel los componentes tienen comportamientos e interacciones expresadas en algún lenguaje dado A, y el comportamiento global de alto nivel se expresa en un otro lenguaje B. Por ejemplo, en un rebaño cada agente podría ser descrito según como avanza hacia un centroide local, usando el lenguaje A, mientras que el comportamiento global del rebaño podría ser descrito según su velocidad y tamaño, usando el lenguaje B. La discontinuidad del lenguaje de descripción, el marco ontológico en que se da cada uno, es un reto a la hora de caracterizar a tales sistemas.

Un concepto vinculado al de emergencia es el de *Cálculo emergente*. E. Forrest [63] lo define como un conjunto de entidades en interacción (el proceso); un epifenómeno producido por ese proceso (un estado estable o invariante); y una interpretación de ese epifenómeno a través de un cálculo (por ejemplo, identificar patrones comportamentales). En ese concepto es fundamental entender la distinción entre epifenómeno y emergencia. Lo que es emergente no es el estado estable, o invariante, sino su expresión en un vocabulario distinto al cual se expresan los procesos. Por ejemplo, en las hormigas el fenómeno emergente no es el rastro de feromonas dejado por ellas, sino su caracterización por el observador

como un camino entre el nido y la fuente de comida. Por otro lado, un epifenómeno no es una emergencia, forma parte del proceso. En el caso anterior sería el rastro (es la única cosa físicamente concreta, el estado estable o invariante sólo es potencialmente perceptible desde el rastro), el cual obra sobre el proceso. En ese momento se produce algo nuevo que no está ni en el proceso (puesto que es necesario el rastro) ni en el rastro (puesto que es necesario el proceso) y que, si se estabiliza se convierte en una emergencia, tanto estructural (el camino) como dinámica (búsqueda de alimentos), lo que ilustra la dualidad estructura/dinámica.

Otro concepto interesante vinculado a la emergencia es el de *procesos emergentes*. Las características de los procesos emergentes, según [117], son:

1. Es casi imposible predecir por adelantado quienes participarán en el proceso.
2. El conocimiento e información se distribuye (conocimiento local).

Ese concepto define tres aspectos importantes.

- El primero es la *estructura* del proceso. S. Morton describió tres tipos de estructura [67, 117]: estructurado, semi-estructurado, y no estructurado. Los procesos de interés son los semi-estructurados y no estructurados, ya que en el otro hay poca flexibilidad para la emergencia. Para explicar dichos procesos usaron el ejemplo de desarrollo de productos tecnológicos. Así, en ese ejemplo los semi-estructurados requieren de mucha gerencia y supervisión (un proceso emergente en este caso sería el desarrollo de nuevos productos vistos como una serie de experiencias de ensayo-error en las cuales se itera recurrentemente a partir de unas estrategias de fabricación genéricas). En el caso no estructurado se daría un proceso emergente cuando las interpretaciones, deliberaciones, y acciones en el proceso de producción se revelan imprevisibles.
- El segundo aspecto tiene que ver con los *usuarios* del proceso. La mayoría de las veces se asume que el tipo de usuario se conoce con anterioridad. Un proceso emergente significa que es casi imposible que un diseñador del sistema sepa por adelantado la clase de gente que será su usuario. Por lo tanto, los diseñadores de un proceso emergente no tienen el lujo de analizar requisitos sistemáticamente ni pueden asumir lo que los usuarios potenciales querrán. Además,

los diversos tipos de usuarios tienen considerable autonomía en decidir en cómo participar, cuándo participar, etc. Un ejemplo es la planificación estratégica: cualquier miembro de una organización es un usuario candidato a ser un instrumento de apoyo a la planificación estratégica.

- Un tercer aspecto son los *requisitos de información*. Los requisitos de información de un proceso emergente son absolutamente diferentes al de los procesos de negocio clásicos.
 - Primero, en muchos procesos de negocios los usuarios analizan los datos numéricos presentados en tablas y gráficos. Por el contrario, en un proceso emergente los usuarios deben buscar a menudo la información que necesitan (muchas veces mal indicada), la cual no se puede caracterizar vía gráficos, etc.
 - En segundo lugar, muchos conocimientos implícitos en dichos procesos son tácitos, no explícitos. Consecuentemente, es difícil capturarlos y compartirlos.
 - Tercero, un proceso emergente tiene un alto contenido de conocimiento experto. Esto significa que para convertir el conocimiento tácito en explícito se debe resolver el problema de cómo representarlo.
 - Finalmente, en la mayoría de los procesos emergentes el conocimiento se distribuye a través de mucha gente. Algo del conocimiento es local y algo es general.

J. Müller, recientemente, propuso una mirada del enfoque emergente desde la teoría de los sistemas multiagentes, la cual considera [124]:

- La descripción formal del fenómeno global que el sistema multiagentes modelará.
- La proyección de este fenómeno global sobre la estructura de interacciones a nivel microscópico, para determinar la identidad de los agentes y la dinámica de las interacciones.
- La especificación de los comportamientos individuales de los agentes para producir las interacciones que generan el fenómeno global que se quiere modelar.

Pero esa definición, necesita estimar el umbral de complejidad a partir del cual no hay conflicto, entre el determinismo causal de los compo-

nentes microscópicos y la existencia de leyes de emergencia o principios de organización en un nivel superior. A modo de ejemplo, consideremos que la eficacia enzimática de una proteína es una propiedad emergente (es decir, que dicha eficacia no se puede deducir de la aplicación de las leyes de la física en una cadena de 20 aminoácidos). ¿Es esto correcto? Una cadena peptídica¹ de n aminoácidos se pueden organizar en 20^n diferentes secuencias. Cada secuencia puede suponer un enorme número de conformaciones tridimensionales. Si asumimos que cada aminoácido puede asumir cinco diferentes orientaciones el número de conformaciones posibles es 5^n , dando lugar a un número total de posibles estructuras moleculares del orden de 100^n . Los requisitos de procesamiento de la información para explorar las propiedades químicas de cada combinación están dominados por esa combinatoria, por lo que un límite inferior de la “emergencia” sería 100^n .

Esta es probablemente una sobreestimación de la magnitud del problema de búsqueda. Ahora bien, existe lo que se ha llamado “eficacia biológica”: proteínas reales contienen entre 60 y 1.000 aminoácidos, siendo 100 un número típico de una pequeña proteína. Según el análisis anterior la eficacia de la proteína puede deberse, al menos en parte, a sus propiedades fuertemente emergentes. Un cálculo similar se puede realizar para los genes. Los resultados sugieren que las moléculas claves para la vida (los ácidos nucleicos y proteínas), son biológicamente eficaces en casi el umbral previsto para la aparición de comportamientos emergentes, y que, por tanto, no pueden reducirse a las leyes de la física que operan a nivel micro. Este análisis apoya la afirmación de que la vida es un fenómeno emergente.

A nivel de formalismos, una de las formas más simples de concebir sistemas emergentes simples son los Autómatas Celulares. La característica clave de los Autómatas Celulares está en su forma de representación (un espacio bi o tridimensional de diferentes tipos), que se puede claramente separar de entidades activas (hormigas, termitas). Una celda en un Autómata Celular puede ser descrita por un autómata de estados finitos, tal que su regla de actualización determina el siguiente estado de la celda y de algunas otras celdas vecinas. Convencionalmente, el estado

¹ Hormona cuya estructura se basa en la unión de varios aminoácidos mediante enlaces peptídicos. El enlace peptídico implica la pérdida de una molécula de agua y la formación de un enlace covalente CO-NH. (basado en http://es.wikipedia.org/wiki/Enlace_pept%C3%ADdico)

de cada celda se representa por un color o sombreado. Así, algunos patrones visuales pueden ser evidentes. Ahora bien, las características emergentes aparecen cuando el programa de actualización de las celdas se ejecuta varias veces durante un período de tiempo, de manera que la representación visual de los estados de las celdas forma movimientos de patrones.

Esta reproducción artificial de la emergencia está vinculada a la definición que se encuentra comúnmente en muchos libros sobre sistemas complejos. En general, la emergencia es definida como una propiedad de un sistema, dada por la aparición de propiedades y estructuras en un nivel superior de organización y complejidad. En esa definición, las propiedades emergentes son impredecibles e irreducibles [94]: “una característica de un sistema complejo se dice que es “emergente” sólo en el caso de que, a pesar de que surge de las propiedades y relaciones que caracterizan a sus componentes, no es ni predecible a partir de, ni reducible a esas características de bajo nivel”. Para finalizar esta parte, analicemos el origen de la palabra emergencia: viene de *emergeré*, que tiene un origen latino que significa levantar, aparecer o elevarse un líquido, compuesto de *ex* (de, desde, de un interior a un exterior) y el verbo *mergere* (hundir, sumergir, zambullir). *Emergere* como verbo latino es lo contrario de la fusión. Considerando que la fusión es la combinación de varias cosas separadas, la palabra emergencia significa lo contrario.

1.3 Extensiones Conceptuales.

La emergencia se ha vinculado a lo que se ha llamado *lógica del enjambre*, que tiene como base comunidades que intentan resolver colectivamente problemas que requieren de mucha flexibilidad e improvisación. Se trata de sistemas donde sus componentes no son capaces de establecer una situación global, pero todos trabajan coordinadamente, sin un coordinador central, usando cada uno solo información local. De esta manera, emergen conductas en el sistema a partir de la actuación local de cada componente, acciones colectivas que producen un comportamiento global adaptado a las necesidades del sistema. Así, ocurre un proceso de planificación descentralizada, derivada de los procesos de retro-alimentación que se dan en el sistema. Con esa información retroalimentada, los componentes del sistema son capaces de generar una especie de mecanismo de decisión local basado en esquema pseudo-probabilístico (lo

que ven de su entorno sirve para hacer estimaciones). Esos cálculos, a veces sobre-estimados o sub-estimados, se equilibran entre sí, en comunidades suficientemente grandes.

De esta primera aproximación teórica a los sistemas emergentes, podemos constatar que la macro-inteligencia y la adaptabilidad se generan desde el conocimiento local. Además, siguen 5 principios básicos [96]:

- *Entre más miembros es mejor:* en los sistemas emergentes esto tiene dos significados. Primero, por la naturaleza pseudo-estadística de los procesos de toma de decisión se requiere de una masa crítica, lo suficientemente grande para balancear las sobre y subestimaciones. De esta manera, la comunidad podrá, como un todo, tener una apreciación inteligente del estado global. El segundo significado se refiere a la diferencia entre micro-motivos y macro-conductas. En ese sentido, si estudiáramos los miembros de una comunidad o sistema, no habría manera de saber que sus esfuerzos son parte de un esfuerzo global. Solo a través de la observación del sistema completo en funcionamiento, se hace evidente la conducta global.
- *La ignorancia es útil:* la simplicidad de las interacciones, y las pocas capacidades inteligentes de los componentes/individuos de un sistema/comunidad, son una característica, no un defecto. Si sus componentes empiezan a ser muy complejos, quizás el sistema emergente se vuelve inmanejable (eso va a depender del grado y forma de coordinación entre sus miembros). Muchas veces es preferible un sistema compuesto por elementos simples densamente interconectados, que tener elementos con capacidades de determinar el estado global del sistema ¿Se imaginan una neurona en nuestro cerebro con la capacidad de conocer el estado global cerebral, para realizar las operaciones biológicas que le corresponden al cerebro como un todo?
- *Se deben provocar encuentros casuales:* por ser sistemas descentralizados, las interacciones casuales, sin formas predefinidas, arbitrarias, son vitales para sus dinámicas. Esos encuentros les permiten recopilar información para adaptarse a nuevas condiciones.
- *Se deben buscar patrones en los signos:* las acciones de sus componentes dependen en gran medida de la capacidad para detectar patrones. Dichos patrones van dictando/guiando los comportamientos y actuaciones de los componentes del sistema. La habilidad de detectar dichos patrones

- permite que circule meta-información a través del sistema/comunidad.
- *Es importante prestar atención a sus vecinos*: la información local produce la sabiduría global. Así, los sistemas emergentes siguen el llamado *paradigma de la multitud*, capacidad de escuchar al vecino para construir en conjunto. La interacción entre los vecinos es la base de la lógica del enjambre.

En la suma de acciones, conocimientos, entre otros, subyacen las capacidades inteligentes del colectivo. Además, agregar más componentes al sistema genera más interacciones, y en consecuencia, la colonia tendrá más capacidad de resolver sus problemas y auto-regularse.

También, *la inteligencia* podría asociarse a un comportamiento emergente de las neuronas y sus interconexiones [90]. Estamos hablando de una inteligencia que emerge espontáneamente de las interacciones de una colección grande de piezas simples (neuronas). La emergencia ofrece un enfoque de causalidad para explicar la inteligencia, sin necesidad de verla a partir de una explicación reduccionista basada en el pensamiento. Para los que temen explicaciones mecánicas de la mente humana, nuestra ignorancia de cómo el comportamiento emerge del producto local de las interacciones, ofrece un vasto espacio de investigación al respecto. De hecho, son muchos los trabajos para modelar el cerebro que se inspiran en esta idea de comportamiento emergente bajo la forma de redes: modelos conexionistas, autómatas celulares, modelos evolutivos, entre otros. En el caso de los modelos conexionistas, el sistema es modelado como una colección de neuronas biológicas. Los autómatas celulares y los modelos evolutivos se basan en la ontogénesis y la filogénesis de organismos vivos. Así, se comienza a pensar en términos de entidades paralelas, las cuales trabajan juntas. Esto no es un cambio filosófico, pero es de gran importancia práctica, puesto que es posible ahora estudiar al cerebro desde el ámbito de los sistemas emergentes. Esto nos permite hacernos preguntas desde la teoría de la emergencia, tales como: ¿Cómo construiríamos una inteligencia inesperada? ¿Qué información necesitaríamos para tener éxito? Un sistema emergente para intentar concebir la inteligencia, estaría basado en el pensamiento simbólico bajo una estructura en redes.

Para algunos autores, esa relación entre la emergencia y el cálculo simbólico en el estudio de la inteligencia, es parecida a la relación entre el

metabolismo y la réplica genética en el estudio de la vida. Así como el sistema metabólico proporciona un substrato en el cual el sistema genético puede trabajar, un sistema emergente puede proporcionar un substrato en el cual el sistema simbólico puede funcionar. El sistema metabólico de vida es tan complejo que es imposible entenderlo o reproducirlo completamente. Por otro lado, las reglas mendelianas de réplica genética son casi triviales, y es posible estudiarlas sin preocuparnos de los detalles del metabolismo que los apoya. En el mismo sentido, parece probable que el pensamiento simbólico puede ser estudiado, y quizás incluso ser reconstruido, sin la preocupación de los detalles del sistema emergente que lo apoya. Éste ha sido hasta ahora el enfoque usado por la inteligencia artificial.

El otro camino que exponen en [90], es construir un modelo del substrato emergente de la inteligencia. Este substrato artificial para el pensamiento no necesitaría detallar los mecanismos del sistema biológico, sino que necesitaría exhibir las características emergentes necesarias para las operaciones del pensamiento. Pareciera que tendría que ver con la información que se maneje. La cantidad de información almacenada por un cerebro humano medio se desconoce, se supone de varios órdenes de magnitud. Ahora bien, según la teoría de la información deberíamos poder responder: ¿Cuánto es necesario almacenar para adquirir un conocimiento de un ser humano típico? Necesitamos tener una respuesta aproximada para construir una inteligencia emergente. Hay por lo menos tres maneras de estimar dicho requisito. Una forma sería comprendiendo los mecanismos físicos de la memoria en el cerebro humano. Si la información es almacenada por modificaciones de la sinapsis, sería posible medir la capacidad de almacenamiento en el cerebro contando el número de sinapsis. Pero saber la cantidad exacta de almacenamiento físico en el cerebro, no contesta totalmente la pregunta del requisito de almacenamiento, puesto que mucha memoria pudo no ser usada o fue utilizada ineficazmente. Un segundo método para estimar el requisito de almacenamiento para la inteligencia emergente, es medir la información como conocimiento simbólico. Para ello se puede usar muestreo estadístico. Por ejemplo, es posible estimar el tamaño del vocabulario para un individuo, tomando las palabras muestreadas aleatoriamente de un diccionario. La fracción de las palabras conocidas por el individuo sería la fracción del conocimiento que tendría del diccionario completo, siendo esta su fracción de conocimiento, pudiéndose así estimar el de un humano típi-

co. Una tercera posibilidad es estimar el índice medio de adquisición de la información y calcular la cantidad que acumularía en un cierto plazo. Por ejemplo, la memorización de secuencias al azar de sílabas durante un intervalo de tiempo, indica el índice máximo de memorización de este tipo de conocimiento. Una dificultad con esta estimación del índice de adquisición es que el experimento mide solamente la información que viene a través de un canal sensorial.

También, para la concepción de ese substrato artificial para el pensamiento, otro aspecto crucial es el índice de cómputo requerido [30]. No hay una medida acordada para ese índice, y es particularmente difícil definirlo tal que sea totalmente independiente del mecanismo de representación del conocimiento. Si el tiempo requerido para una operación atómica de la memoria humana se limita a lo que pueda hacer una neurona, esto nos da una indicación de como el cerebro trabaja como dispositivo paralelo o serial. En un dispositivo serial, los datos se procesarían secuencialmente, uno a la vez. En un dispositivo paralelo, todos los datos se procesarían concurrentemente. En general, los comportamientos seriales y paralelos son exhibidos por el cerebro, ambos modelos pueden describir la manera como razona y tiene acceso al conocimiento el cerebro, en específicas situaciones. En el caso de la inteligencia artificial, la mayoría de los programas se han basado en modelos seriales de cómputo, aunque esto pueda ser una distorsión causada por la disponibilidad de máquinas seriales. Lo cierto del caso es que cualquier cálculo requiere de un gran ancho de banda, con una eficacia de acceso a la memoria, para producir un comportamiento inteligente. Este ancho de banda parece fisiológicamente plausible, puesto que tiene que ver con la corteza cerebral.

Otra pregunta importante para la concepción de ese substrato artificial es, ¿Qué funciones sensoriales son necesarias en la inteligencia simbólica? porciones grandes del cerebro parecen estar dedicadas al procesamiento visual, auditivo, y se desconoce cuánto es necesario para el pensamiento. Una persona que está ciega, sorda o paralizada totalmente, puede indudablemente ser inteligente. Incluso, puede ser que una persona ciega se aproveche del pedazo del cerebro para el procesamiento de la representación visual, para el razonamiento espacial. Esto nos lleva a una conclusión asombrosa, muchas funciones sensoriales-motoras son innecesarias para el pensamiento. No sería

asombroso pensar que hemos sobrestimado la importancia de estas funciones para el pensamiento inteligente, nuestra comprensión actual del desarrollo filogenético del sistema nervioso sugiere un punto de vista en el cual la inteligencia es una adaptación de la conexión entre las entradas y las salidas sensoriales o motoras [30]). Es cierto que la inteligencia no sería de mucho uso, ni se habría desarrollado a los niveles actuales, sin un sistema sensorial para medir el ambiente y un sistema motor para cambiarlo. Ahora bien, quizás es posible que con las pobres capacidades sensoriales-motoras que actualmente sabemos crear artificialmente, sería suficiente para la inteligencia emergente. Así, vemos que las funciones sensoriales-motoras serían importantes para el uso de la inteligencia, pero no necesarias para que exista el pensamiento [30].

De esta manera, si fuera posible reconstruir el substrato emergente de la inteligencia, sin comprender los detalles de cómo trabaja, de todas maneras necesitaríamos entender algunos de sus principios. Para ello deberíamos comprender los sistemas biológicos, que son ejemplos verdaderos de la inteligencia (sistemas emergentes que han producido inteligencia). Esto nos lleva al dilema de hasta dónde se debe conocer sobre un fenómeno emergente, para reproducirlo. Por ejemplo, los autómatas celulares se han utilizado para simular el comportamiento emergente de los líquidos. Las ecuaciones que describen el flujo de un líquido se han conocido por siglos. El cálculo de las interacciones moleculares de muchas partículas es extremadamente difícil, pero algunos aspectos simples del sistema, tales como la conservación de la energía y del número de la partícula, son suficientes para reproducir el comportamiento global. Un sistema de simples partículas que obedece estas dos leyes, puede reproducir los mismos fenómenos emergentes. Incluso, aunque las reglas detalladas de interacción fuesen muy diferentes de las interacciones de moléculas verdaderas, los fenómenos emergentes serían parecidos. Los fenómenos emergentes pueden ser creados, sin la comprensión de los detalles de las fuerzas entre las moléculas ó las ecuaciones que describen el flujo del líquido.

Un ejemplo de un sistema emergente que se puede simular con solamente una comprensión limitada, es la biología evolutiva. Las criaturas, siguiendo los patrones mendelianos de la herencia, pueden desarrollarse para la supervivencia. Pero hay muchas dudas sobre los procesos de la evolución. Podemos explicar por qué los animales que vuelan tienen huesos ligeros en términos de la selección natural, pero no podemos explicar por qué

ciertos animales han desarrollado la habilidad para volar mientras otros no. Tenemos cierta comprensión cualitativa de las fuerzas que causan el cambio evolutivo, pero no podemos explicar la dirección de ese cambio, excepto en los casos más simples. A pesar de estas limitaciones, nuestra comprensión es suficiente para escribir programas que simulan la evolución que muestran comportamientos emergentes interesantes. Los comportamientos emergentes exhibidos por estos sistemas son consecuencia de las reglas subyacentes simples, definidas por el programa. Aunque los sistemas tengan éxito en producir los resultados deseados, sus comportamientos detallados están más allá de nuestra capacidad de analizar y de predecir. Dichos programas son el substrato metabólico en el cual la inteligencia pudo crecer.

Pero volvamos al dilema de cuánto saber sobre un fenómeno emergente para reproducirlo. Como ya hemos dichos, los sistemas en cada nivel jerárquico tienen dos características: Actúan como un todo, como una entidad homogénea, y sus características no pueden ser deducidas, incluso en teoría, del conocimiento más completo de los componentes, tomándolos por separado o en combinaciones. Esto nos permite extraer ciertas características de la emergencia, según [139]: el conjunto es de alguna manera diferente que sumar sus partes, puede ser descrito como una entidad de orden mayor, y tiene funcionales como un todo. Así, cualquier organismo vivo, los ecosistemas complejos, o artefactos tales como computadoras, se pueden considerar como entidades emergentes. Una vez que se ha identificado el todo, ese todo obedece a leyes de orden superior que describen su comportamiento, independientemente de la “física del nivel inferior”. Por ejemplo, la vida es un fenómeno emergente que obedece a ciertas leyes de la auto-organización y de la complejidad. Ambas, las entidades y las leyes que las gobiernan, se puede decir que son emergentes. Pero la descripción y las leyes de orden superior llevan típicamente a una nueva necesidad, la caracterización de lo imprevisible. Esto último expresa nuestra inhabilidad para predecir la ocurrencia de algo con anticipación. Lo único que podríamos afirmar es que lo que hace un objeto o una ley inesperada o emergente es, en parte, lo imprevisto de ese objeto o ley por adelantado.

En general, a la emergencia se le han dado seis características correlacionadas [54, 67]:

1. Las entidades emergentes son caracterizadas por descripciones de orden superior.

2. Las entidades emergentes obedecen leyes de orden superior.
3. Las entidades emergentes son caracterizadas por lo imprevisible.
4. Las entidades emergentes se componen necesariamente de entidades de nivel inferior.
5. Algunas entidades emergentes son capaces de la causalidad de arriba hacia abajo.
6. Las entidades emergentes son caracterizadas por manifestarse en múltiples formas.

La última característica tiene un papel importante, entre otras cosas, porque le da a las entidades emergentes un carácter no reductible. Por ejemplo, dos individuos pueden tener experiencias idénticas del dolor, a pesar de tener configuraciones diferentes de neuronas.

Según [67], una *propiedad emergente* es parte del sistema y al mismo tiempo no es parte de él, pues depende del sistema ya que en él aparece y de él se separa. Las propiedades emergentes son irreducibles (no pueden ser descompuestas). Además, en [67] afirman que pareciera que es lo único que existe realmente, pero si son examinadas de cerca, se ve que no existen en absoluto y, a menudo, se desvanecen en la nada. La paradoja surge principalmente porque sólo somos capaces de ver una parte de un sistema complejo, la microscópica o la macroscópica. En [67] indican que las características principales de las propiedades emergentes son su inexplicabilidad, su irreducibilidad, y su imprevisibilidad.

Exploremos ahora el tema del *marco ontológico de la emergencia*. Una manera reduccionista de acercarse a la emergencia es entender cada objeto solamente en términos de sus partes, es así como muchos científicos han explicado y descritos fenómenos. Un enfoque más emergente es tratar de entender los fenómenos desde un nivel más alto (proceso evolutivo, comportamiento neuronal). Por ejemplo, se podría entender por qué las neuronas individuales se comportan de una manera desde un orden más alto de explicación, no mirando solamente las neuronas individuales, sino desde las clases de problemas que el organismo en conjunto puede resolver. El discurso de emergencia, por lo tanto, es importante no sólo para interpretar la ciencia, sino también en la práctica de la ciencia. Desde esta mirada, para definir el marco ontológico de la emergencia un problema inmediato que encontramos es el de la terminología. En la literatura filosófica podríamos conseguir algunas ideas para tratar ese aspecto. La

escuela de Platón propone una explicación, que es entender las entidades emergentes como ficciones útiles, entendidas como conceptos o relaciones conceptuales que existen solamente en la mente de quien lo percibe. Por ejemplo, como nuestra resolución visual es limitada vemos un cuadro de un pintor en su conjunto y les damos un nombre, pero si nuestra resolución visual fuera mejor no veríamos el cuadro en absoluto, sino una colección de átomos. En esta opción de la escuela de Platón ellos dirían que hablamos de cuadros porque tal orden de nuestra experiencia nos es útil, no porque sean verdaderos. La invocación a entidades emergentes es debida a su utilidad explicativa. Así, hablamos de osos panda porque es útil para nosotros. Pero ontológicamente, cualquier oso panda es una colección de partículas subatómicas. Desde la emergencia diríamos que “un oso panda es una colección de moléculas”. Así pues, la emergencia evidencia que hay, ontológicamente, algo más en esas realidades emergentes ¿Cuál es ese algo más?

Según [22], las entidades emergentes se vinculan típicamente a la cuestión de la eficacia causal. Las entidades emergentes son capaces de ejercer una clase de causalidad de arriba hacia abajo. Por ejemplo, el neurólogo Rogelio Sperry sostenía que cualquiera caracterización de la acción humana no debía sólo considerar el flujo de causalidad de las neuronas al cerebro, sino el efecto causal de arriba hacia abajo, de la mente en el cerebro [81]. Pero ¿Qué significa causalidad de arriba hacia abajo? Normalmente, la idea de la causalidad de arriba hacia abajo no es para substituir o contradecir las energías causales de los niveles inferiores de la física y de la química. Para la emergencia, la causalidad descendente es parte de la historia. Esa noción de causalidad de arriba hacia abajo establece condiciones de límite. Un ejemplo de causalidad descendente es el patrón de la reina que sirve para guiar la construcción del nido en un panal. Ella no establece por qué las abejas trabajan juntas para construir el panal, sino que determina las *condiciones de límite* que se convierten en leyes de la naturaleza, como por ejemplo la selección natural. La ontología nos permite establecer un discurso basado en la causalidad de arriba hacia abajo, para la comprensión y explicación de sistemas físicos complejos. Siguiendo la lógica ontológica, podemos describir la causalidad de arriba hacia abajo como una ficción útil. Es decir, la causalidad de arriba hacia abajo es importante porque nos ayuda a entender los sistemas físicos que estarían más allá de nuestra comprensión. No podemos ver los componentes moleculares de un grupo de termitas ni su evolución histórica. Conceptos tales como células, colonia

de la hormiga, selección natural, y las relaciones causales asociadas a ellas, son aproximaciones útiles para el biólogo, las ciencias; pero ellas son solamente aproximaciones que nos ayudan en nuestras tareas como científicos, filósofos, y en general, como ciudadanos de este mundo.

1.4 Tipos de Emergencias

El conocimiento de los diferentes tipos de emergencia es esencial para comprender los sistemas complejos. Es necesario entender el proceso de emergencia de sistemas complejos, a fin de crear nuevas formas de sistemas complejos más robustos, que se preparen para la ocurrencia de errores y eviten el fracaso, tanto como sea posible. Al respecto, existen varias clasificaciones de la emergencia en la literatura a partir de conceptos como reducción, predicción y causalidad.

Heylighen ha propuesto los criterios de clasificación siguientes para la emergencia [85, 87, 89]: cantidad de variables en el sistema, cantidad de influencias externas, tipo de restricciones para mantener la identidad del sistema, número de niveles. Estos atributos no son, por desgracia, totalmente independiente. También, en [67] se propone una taxonomía de los principales tipos de emergencia. En [39] proponen variantes de la emergencia basadas en la amplificación de los patrones o configuraciones:

- En primer lugar, describen las emergencias de *primer orden* como relaciones de supervivencia, tal que las propiedades de los sistemas de orden superior dependen de su nivel inferior. Un ejemplo es el caso de la lluvia, que es función de la unión química entre el hidrógeno y el oxígeno, de la presencia de muchos H_2O , y de las condiciones térmicas adecuadas;
- Después establecen la emergencia de *segundo orden*, la cual se lleva a cabo a través del caos y la auto-organización, donde las condiciones ambientales juegan un papel formativo, en combinación con la historia concreta del sistema. Un ejemplo, es la formación de cristales de nieve, que es causada, no sólo por el primer orden intrínseco de las propiedades físicas del fenómeno, sino también, por la simetría radial de la disipación de calor (relación temperatura vs. humedad). Para este tipo de emergencia, el parámetro tiempo comienza a ser importante. Por ejemplo, el crecimiento de cristales ocurre mediante la amplificación de los procesos históricos;

- Finalmente, en el tipo de emergencia de *tercer orden* se observa la evolución, al “recordarse” su historia mediante su inclusión en su programa de organización. Ejemplo de ello son todos los casos de aprendizaje evolutivo, sistemas evolutivos auto-referenciales, que se mantienen y se producen ellos mismos de acuerdo a sus programas internos (autopoiesis). La interacción con el medio ambiente toma una nueva forma en este tipo de emergencia, ya que el fenómeno de la autopoiesis cambia tanto las relaciones de supervivencia como la relación con el medio ambiente. Por ejemplo, en los organismos vivos la percepción del medio ambiente modula e interpreta el medio ambiente de conformidad con sus “intereses” internos.

Las tres variantes de la emergencia presentadas, se entienden dentro de un marco naturalista, sobre la base de la causalidad de abajo hacia arriba. Una vez que los sistemas emergentes se han establecido, son capaces de realizar funciones adicionales de causalidad al restringir y canalizar, “desde arriba”, lo que es dinámicamente posible, “desde abajo”. Es decir, las emergencias de primer orden de superveniencia y de segundo orden de las condiciones ambientales están presentes en la emergencia de tercer orden autopoyética [39].

Algunos autores hablan de la emergencia débil y fuerte [39]. De acuerdo a la *emergencia débil*, características sistémicas en el nivel “superior” no se pueden predecir a pesar del conocimiento que se tenga de las características y leyes que rigen los componentes de ese sistema. La emergencia débil también ha sido llamada emergencia epistemológica, ya que todo el trabajo de análisis de la emergencia se hace en el nivel base. De acuerdo a la *emergencia fuerte*, fenómenos emergentes pueden obtener nuevas capacidades causales que hace posible que los sistemas puedan ejercer una influencia de arriba hacia abajo. Por otro lado, en [82] hacen la siguiente distinción entre las emergencias fuertes y débiles: *La emergencia fuerte* no es deducible, ni siquiera de las leyes de bajo nivel, mientras que *la emergencia débil* es sólo inesperada dada las propiedades y principios de bajo nivel. Otros autores han señalado que un sistema *débilmente emergente* es aquel en el que la dinámica causal de la totalidad está completamente determinada por la dinámica causal de sus partes, junto con información sobre las condiciones del entorno y de las perturbaciones externas, pero el comportamiento completo y detallado no puede predecirse con eficacia [82]. Por otro lado, ellos señalan que un sistema *fuertemente emergente* es aquel en el que los niveles superiores de complejidad poseen características

genuinas que están ausentes de las partes constitutivas. Es decir, conjuntos pueden exhibir propiedades y principios que no se pueden reducir al efecto acumulativo de las propiedades y leyes de los componentes. Bedau extiende esa clasificación a tres tipos de emergencia [82]: débiles, nominales y fuertes. Él usa débiles y fuertes en el mismo sentido que Chalmers, y agrega la idea de la emergencia nominal, que corresponde a la definición general de una propiedad emergente derivada de una anterior. Finalmente, Seager hace hincapié en dos tipos de emergencia [82]: benigna y radical. Ellos distinguen entre las benignas, emergencia aceptable si se puede encontrar un esquema explicativo que proporciona una especie de taquigrafía útil para describir el comportamiento de un sistema, y la radical, corresponde a la emergencia fuerte.

Un enfoque tradicional en Inteligencia Artificial es proponer métodos de resolución de problemas inspirándose en estrategias que desarrollaron los sistemas naturales. Estos métodos se basan generalmente en una formalización a priori del problema. En los ámbitos dinámicos y dudosos, esta formalización a priori se vuelve difícil. La naturaleza parece haber solucionado este problema a través de la emergencia de comportamientos colectivos, auto-organizándose a partir de las dinámicas de sus entidades, por las interacciones entre ellas y con el medio ambiente. Desgraciadamente, el concepto de emergencia desde la inteligencia artificial presenta problemas, esto ocurre así, porque sus definiciones, vistas como un proceso constructivo, no existen, sino más bien, es definida por la ausencia de “algo”. A veces se asocia a una incomprensión o “intuición” ante algunos fenómenos observados en la naturaleza. Así, para que la Inteligencia Artificial pueda comprender y explotar estos fenómenos emergentes, debe plantearse enfoques alternativos de modelado informático. Estos enfoques tendrán como principio de base, un colectivo de agentes en un medio ambiente, que debido a sus interacciones van a evolucionar hasta converger en un estado estable representativo de una solución, lo que se opone al enfoque “clásico” de resolución de problema, en el que se divide el mismo en tareas. De esta manera, el enfoque “emergente”, por el contrario, se basa en agentes, el medio ambiente y sus interacciones, y en un proceso que construye en la marcha una solución. A partir de allí, desde la Inteligencia Artificial se pueden definir cuatro formas de emergencia [39, 83]:

- *Forma puramente lógica de la emergencia.* Ejemplos de ello son los patrones fractales emergentes en la pantalla del computador, o autómatas celulares capaces de producir estructuras muy complejas. Las estructuras evolucionan computacionalmente por procedimientos lógicos, paso a paso, sobre la base del diseño inicial del programa y de la elección de los parámetros iniciales. Esta emergencia no necesariamente está relacionada con el mundo físico real.
- *Casos en que la emergencia es vista como la aparición de nuevas propiedades físicas.* Las propiedades no son más que atributos de la física. Un ejemplo concreto es la aparición de agua basada en las propiedades químicas intrínsecas de H_2O . Pero también se aplicaría a la formación de copos de nieve. La diferencia es sólo que aquí la base física subyacente se ampliaría para incluir no sólo las propiedades químicas intrínsecas, sino también sus relaciones con el medio ambiente.
- *Casos en que las nuevas propiedades emergentes surgen sobre la base de nuevas configuraciones (espaciales, funcionales, etc.).* La idea es visualizar características en el contexto de los sistemas, relativamente perdurables, de orden superior. Lo que es importante, es que los sistemas emergentes no caigan presos de sus entornos cambiantes (como los copos de nieve hacen). Para ello es necesario la aparición de sistemas relativamente estables, que son capaces de seguir su propia programación, incluso en circunstancias cambiantes (por ejemplo, buscar comida cuando no hay alimentos disponibles de inmediato). Este nivel es alcanzado en los organismos vivos, que son capaces de responder selectivamente a sus entornos.
- *Casos muy especiales donde las nuevas propiedades emergentes, sobre la base de nuevas configuraciones, dará lugar a nuevas causalidades en el contexto de los sistemas de orden superior,* eso permite procesos de auto-referencia, auto-reflexión lo que genera características tales como la conciencia humana. Esta última posibilidad es más controvertida, ya que supone la existencia de sistemas de cuerpo-mente que tienen la forma de auto-consciencia, lo que es generalmente atribuido a los seres humanos solamente. La pregunta es: ¿La persona humana constituye un caso especial de emergencia?

También, desde las ciencias cognoscitivas han habido reflexiones sobre los tipos de emergencia. Y. Visetti ha definido tres tipos de emergencia [196]:

- Emergencia como el paso desde un punto de vista micro a una opinión macro;
- Emergencia como la reestructuración de una explicación de un sistema, a raíz de un acontecimiento;
- Emergencia como la adscripción de un sistema A en un sistema B en interacción con A.

El primer caso sería la emergencia de S. Forrest [61, 62, 63], la cual es estática y dependiente del observador, el último caso sería el otro extremo, dinámico e independiente del observador. Entre esos dos casos hay uno intermedio, dinámico y dependiente del observador, puesto que es él quien debe reestructurar su comprensión del sistema. Lo que es resaltante de esa clasificación, es que todas se pueden explicar a partir de las interacciones entre sus partes, mediadas por la percepción e interpretación que haga el observador. Tanto L. Von Bertalanffy [197] como M. Minsky [121] lo consideran también así, al expresar que las propiedades emergentes surgen del conjunto de las partes contenidas en un sistema y de las relaciones que los vinculan, vistas desde un observador.

De esta manera, la emergencia es un fenómeno que puede existir a través de muchas escalas organizacionales, desde el microscópico (átomos y moléculas) al macroscópico (organismos, especies, ecosistemas). Por lo tanto, es posible prever una serie continua de emergencias a través de esas escalas, extendiéndose desde el fenómeno más simple hasta los procesos más complejos y más esotéricos de la existencia. El observador de la emergencia puede ser/estar externo al proceso, o formar parte del sistema, y la característica emergente es percibida por la mente del observador. La complicación, en este último caso, se presenta porque el fenómeno emergente es a lo interno del observador. En ese sentido, se podría también discutir si el funcionamiento de los procesos genera características emergentes, por ejemplo, los bioquímicos en el cerebro, sin importar si el observador es consciente de ello. Ahora bien, aunque las características inesperadas sean fenómenos emergentes, poderlas medir y explotar requiere siempre de un observador. En ese sentido, se pueden distinguir dos clases de emergencia [82]: intrínseco a un proceso, o por la formación de un patrón que existe solamente cuando es observado.

También la emergencia está vinculada al concepto de auto-organización [82]. Muchos autores asocian la emergencia a la auto-organización del des-

equilibrio, aunque el término de auto-organización no se utilice siempre. Sin embargo, es también razonable aplicar el concepto de emergencia a las características colectivas de los sistemas en equilibrio. Para reflejar esos dos tipos de sistemas en los cuales la emergencia puede ser encontrada (cerca del equilibrio y lejos de equilibrio), se han propuesto dos clases de emergencia [82]: simple y compleja, representando los extremos de una serie continua de emergencias. En [82] proponen que la transición entre las emergencias, desde la más simple a la más compleja, viene dada por un proceso de auto-organización que se asocia invariablemente a la formación de un patrón. Para ello, definen la auto-organización como un orden generado desde el desequilibrio a niveles macroscópicos, debido a las interacciones colectivas, no lineales, de múltiples componentes microscópicos.

Particularmente, la emergencia simple ocurre en sistemas cercanos al equilibrio. Tales sistemas son comunes en el mundo físico: gases dentro de recipientes de tapa cerrada, rocas, etc. (la estabilidad está en los objetos en la roca rígida, o en el fluido de los objetos en el recipiente). Las características emergentes simples pueden a menudo ser diseñadas, calculadas, etc. Sin embargo, las características emergentes simples, como todas las características emergentes, pueden ser modeladas y predichas más eficientemente en el nivel superior (sistema), que en el nivel donde están los componentes. Por ejemplo, las características emergentes de un gas (temperatura y presión), se pueden predecir de las características y de las interacciones de los componentes atómicos o moleculares. Sin embargo, esa predicción es más eficiente en el nivel sistema, pues estas características se pueden determinar con una ecuación simple de la ley del gas. En resumen, la emergencia simple no depende de la auto-organización del desequilibrio. Por otro lado, la emergencia compleja se genera desde las más simples, cuando los sistemas están lejos de equilibrio. Es decir, la emergencia compleja existe solamente en los sistemas no lineales lejos del equilibrio, el desequilibrio da lugar a la auto-organización. Ejemplos de emergencia compleja incluyen la selección de los caminos más cortos en los sistemas de hormigas, los patrones en los ecosistemas, entre otros. Tales sistemas tienen niveles múltiples jerárquicos de auto-organización, y el cálculo de características inesperadas, en el nivel sistema, rápidamente llega a ser incalculable desde el nivel componente.

Ahora bien, como se expuso anteriormente, aunque las características emergentes existen independientemente del observador, la explotación

y uso de dichas características ciertamente requieren de la participación de un observador. Pero, cómo detectar y cuantificar la emergencia es un reto de investigación. Por ejemplo, J. Crutchfield y C. Shalizi desarrollaron una descripción de la emergencia en términos del parámetro llamado eficacia profética relativa [41, 172], entendida como la eficacia de la predicción de un proceso. Ella es definida como el cociente entre la entropía de un proceso y su complejidad estadística $E_p = E/C$, donde E es la entropía y C es una medida de la complejidad estocástica del proceso. E puede ser interpretada como la fracción de la memoria histórica almacenada en el proceso que puede informarnos sobre el futuro. La complejidad estadística (C) se puede considerar como el tamaño del modelo del sistema, en un nivel dado de su descripción. Si un sistema puede ser descrito en dos niveles de abstracción, un nivel de los componentes y un nivel alto derivado del primero, la emergencia existe cuando el nivel más alto tiene una eficacia profética mayor que el nivel inferior. La eficacia profética se puede pensar como la relación entre que tan bien el sistema puede ser modelado y la complejidad del modelo que describe al sistema. Si los modelos proféticos son malos o predicen bien, pero son muy complicados, tendrán un nivel bajo de eficacia profética. Esta información teórica para caracterizar la emergencia es aplicable a la emergencia en todas sus escalas y niveles de complejidad, del simple al complejo, aunque ellos no dejan claro cómo calcular tales valores. Lo relevante de ese trabajo es que el cálculo de la eficacia profética relativa de Crutchfield y de Shalizi permite que la emergencia intrínseca sea cuantificada. Otros trabajos en el que definen métricas para caracterizar la emergencia son [58, 59]. En dichos trabajos proponen una representación de los Sistemas Dinámicos (SD) basada en las teorías multi-agentes y de grafos, a partir de la cual caracterizan sus capacidades emergentes. Ellos presentan una formalización de un SD, al observarlo como una red compleja de interacciones entre nodos, quienes representan agentes y procesos. A partir de esa formalización, las dinámicas locales y global de la representación de un SD, permiten reproducir y modelar las propiedades emergentes de Homeostasis, Autopoiésis, Auto-organización y generación de Patrones. De esa manera, la emergencia es cuantificada a través del cálculo de las propiedades emergentes antes señaladas, a partir de la representación de un SD descrito como una red de interacciones de nodos.

El papel observador se ve enriquecido con medidas de este tipo. Por ejemplo, un químico que reflexiona sobre la relación entre la presión y

la temperatura de un gas forma un modelo de estas características en su mente. En la ausencia de cualquier conocimiento sobre la ley de gas, el químico podría, por ejemplo, estimar la eficacia profética relativa del gas en los niveles de componentes y del sistema. Tales cálculos serían onerosos en el nivel de componentes porque requieren de un conocimiento de la dinámica molecular. Así, en el nivel de componentes se podría predecir las características termodinámicas de un gas (E), pero se requiere de una complejidad muy grande del modelo (C), lo que causa que la eficacia profética (E_p) sea baja. En el nivel del sistema se podría establecer una relación simple entre ciertas variables dominantes para predecir exactamente las características termodinámicas del sistema. En este caso, E es alta y C es relativamente pequeña, así que la eficacia profética E_p es más grande. Esta eficacia profética más grande en el nivel del sistema le indica al observador que la temperatura y la presión son características emergentes.

Por otro lado, desde la idea de causalidad de arriba hacia abajo existen varias clasificaciones de la emergencia. Por ejemplo, en [141] se ha definido una taxonomía completa de la emergencia, utilizando las relaciones de retroalimentación. Definen las de primer orden (sólo relaciones hacia adelante), de segundo orden (relaciones de retroalimentación), y de tercer orden (relaciones de “causalidad mutua”). Esa taxonomía distingue entre la retroalimentación con valores de error, se filtra la salida con un límite antes de que sea devuelto a la entrada; y la causalidad sin valores de error, la salida pura se devuelve a la entrada. Otra clasificación basada en la causalidad es dada en [186]:

- *Emergencia reduccionista.* establece que las entidades emergentes, y sus fuerzas causales, son producto de ficciones. El sentido reduccionista fuerte establece que el conjunto no es nada más que la suma de sus partes, y las entidades emergentes y sus explicaciones son ficciones simplemente útiles, que nos ayudan a comprender cómo las cosas trabajan. Hay un reduccionismo jerárquico, el cuál acepta la utilidad de las descripciones y las explicaciones de orden superior. Incluso, reconocen que los objetos pueden ser descrito en términos de diversos niveles jerárquicos.
- *Emergencia física no reduccionista.* En términos generales, la física no reduccionista establece que en el nivel más bajo del análisis todo es físico, y todo se compone de partículas físicas, tales como los electrones, y leyes que los gobiernan. Para la física no reduccionista

la realidad de las entidades emergentes no puede venir de un reino sobrenatural. Para la física no reduccionista las entidades emergentes son verdaderas. Por ejemplo, desde la física no reduccionista se establece que el conocimiento científico de la naturaleza es exacto y completo, donde los nuevos descubrimientos científicos apuntan a seguir clarificando cómo las cosas trabajan. Así, la física no reduccionista reconoce la necesidad de un substrato físico para la existencia de la emergencia. Dicho substrato físico es fundamental, porque sugiere que hay algo más en la entidad emergente, que simplemente sus componentes físicos de nivel inferior. La instanciación múltiple del substrato físico refuerza este punto. Por ejemplo, en la relación mente-cuerpo aunque cada cerebro individual es diferente diversos cerebros pueden tener las mismas experiencias y pensamientos. Más genéricamente, desde la óptica no reduccionista se verían a las entidades emergentes como patrones. Por ejemplo, el físico no reduccionista vería que la mente se da en el cerebro, y lo relevante sobre el cerebro es su patrón de neuronas y conexiones neuronales, así como sus conexiones con el resto del cuerpo. Según la física no reduccionista las entidades de alto orden, emergentes, no son solamente verdaderas; son causas que necesitan ser consideradas al describir el mundo físico. Los físicos no reduccionistas señalan la importancia de las condiciones de límite, la influencia del conjunto en sus partes, y la importancia explicativa de las entidades de orden superior y sus leyes. Hay muchas áreas en donde esta clase de emergencia aplica. Las computadoras pueden, de hecho, ser los mejores ejemplos de no reductibles formas de emergencia. Al analizar cómo las computadoras funcionan, podríamos tener conocimientos completos de su funcionamiento a nivel inferior y, conectar los funcionamientos del nivel inferior con las estructuras que emergen en el alto nivel. Los programas informáticos, así como los resultados de sus ejecuciones, serían esas entidades emergentes. Para una computadora, la causalidad de arriba hacia abajo es comprensible.

- *Emergencia radical*: la emergencia radical rechaza la premisa central de la física no reduccionista, sobre que nuestro conocimiento del mundo físico es esencialmente completo, y que ningún nuevo descubrimiento afectará nuestra comprensión del mundo dramáticamente. Para ellos, nuestro conocimiento del mundo físico es incompleto, y debemos ser cuidadosos al reducir los fenómenos a un nivel superior, complejo, mal entendido. Ellos señalan las faltas y el vacío

explicativo que resulta cuando intentamos explicar sistemas complejos, simplemente en términos de sus más bajos componentes. Los emergentistas radicales se diferencian de los físicos no reduccionistas en su aproximación epistemológica y ontológica a la emergencia. Primero, expresan que nuestro conocimiento del mundo físico es incompleto. Lo cual es cierto, aun no tenemos conocimiento completo de los niveles inferiores (por ejemplo, qué está más allá de las neuronas), y por eso, explicar desde esos bajos niveles es insostenible (por ejemplo, para ellos cómo el sentido humano funciona, es prematuro explicarlo desde lo que actualmente se entiende de las neuronas; un físico no reduccionista lo intentaría). La emergencia radical no está negando que las neuronas son necesarias para la aparición del sentido humano, está afirmando que, en este caso, nuestra comprensión actual de las neuronas es deficiente, de una manera tan importante que nos impide entender el sentido humano. De hecho, la emergencia radical sostiene no sólo que somos ignorantes del detalle base físico (emergencia epistemológica), sino que se abre a la emergencia ontológica. Pero la emergencia radical es independiente de si las ciencias proporcionan explicaciones o no a los fenómenos físicos. Aunque nuestro conocimiento del cerebro humano está lejos de ser completo, se tienen detalles para explicar la emergencia del sentido. En la ausencia de un algoritmo detallado de teorías científicas para determinar todo, el juicio individual, con sus caprichos subjetivos, deben ser empleados. Esto no significa que la emergencia es una actividad irracional, sólo se requiere de una franca revisión, y un conocimiento de cuándo los acercamientos reduccionistas son prometedores y cuándo no lo son. La emergencia radical nos recuerda que falta mucho por conocer, y que las complejidades de la experiencia necesitan ser explicadas con sentido.

Otra clasificación de la emergencia basada en la causalidad fue dada en [67]. Esa clasificación parte del análisis de las relaciones de causalidad. Las relaciones causales son un aspecto natural para todas las formas de emergencia, debido a que la emergencia es un efecto, o un evento, donde quizás la causa no es inmediatamente visible o aparente. Así, un aspecto interesante de un proceso emergente tiene que ver con la búsqueda de una causa oculta de un efecto aparente. Según [67], los diferentes tipos de emergencia pueden ser clasificados en cuatro tipos o clases (ver tabla 1.1, Los elementos comunes a todos los tipos es que la emergencia de algo

siempre es posible en un límite claro del sistema, y por lo general, sucede como un salto a un nuevo nivel):

Nombre	Roles	Frecuencia	Predictibilidad	Sistema
Nominal o intencional	Fija	Abundante	previsible	Cerrado, con entidades pasivas
Débil	Flexible	Frecuente	Previsible (en principio)	Abierto, con entidades activas
Múltiple	Flotante	Común-inusual	No previsible (caótico)	Abierto, con múltiples niveles
Fuerte	Nuevos mundos de roles	Raro	No previsible (en principio)	Nuevo o muchos sistemas

Tabla 1.1. Clasificación basada en causalidad según [67]

Tipo I. Emergencia simple sin causalidad de arriba hacia abajo: describe la emergencia simple sin retroalimentación top-down (de arriba hacia abajo), como efecto de la auto-organización. Este tipo corresponde a funciones fijas predecible En este caso pueden haber dos tipos de emergencia:

- Emergencia simple intencional/nominal: Es típico de la emergencia en los sistemas complejos en los que las funciones nuevas son asignadas a grupos de agentes. Un ejemplo es el caso de las funciones de “exploración” o “transporte” en las colonias de hormigas. Así, en un sistema complejo, todos los componentes tienen cierto papel bien definido y se rigen por reglas bien entendidas. Como el comportamiento de cada parte es independiente de las otras partes, el comportamiento es determinista y predecible. En estos sistemas se da un proceso de auto-organización, entendida como cambios en el sistema, hasta que la función que

se desprende del ensamblaje de componentes coincida exactamente con el propósito.

- Emergencia simple no intencional: Esta emergencia aparece en un sistema con mucha imprecisión, desordenado y elementos iguales. En ese caso, las cantidades y propiedades estadísticas de una serie de partículas idénticas pueden ser consideradas como propiedades emergentes si dependen de una relación de las partículas entre sí, es decir, si las propiedades no tienen sentido para una sola partícula. Propiedades termodinámicas como presión, volumen, temperatura son ejemplo de propiedades físicas emergentes que tienen esa característica. Por ejemplo, una cantidad como la presión no se puede aplicar a una sola partícula.

Tipo II. Emergencia débil con causalidad de arriba hacia abajo: Esta emergencia puede ser estable e inestable, y corresponde a funciones flexibles que se pueden predecir, aunque no en todos sus detalles. Contiene los fenómenos clásicos de emergencia débil con retroalimentación de arriba hacia abajo y auto-organización. Así, la principal característica de la tipo II es que incorpora relaciones de causalidad de arriba hacia abajo, del nivel macroscópico al nivel microscópico, las cuales pueden ser positivas o negativas. En el nivel microscópico muchos agentes físicos interactúan a nivel local con los demás. Las interacciones resultan en un nuevo modelo, por lo general imprevisto, que aparece en un nivel superior. En el nivel macroscópico del sistema nos damos cuenta de patrones, estructuras o propiedades impredecibles (fenómenos emergentes), que no están directamente especificadas en las leyes de interacción, que a su vez influyen en el nivel de interacciones de las entidades a través de un proceso de retroalimentación. Por ejemplo, un cardumen de peces tiene propiedades emergentes que influyen en los movimientos de cada participante. Hay dos formas básicas de interacción en la emergencia débil [67]:

- La interacción directa: Los agentes, o entidades, interactúan directamente entre sí. Las interacciones conducen a la formación de grupos, que a su vez influyen en el comportamiento de los agentes o entidades. La retroalimentación sólo es posible si los agentes pueden distinguir entre diferentes escalas. Ejemplos de ello son los enjambres de abejas, las manadas de mamíferos, los bancos de peces.
- La interacción indirecta: Los agentes, o entidades, cambian el estado del sistema y del medio ambiente a través de su comportamiento

individual. Los cambios en el medio ambiente influyen, a su vez, en el comportamiento de los agentes o entidades. La interacción indirecta es posible si los agentes pueden manipular el ambiente, como en el caso de las feromonas que dejan en el ambiente, o si actúan casi de forma síncrona para que el efecto de las acciones individuales se multipliquen, ejemplos de ello son las colonias de hormigas transportando un objeto o las pilas de las termitas.

Adicional a las formas directas e indirectas de las interacciones, hay dos diferentes tipos de emergencia débil, de acuerdo a como se dé la causalidad:

- Emergencia débil estable: Por lo general, la retroalimentación es negativa (amortiguan, conduciendo a formas estables de emergencia débil), e impone un límite a las acciones de los agentes. Es la forma clásica de emergencia que incluye influencias de abajo hacia arriba y la retroalimentación de arriba hacia abajo, desde el grupo o el medio ambiente. Se relaciona con la inteligencia de enjambres, formación de grupos, congregación de feromonas, etc. Ejemplos de ello son los comportamientos de forrajeo de las colonias de hormigas, de las bandadas de peces y aves, las formas de auto-organización en Internet (Wikipedia, proyectos de código abierto como Linux y Mozilla), etc. En las formas estables de emergencia débil hay un equilibrio entre la exploración, la diversidad y el azar (a través de influencias de abajo hacia arriba) por una parte, y la explotación y el orden (a través de restricciones de arriba hacia abajo) por otra parte. La diversidad de la “exploración” surge de la “creativa” de abajo hacia arriba, debido a la autonomía de los componentes. La ‘explotación’ surge de los ‘límites’ impuestos de arriba hacia abajo, a través de los procesos de retroalimentación que imponen restricciones en los componentes o agentes (presión o fuerzas que guían el comportamiento o función de un agente). Las formas complejas de organización que se observan en los sistemas con propiedades emergentes, se deben a un equilibrio entre la diversidad y la unidad, entre la exploración y la explotación, entre la causalidad “creativa” de abajo hacia arriba y “restrictiva” de arriba hacia abajo. Aves en una manada vuelan en diferentes direcciones para evitar colisiones, pero se mantienen al mismo tiempo juntas, tratan de igualar la velocidad de las vecinas y dirigirse al centro de la manada. La Web refleja la gran diversidad de la población mundial. Esta diversidad es equilibrada por las normas y estándares de la W3C y otros consor-

cios (HTML, HTTP, etc.). Esta forma de auto-organización puede ser muy poderosa, ejemplos son los éxitos de Linux, Mozilla, Wikipedia, y un sinnúmero de otros proyectos de colaboración abierta y libre. Se basan en la diversidad de sus participantes y de las colaboraciones, no funcionaría si se creara un ejército de clones como participantes. Sin embargo, hay una fuerza unificadora que conserva la unidad: cada participante obedece las mismas reglas.

- Emergencia débil inestable: La adicción a las drogas, o la inflación económica, son ejemplos de retroalimentación positiva que generan inestabilidades, amplifican resultados, formando estados inestables. Veamos el caso de las drogas: en la adicción a las drogas, las dosis altas activan el sistema cerebral de recompensa que induce al consumo repetido, el consumo repetido conduce a habituarse, que modifica el sistema de recompensa y da lugar a dosis aún mayores. Todo esto va llevando a un individuo a estados inestables de aislamiento, incoherencia, etc. Otro ejemplo de retroalimentación positiva son las formaciones de agrupaciones económicas y sociales: regiones de alta tecnología, barrios marginales, etc. Pobres condiciones de vida en un distrito (aumento de la violencia, el uso de armas y drogas, etc.), conducen a la migración de sectores sociales que pueden empeorar las condiciones de vida en el sector. Esto da lugar a la formación de zonas pobres. Ahora bien, pequeñas fluctuaciones pueden llevar a espectaculares efectos: burbujas financieras, modas, etc.

Tipo III. Emergencia con múltiples retroalimentaciones: Emergencias con muchas causalidades, con gran capacidad de adaptación. Ella corresponde a la emergencia de nuevos roles y a la desaparición de antiguos, no predecibles en absoluto. En esta emergencia el aprendizaje y la adaptación son importantes (según J. Holland: “Cualquier estudio serio de la emergencia debe considerar el aprendizaje” [91]). Esta emergencia aparece en sistemas muy complejos con muchos lazos de retroalimentación, sistemas con agentes inteligentes.

En síntesis, en esta emergencia se dan procesos de causalidades negativas y positivas. La activación (retroalimentación positiva), junto a la inhibición (causalidad negativa), permiten la formación de patrones. Esta idea no es nueva, en el contexto de las reacciones químicas A. Turing publicó una idea similar en 1952. Hoy en día, son conocidos como sistemas activador-inhibidor, y pertenecen a los sistemas reacción-difusión. En los

sistemas reacción-difusión un activador cataliza su propia producción, pero también activa un inhibidor, que se difunde rápidamente. En momentos cortos la respuesta positiva se impone, pero para largos lapsos la respuesta negativa se impone. Estos sistemas son responsables de muchos tipos de formación de patrones biológicos, por ejemplo las rayas y manchas en los patrones de pelaje de los animales (manchas en los leopardos, pigmentos en el jaguar, rayas en las cebras, etc.); a través de la activación e inhibición de células que producen el pigmento de color (los melanocitos²). Esto se puede simular con autómatas celulares, mediante la regla: “sumar los número de vecinos inmediatos que son de color blanco. Si la suma es mayor que un valor dado la celda se vuelve blanca, de lo contrario se convierte en negra”.

Con base a lo antes expuesto, en esta emergencia subyace una capacidad adaptativa, veamos por qué. Hay muchas razones para la emergencia súbita. Si algo surge de repente o rápido, es porque ha sido bloqueado por un obstáculo o barrera (por ejemplo, una frontera del sistema). Se caracteriza por cambios bruscos y saltos en complejidad, llamado muchas veces catástrofe. En general, las catástrofes actúan como catalizadores, para acelerar la transición a formas superiores de complejidad que aceleran la adaptación. Se asocia con la aparición de funciones completamente nuevas, y el cambio dramático de las ya existentes. Ejemplo de este tipo de emergencia son las revoluciones científicas (Darwin, Copérnico, etc.) y mentales. En las “revoluciones mentales”, por lo general, hay barreras mentales para nuevas acciones o ideas, censuras que inhiben acciones. Así, cada barrera mental superada es como una pequeña catástrofe cognitiva que al traspasarla da lugar a una nueva visión y a una avalancha de la actividad creativa. El mismo argumento se aplica a las revoluciones científicas: una barrera, a menudo causada por las limitaciones de la teoría de ese momento, impide el descubrimiento de una nueva teoría, hasta que el obstáculo es superado con un nuevo paradigma que da lugar a una avalancha de publicaciones y actividades.

Tipo IV. Emergencia fuerte: Emergencia con ninguna causalidad, sólo con relaciones de retroalimentación. Esta emergencia no se puede predecir, es un proceso creativo, contingente e imprevisible, que corresponde a

² Célula que se encarga de reproducir melanina, pigmento de la piel, ojos y pelo cuya principal función es la de bloquear los rayos ultravioleta solares (tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Melanocito>)

la apertura a nuevas funciones. Se caracteriza por la aparición de varios niveles, y el número de estados posibles del sistema emergente es astronómico (puede haber una explosión combinatoria). Es la forma de emergencia que es responsable de las estructuras de un mayor nivel de complejidad, que no pueden ser reducidas al efecto directo de las propiedades y leyes de los componentes elementales.

La emergencia fuerte se puede definir, como la aparición de estructuras emergentes en los niveles superiores de una organización, que poseen propiedades nuevas que no pueden reducirse, en principio, al efecto acumulativo de las propiedades y leyes de las partes básicas y elementales de sus componentes. La emergencia fuerte se relaciona con la aparición de un nuevo código, que tiene la tendencia a generar muchas formas diferentes de emergencia débil. Esta definición de la emergencia fuerte no viola las leyes de la física. La vida es una propiedad emergente fuerte de los genes, del código genético y de los aminoácidos, la cultura es una propiedad fuerte emergente del lenguaje y la escritura. Los procesos que se describen con la emergencia fuerte no son mágicos ni anti-científicos, son fenómenos complejos de múltiples escalas. Al igual que otras formas de emergencia, parecieran mágicos si no se entienden los procesos internos (si nunca se ha oído hablar del ADN y de los genes, entonces la vida se ve de hecho como algo mágico). Sin embargo, hay algo de verdad en la idea de que la vida no se puede explicar exclusivamente por procesos físicos. Es cierto que las leyes físicas no pueden describir las formas biológicas. Las leyes de la física de partículas, son irrelevantes para los fenómenos macroscópicos. Las normas microscópicas son irrelevantes, en comparación con los efectos de la organización colectiva de escalas macroscópicas. Esa es la paradoja de la emergencia, que se convierte más claramente visible en el caso de la emergencia fuerte. Las estructuras macroscópicas y patrones, dependen de las partículas microscópicas, y sin embargo, son independientes de ellos. El nivel macroscópico es independiente del nivel microscópico, porque en la emergencia fuerte se habla de un nivel mesoscópico³ o intermedio, que protege y aísla el uno del otro. Por lo tanto, en la emergencia fuerte el nivel macroscópico es irrelevante

³ Se refiere a la escala de longitud en la que se puede discutir razonablemente las propiedades de un material o fenómeno, sin tener que discutir el comportamiento de los átomos individuales. Etimológicamente viene del griego μέσος “en el medio, mitad” y σκοπέω “investigar, observar”, se encuentra entre la escala macroscópica, del mundo que nos rodea y la escala atómica (o microscópica) (http://es.wikipedia.org/wiki/Nivel_mesosc%C3%B3pico).

para el nivel microscópico y viceversa. El nivel macroscópico se mantiene invariante, aun si el microscópico se sustituye por otra cosa, siempre y cuando el nivel mesoscópico o intermedio siga siendo el mismo [67]. La emergencia fuerte es relacionada a menudo con saltos muy grandes en la complejidad, y a las grandes transiciones evolutivas, que pueden ser caracterizadas por la aparición de nuevos replicadores (genes, memes⁴, etc.) y nuevas formas de evolución (biológicas, culturales, etc.). Así, la emergencia fuerte puede ser vista como una transición de un sistema evolutivo (o sistema adaptativo complejo) a otro. Dos formas posibles de transiciones son:

- La evolución biológica usa como sustrato los genes, los replicadores genéticos, el código genético. La evolución biológica es capaz de explorar una amplia gama de posibilidades y combinaciones durante un largo período de tiempo. Debido a la variación constante, a través de la mutación y la recombinación, se comprueban y se abandonan un enorme número de intentos que no funcionan.
- La evolución cultural usa como sustrato los memes, los replicadores meméticos, el idioma. Un idioma surge de muchas combinaciones, no todas son válidas. El gran número de combinaciones a todos los niveles impide cualquier control directo de los fenómenos culturales. Algo importante acotar es que ni nuestras lenguas ni nuestros sistemas de escritura están codificados en nuestros genes.

Esas dos formas posibles de transiciones, son los tipos más importantes de “emergencia fuerte”. La primera es la base del origen de la vida, la segunda es la base del origen de la cultura. Las dos unidades elementales de la vida y la cultura, son la célula y la sociedad, respectivamente. La primera se basa en el código genético y el ADN, la segunda en el lenguaje ordinario y los sistemas de escritura.

⁴ Es en las teorías sobre la difusión cultural, la unidad teórica de información cultural transmisible de un individuo a otro, de una mente a otra, o de una generación a la siguiente (<http://es.wikipedia.org/wiki/Meme>).

Capítulo 2: La Emergencia en la Vida

En este capítulo exploramos cómo la emergencia se vincula a diferentes ámbitos de nuestra realidad. En una época rica en observaciones de comportamientos emergentes, en este capítulo inventariamos algunos de ellos, en diferentes dominios.

2.1 Emergencia y Sociedad

La emergencia en una sociedad aparece en todos los procesos sociales que le dan vida a la misma. En esta sección referenciaremos a algunos de ellos, ilustrando como la emergencia es una característica de los mismos. Así, exploraremos el fenómeno emergente desde la cotidianidad de la sociedad, en las comunicaciones que se dan en ella, en las formas de poder que van apareciendo, en las organizaciones sociales que tienen vida en ella, en las formas económicas que se articulan, etc. Además, nos detendremos en el caso de las organizaciones sociales, para hacer un análisis del papel de las tecnologías en una organización emergente.

Para comenzar a estudiar la emergencia en una sociedad, supongamos el tráfico en una ciudad. Para analizar el tráfico en una ciudad podríamos verlo desde diferentes ángulos, uno de ellos sería como conductor. En ese caso podríamos observar las reacciones de los otros conductores (stress, maniobras, etc.), buscar una explicación psicológica a sus acciones/decisiones, etc. Otro ángulo sería una observación general del tráfico desde, por ejemplo, un helicóptero. En ese caso observaríamos las formas de los caminos que van generando los vehículos según las vías que van tomando, los embotellamientos, etc. A ese fenómeno social, desde esos dos ángulos, se le pueden hacer dos análisis sociales, uno cercano a los hechos y otro que refleje el comportamiento colectivo. Ambos análisis se pueden enriquecer mutuamente, entendiendo que los dos se pueden retroalimentar.

Para N. Luhmann, la dimensión social del comportamiento de los individuos es la comunicación [112, 113, 114]. La comunicación constituye una categoría esencial de un sistema social. La comunicación permite las interacciones entre los individuos, dentro de una lógica de enriquecimiento y

retroalimentación mutua. De esta manera, en los procesos sociales cada individuo toma en cuenta las expectativas de los otros, permitiendo la emergencia de estructuras sociales. Así, según [200] los procesos sociales y las formas de organización social pueden entenderse y analizarse en términos de redes sociales que expresan esas formas de comunicación que permiten la relación entre los individuos. Las relaciones son más que vínculos, y solo tienen sentido en redes sociales. Los trabajos de [112, 113, 114, 115, 200], muestran como las redes han invadido la imaginación sociológica y antropológica. Esos trabajos desarrollaron formas de medir estas interrelaciones con el objetivo de predecir. Asombra la rica variedad de modelos que pueden desarrollarse a partir de una esquelética concepción de las redes. Para ello se ha requerido retornar a la fenomenología de las relaciones, prestando especial atención al modo en el que diferentes contextos institucionales interactúan. En ese sentido, se han esbozado dos enfoques teóricos [200]. El primero consiste en considerar los nodos de las redes como estructuras dinámicas, co-generados por las redes múltiples de las que forman parte. El segundo se refiere a suministrar una perspectiva unificada de las relaciones, no importa el alcance y el tratamiento posterior de las mismas (por ejemplo; para modelar tribus o vecindarios). Estos dos enfoques teóricos, permiten tratar conjuntamente instituciones aparentemente distintas. Por ejemplo, las redes de relaciones, conjuntos de nexos reconocidos entre actores, suministran una base común para el análisis de todas las variedades de organización social. Los axiomas esenciales se refieren a los nexos, es decir a las relaciones mismas. Un nexo social existe en, y solo en, una relación entre actores que se concatenan, es decir, que incluyen otros nexos de esos actores. En resumen, un nexo social presupone una red social y genera otros nexos en esa u otras redes. Este es el axioma fundamental. Naturalmente, un nexo social tiene una considerable intensidad afectiva, pero su característica esencial no es el contenido idiosincrásico ni la etiología⁵ de este nexo. Lo que cuenta es que cada actor esté, y sepa que está obligado a implicarse en otros nexos. Entonces está sujeto, y comprende que lo está, a la presión hegemónica de los demás implicados en la construcción social de esa red⁶.

⁵ Es la ciencia que estudia las causas de las cosas.

⁶ Las instituciones de parentesco fueron aparentemente donde este axioma se estableció inicialmente. Fue también en las relaciones de parentesco donde se vio la evolución a niveles adicionales de actores (el clan o el grupo matrimonial), el cual emerge desde la interminable circulación de intercambios e influencias de redes múltiples de vínculos de parentesco relacionados con el matrimonio y la descendencia.

Un concepto muy vinculado a las redes es el de dominio. Dominios y redes, no son sino abstracciones del ámbito sociocultural de la vida humana. Las redes caracterizan las conexiones y resonancias de las interacciones. Los dominios tienen que ver con los significados e interpretaciones. Estos dos elementos, redes y dominios, se juntan para formar un “tipo de nexos” para la construcción de significados sociales, en marcos ontológicos de la vida de la sociedad. Los dominios extraen de la cultura información del discurso que da la semántica social, las redes expresan la conectividad social. La vida ordinaria requiere, y mucho de ella consiste en, intercambios recurrentes entre dominios de esa red social. La realidad sociocultural se construye desde el intercambio entre dominios (por ejemplo, entre el cotidiano y el ceremonial), con sus propias redes, o instanciaciones de redes específicas subsiguientes.

Veamos algunas características de interés de sociedades de animales [83]. En algunas de ellas algunos de sus miembros aparecen coordinando los movimientos de la sociedad. Cómo surgen esos líderes es poco conocida. Menos aun, las interacciones sociales a través de las cuales los liderazgos se alcanzan. Algunos autores las atribuyen a la morfología, a las capacidades, a las características del temperamento, a la personalidad, o a la audacia de los líderes. En [83] exploran cómo el liderazgo surge mediante el examen de las diferencias individuales en las formas en que los individuos responden entre sí. Ellos elaboran modelos de grupos que siguen reglas simples para mostrar como emerge el liderazgo, pero se han centrado principalmente en grupos homogéneos. Los resultados obtenidos muestran que los individuos audaces y tímidos difieren en su comportamiento social. Pero además, el temperamento de una persona afecta no sólo su propio comportamiento, sino también la de sus compañeros. En general, ellos llegaron a la conclusión que los individuos más audaces eran mejores líderes, mejorando a su vez las características de sus compañeros, aun siendo tímidos. Al mismo tiempo, los individuos muy tímidos son mejores seguidores, potenciando las tendencias de liderazgo de sus compañeros. En resumen, sus resultados muestran que el liderazgo puede emerger de las diferencias temperamentales entre los miembros de un grupo. Los individuos más audaces surgen como líderes, por el contrario, los más tímidos, que son fuertemente influenciados por el comportamiento de sus vecinos, surgen como seguidores. Las diferencias de temperamento se refuerzan por comportamientos sociales: una persona audaz que no responde a los objetivos grupales, no inducirá mayores seguidores, mientras que un individuo

tímido, pero sensible, tiene el efecto contrario, obteniendo características de liderazgo. Vemos así cómo emergen o no nuevos liderazgos. Los modelos emergentes de auto-organización, que surgen de la interacción de individuos que siguen reglas simples de comportamientos sociales como las antes indicadas, han servido para explicar el funcionamiento de grupos sociales, sobre todo cuando los mismos son muy homogéneos (por ejemplo, las sociedades de insectos [83]). Dichos modelos pueden ser mejorados si se tiene en cuenta la heterogeneidad de los individuos del grupo en cuanto a las reglas que siguen y a las formas en que responden. En general, cuando los individuos son capaces de percibir y responder a los temperamentos individuales de sus interlocutores sociales, que son influenciados por el entorno, el comportamiento del grupo es más adaptativo a los cambios del entorno, pudiendo emerger el liderazgo grupal en función de dichos cambios (para para más detalles al respecto, consultar a [134, 135]).

Algo importante de la emergencia en las sociedades es el juego de poderes [85]. Estos juegos a menudo terminan con la emergencia de una “jerarquía”, en el que quien está en la parte superior puede criticar a todo el mundo, mientras que los que están en la parte inferior no pueden ser críticos, y casi nunca se les presta atención a sus sugerencias. Esta competencia constante se ve agravada por el hecho de que la comunicación lingüística es secuencial: en una reunión sólo una persona puede hablar a la vez. Eventualmente, el problema podría resolverse, y producir otra forma de emergencia, mediante la división de las discusiones en pequeños grupos. En lugar de que una sola voz central dirija el procedimiento, las actividades se harían en paralelo, lo que permitiría la aparición de muchos más aspectos a debatir en forma simultánea. Sin embargo, surge un nuevo problema: el de coordinación. Para hacer frente a un problema en conjunto, los diferentes subgrupos deben mantener un estrecho contacto. Esto implica un constante intercambio de información para que los diferentes grupos sepan lo que hacen los demás y puedan utilizar sus resultados. Al permitirse que los participantes se comuniquen horizontalmente, se le hace frente al problema de la ley del más fuerte, tal que todas las contribuciones tienen la oportunidad de considerarse. La comunicación horizontal habla de formas de dialogo entre iguales, que requiere de tecnologías, sociales y duras, que la hagan posible. Esto permite la emergencia de un aspecto vital organizacional, la inteligencia organizacional, como expresión de la inteligencia colectiva. Ejemplos de ellos ya se han vivido en comunidades virtuales en Internet. Son tipos de organizaciones emergentes, que requie-

ren de herramientas de apoyo, al proceso de emergencia de la inteligencia colectiva.

Un elemento fundamental para la inteligencia organizacional, es el método para alcanzar decisiones colectivas y evitar conflictos, como parte de un proceso de concertación y dialogo. Este método debe asumir que todas las opciones son conocidas por todos los individuos, y que es necesario agregar todas las visiones. En el caso más simple, cada individuo tiene un voto, que le da a la opción que este individuo prefiere. Agregando todos los votos se determinan las preferencias relativas a las diversas alternativas, para decidir las acciones a tomar. Esto es similar al funcionamiento de las colonias de hormigas, en donde el rastro de feromona dejado por una hormiga particular se puede ver como el “voto” de la hormiga en la discusión sobre dónde encontrar alimento. En una versión más sofisticada del método de agregación, los individuos pueden distribuir su votación sobre diversas alternativas, en proporción con su preferencia individual. Por ejemplo, un individuo le podría dar a la alternativa A un voto de 0.5, a la B de 0.3, a la C de 0.2, y a la D de 0.0. En ese caso, la función de preferencia colectiva (P_{col}) es simplemente el promedio de las funciones de preferencia individuales (P_i) de los n miembros [85]:

$$P_{col}(l_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i(l_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i^j \quad (2.1)$$

Donde l_j es cada una de las posibles j alternativas.

N. Johnson y otros demostraron que usando esta expresión matemática, basada en el promedio de las funciones de preferencia para una gran cantidad de agentes, la decisión “colectiva” que con ella se obtiene es mejor que la decisión promedio obtenida por un grupo de agentes [97]. Un ejemplo de ella se da en las colonias de hormigas. En general, si la comunidad es suficientemente grande, debido a la ley de los grandes números, podemos esperar que las “fluctuaciones” se anulen (malas y buenas decisiones), al usarse la idea de promediar. Según esto, mecanismos similares al de la ecuación 2.1 o de promedios simples, al aplicarse en la toma de decisiones en grupos grandes de seres humanos, será mejor que la decisión tomada por un individuo al azar.

En otro ámbito social donde la emergencia tiene mucho que decir es en la *geopolítica* [107]. Entre todos los procesos estudiados por la geopolítica, la formación del *sistema de estados modernos*, es el resultado de procesos de retroalimentación entre la economía, la sociedad, la política, entre otros. La evolución de la configuración geopolítica de los estados modernos ha sido un factor determinado por el éxito económico de algunas zonas del mundo. R. Collins propuso un modelo teórico simple, para caracterizar el proceso de expansión y contracción del poder territorial de los Estados [40]. El modelo se basa en tres principios: la expansión de los estados se ve favorecida por el tamaño y la disponibilidad geográfica de los recursos, y por las ventajas geo-posicionales. Por ejemplo, los países con menor número de enemigos y muchos recursos se expanden a expensas de otros países con más enemigos en sus fronteras. Sin embargo, una variedad de problemas pueden surgir como resultado de la sobre-extensión, lo que lleva a la desintegración del Estado. Collins modeló períodos históricos, llegando a interesantes conclusiones. Por ejemplo, antes de la explosión tecnológica derivada de la revolución industrial, los estados aumentaban su poder a través de guerras de conquista. Sin embargo, este proceso implicaba un incremento en los costos de administración y defensa militar. Por lo tanto, la búsqueda del poder por la expansión continua, era limitada por el incremento en tamaño de las tareas administrativas que se derivaban. En las etapas iniciales de la expansión, los incrementos en la riqueza de un estado superaban los costos incrementales de la defensa del nuevo territorio adicional. Sin embargo, cuando se estaba a una distancia crítica del centro del poder, los costos aumentaban más rápidamente que los beneficios. Tras esas conclusiones iniciales, Collins generalizó el modelo para incluir algunos aspectos adicionales, tales como la ubicación del centro de poder de los estados.

Sobre la base de las ideas esbozadas por Collins, en [107] se propuso un modelo que ha tenido éxito en la reproducción de una serie de fenómenos geopolíticos emergentes. Ese modelo ha reproducido el patrón, en el que la mayoría de las capitales del mundo se encuentran en una posición central. También, ha encontrado zonas con un patrón de división política estable, donde los países son de similar tamaño, como es el caso de Europa o de los países andinos. Aunque ese modelo representa una simplificación del proceso histórico real, capta los rasgos esenciales para modelar la emergencia. En esa versión del modelo, durante la evolución, los países exitosos se amplían y los estados derrotados disminuyen o desaparecen.

Basada en las consideraciones anteriores, M. Artzrouni y J. Komlos definen el poder militar de un Estado (P) en función de dos variables [19]: la zona A y el perímetro F de un país. El área A es simplemente el número de nodos de la red que ocupa el país, mientras que el perímetro F es el número de nodos limítrofes de un país (suponiendo un modelado en un plano cuadrículado). Así, $P(A, F)$ se define como

$$P(A, F) = \frac{A}{\delta + \exp(\gamma F + \beta)} \quad (2.2)$$

Donde, δ , β y γ son parámetros positivos.

En [107] proponen una modificación a esa fórmula de poder militar, considerando ahora a las capitales de los países como centros de poder. De esa manera, ahora ellos hacen depender a P de la zona A y de una cantidad (D), que es la distancia promedio entre los puntos de frontera y el centro del poder. Físicamente, esta cantidad está asociada al momento de inercia de la frontera de un país, en relación con su capital:

$$D_k = \sum_{b \in Q_k} [(i_b - i_{c_k})^2 + (j_b - j_{c_k})^2]^\alpha \quad (2.3)$$

Donde Q_k es la frontera del país k, i_b y j_b son las coordenadas del nodo fronterizo b, e i_{c_k} y j_{c_k} son las coordenadas de la capital del país k. De esta manera, ellos redefinen al modelo de poder militar de un Estado (P), como:

$$P(A, D) = \frac{A}{\exp(\gamma D)} \quad (2.4)$$

En general, las *organizaciones sociales* pueden verse como sistemas emergentes [191]. Las características de una organización social, son producto de la constante negociación y creación de consensos, aunque la propia organización, o cualquiera de sus características, puedan presentar ciertas regularidades temporales. Tales regularidades temporales son reconocibles sólo en retrospectiva, porque las organizaciones están siempre en

proceso de rehacerse. Así, basado en esas ideas en [191] se introduce el concepto de *organización emergente*, para referirse a una teoría de la organización social que no asume que las estructuras son estables. Esto tiene una importante connotación en el tema tecnológico, ya que el esfuerzo por crear sistemas tecnológicos de apoyo a la organización estables, es decir con bajo mantenimiento y larga vida, impiden la emergencia en la organización. Trabajar con tecnologías estables complica el proceso adaptativo de una organización. En ese caso, las tecnologías inhiben, en lugar de facilitar, el cambio organizacional. Para que no sea así, una organización emergente debe repensar el hecho tecnológico permanentemente [3, 10]. Por ejemplo, el desarrollo de un sistema de información organizacional debe ser visto como un proyecto que no tiene principio ni fin, la emergencia exige un continuo rediseño. Dentro de una organización con los valores de emergencia, una tecnología que requiera bajo mantenimiento, es síntoma de una tecnología inadaptable. Las tecnologías estables inhiben la adaptación, y una organización emergente necesariamente, debe liberarse de esas restricciones, impuestas por el hecho tecnológico. Tecnologías que no producen sistemas estables están diseñadas para adaptarse a una organización, lo que le permite a su vez a la organización adaptarse al exterior.

Es posible estimular, fomentar y coadyuvar a una organización emergente, para lo cual es necesario entender algunos de los aspectos detrás de la emergencia en una organización. Según [191], existen tres aspectos que caracterizan una organización emergente:

- *La construcción de la realidad compartida:* Las formas, estructuras y actividades de la organización, son el resultado de las complejas y continuas interacciones entre los miembros de la organización. Si los miembros de la organización están de acuerdo en que la misma debe ser horizontal, entonces la organización debe ser así. Eso implica actuar como si así fuera, y modificar sus estructuras internas conforme a esa percepción compartida. Es decir, esa realidad compartida implica la construcción de las formas que la permitan. En una organización emergente, concebir esa realidad compartida es un fenómeno permanentemente, lo que le permite su constante re-construcción.
- *La identidad y auto-referencia organizacional:* Una organización utiliza su propia identidad como principal punto de referencia, cuando se re-hace a sí misma. Esto significa que la realidad socialmente construida

de una organización, sirve de base para la próxima versión de la organización. Cuando una organización se ajusta a los cambios, lo hace con referencia a lo que fue, en una constante auto-reproducción. Es decir, se reproduce la organización con referencia constante a sí misma, a sus prácticas, a sus valores, a sus decisiones, a sus contratos y compromisos del pasado.

- *La capacidad de auto-reproducirse.* La emergencia implica la reproducción organizacional, dejando claro que nada se reproduce de la misma manera. Cuando la organización posee una identidad clara, la reconstrucción de la organización será cercana a la versión original. Esas nuevas versiones de la organización pueden emerger rápidamente, pero con pequeños cambios. Una organización con una identidad difusa emerge lentamente, además, con cambios importantes. La auto-reproducción, desde la auto-referencia, es la base de la autopoiesis [118, 119]. La idea importante aquí, es que la organización está en un estado continuo de ajustes. Si bien estos son a menudo ajustes muy sutiles, el proceso es continuo. Así, la autopoiesis puede ser vista como un proceso mediante el cual, las organizaciones emergen como resultado de auto-ajustes. Para que se dé ese proceso de autopoiesis, se requiere ver las relaciones individuales entre los miembros de la organización como un proceso dialéctico, donde se establece el significado de la organización (es negociado). Este proceso afecta la realidad compartida, convirtiendo los conflictos derivados de las diferentes versiones de la organización, o de la construcción de esa realidad compartida, en una oportunidad que facilita la emergencia en la organización.

Para el desarrollo de herramientas tecnológicas adecuadas a organizaciones emergentes, se debe ir contra las tradicionales metodologías de desarrollo de tecnologías, considerando que [191]:

- *Extensas fases de análisis y diseños son inútiles.* Si la organización es muy estable, los sistemas diseñados de manera satisfactoria pueden operar con mínimos cambios, por largos periodos de tiempo. Por el contrario, las aplicaciones en las organizaciones emergentes tienen una gran volatilidad. Es preferible un análisis corto y menos esfuerzo de diseño, y darle un mayor peso al proceso de mantenimiento que requerirá la tecnología para adaptarse a la emergencia organizacional.
- *Satisfacer al usuario es improbable.* Los sistemas estables definen a los

usuarios como consumidores activos del producto. La participación del usuario, y su aceptación de los nuevos sistemas, es de vital importancia en un sistema estable. Bajo organizaciones emergentes, las necesidades del usuario pueden desarrollarse rápidamente en direcciones que son poco conocidos por los propios usuarios. Dado que las necesidades de los usuarios están en permanente transformación, durante las actividades de determinación de los requisitos, los usuarios se pueden sentir frustrados y atrapados por el sistema que están ayudando a dar forma. Se debe tener claro que los usuarios no pueden ser satisfechos en las organizaciones emergentes, debido a que sus necesidades siempre cambian. El análisis de los sistemas por parte de un usuario, se caracteriza por continuos conflictos y una dialéctica que estimula y posibilita, el cambio tecnológico y la reflexión sobre el hecho tecnológico, desde la organización [10]. La lógica de especificación es un proceso de análisis dialéctico que debe coadyuvar a la emergencia. El objetivo no es la entrega de un producto estable a los usuarios, sino de un servicio que continuamente se debe adaptar.

- *Los requisitos son imaginarios.* Los sistemas estables suponen que un conjunto estable de requisitos abstractos, deben ser descubiertos por los analistas talentosos. En una organización emergente, los requisitos están siempre en movimiento, sin congelarse, siendo negociables. La situación actual de la organización no es más que una parte de la historia de los últimos estados de la organización, y los requisitos futuros son abstracciones de conjeturas de los usuarios sobre los estados de la organización en el futuro. Incluso, si quitáramos la dependencia de las conjeturas del usuario, las direcciones impredecibles de la emergencia, derivadas de la auto-referencia, hacen el análisis de un futuro improbable.
- *Las especificaciones completas y sin ambigüedades son ineficaces.* Un sistema estable presume que la organización esta “quieta” el tiempo suficiente para su especificación, y su futura aplicación. En una organización emergente, eso es sencillamente imposible de suponer. Así, la aparición de ambigüedades, producto de la evolución de una organización, son necesarias para la emergencia, lo cual choca con el esfuerzo y deseo de una especificación exhaustiva.
- *La planificación de nuevos proyectos tecnológicos según moda tecnológica es absurda.* Este objetivo está basado en que cada sistema tecnológico tiene una vida útil limitada. La emergencia acepta que todo sistema debe

evolucionar continuamente, y que todos los sistemas deben adaptarse periódicamente a los cambios del entorno, sin basarse en modas tecnológicas, que tienen como fin imponer hechos tecnológicos. La evolución tecnológica de una organización emergente es producto de un proceso de reflexión, basado en su pasado, sus necesidades actuales organizacionales, entre otras cosas.

Los nuevos objetivos tecnológicos en las organizaciones emergentes deben tener cualidades como (ver figura 2.1) [191]:

- *Son producto de un análisis permanente.* Bajo los supuestos emergentes, un análisis debe ser continuo debido a que la organización está emergiendo, por lo que lo fundamental es que el hecho tecnológico debe cambiar y adaptarse continuamente. Con este fin de adaptación, los requisitos y especificaciones están constantemente renegociándose. Los análisis de las actividades, ya no son realizados en las primeras etapas del ciclo de vida de un sistema. En su lugar, estas actividades son permanentes (no cíclicas: períodos de análisis seguidos por períodos de desarrollo, etc.), en paralelo con las de operación y mantenimiento de los sistemas. Los resultados de este análisis en curso, alimentan las actividades de mantenimiento. Este servicio continuo apoya al resto de los procesos de la organización. Así, el análisis deja de ser un componente de un proyecto de desarrollo tecnológico, y pasa a ser una actividad de la organización que le da insumos a otras actividades, entre ellas a la de “mantenimiento”.
- *Los requisitos en que se basan son dinámicos y negociables.* Debido a que los requisitos nunca pueden ser completamente especificados, la satisfacción del usuario es improbable. De hecho, en una organización emergente donde los usuarios están plenamente satisfechos, es síntoma de una anomalía. Los requisitos se convierten en una solución negociada de las características cambiantes de una organización emergente, con la caracterización de los recursos para mejorarla/modificarla. Un objetivo de un sistema tecnológico en una organización emergente, no es la satisfacción del usuario, sino un “saludable” grado de conflicto entre los usuarios. Para ello, procesos de negociación y de mejora se prescriben. El conflicto, la negociación y la mejora, son actividades de servicio continuo, para apoyar los procesos de una organización emergente.
- *Sus especificaciones pueden ser incompletas y ambiguas, siendo muy útil lo an-*

terior. Si los requisitos se resumen en un imaginario, y las especificaciones sin ambigüedades son ineficaces, los analistas deben llegar a un acuerdo en torno a la ambigüedad. Debido a que los requisitos están en movimiento, las especificaciones deben mantenerse en un estado en que se puedan adaptar fácilmente, para mejorar o modificar el sistema existente. De esta manera, una especificación de un sistema es un pliego de condiciones de composición abierta, que se puede modificar fácilmente. Procesos de mejora y actividades de modificación, se llevan a cabo a pesar de que las especificaciones son incompletas y ambiguas. En el marco de este emergente punto de vista, el pliego de condiciones es consecuencia de la emergencia, lo que conduce a un proceso en que siempre estén los hechos tecnológicos incompletos y útilmente ambiguos. Estas dos características, representan una excelente base para una organización emergente, que imposibilita su encuadramiento tecnológico [7, 10].

- *Deben poderse reconstruir continuamente.* Este supuesto suplanta la idea de obsolescencia tecnológica. El objetivo es el de preservar todas las aplicaciones existentes mejorándolas/modificándolas de forma continua para que coincidan con los requisitos organizacionales que vayan emergiendo. Los sistemas de ferrocarril son una interesante metáfora para ilustrar este enfoque. Hoy en día, los sistemas de ferrocarril en los países donde ese sistema lleva años, como el caso europeo, no se parecen a los de antes. Los vagones, las estaciones, las vías, la señalización, los motores, entre otros, han sido reemplazados con elementos modernos. No ha habido un desarrollo para sustituir todo el sistema ferroviario. En su lugar, el sistema ferroviario ha venido emergiendo como producto de la evolución para satisfacer las necesidades nacionales y los límites de la tecnología del momento, a partir de mejoras continuas: mejoras en los motores, nuevos materiales rodantes, etc. El efecto neto es un sistema de ferrocarril que se ha venido adaptando. Esto se puede aplicar a cualquier hecho tecnológico, continuamente mejorándolo y modificándolo, de tal manera que nunca es totalmente obsoleto e irreparable. Aquí hay dos aspectos interesantes a señalar:
 - El surgimiento de una anomalía. En algunos casos puede ser demasiado caro mantener, y debe ser reemplazado, lo que no es un fracaso implícito, en un entorno emergente. Si el sistema ha sido continuamente reconstruido, la resistencia se ha reducido como parte de su vida útil.

- El segundo se refiere a las implicaciones de un sistema legado⁷. Bajo un enfoque de reconstrucción continua de un sistema tecnológico en una organización emergente, como el sistema ferroviario de una nación, no puede ser visto como un sistema legado.
- *Deben tener la capacidad de adaptación.* Reconociendo que el hecho tecnológico debe someterse a continuas re-construcciones, el enfoque subyacente es que la arquitectura debe ser conducente a la reconstrucción. La facilidad de modificación debe ser profundamente incorporada. Esta modificación fácil, implica que todos los sistemas incluyen explícitamente mecanismos por los cuales el sistema puede adaptarse. Así, el desarrollo de una tecnología es exactamente la misma actividad que el mantenimiento, y es igualmente, un elemento esencial de la operación. La distinción entre ellos desaparece.



Figura 2.1. Transformación de los objetivos tecnológicos en una organización emergente (SI: Sistemas de Información) [191].

⁷ Vienen del término en inglés “legacy system”, que en español también podría decirse sistema heredado: sistema informático (equipos o aplicaciones), que ha quedado anticuado, pero continúa siendo utilizado, ya que no se quiere o no se puede reemplazar o actualizar de forma sencilla (http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_hereditado).

Por lo expuesto antes, las formas/técnicas/herramientas tecnológicas en una organización emergente deben ser abiertas, ágiles, que promuevan la reutilización, etc. Por ejemplo, los *sistemas abiertos* permiten a sus componentes reorganizarse, modificarse e incorporarse fácilmente en futuros desarrollos que los requieran.

Finalmente, el mismo autor señala otros aspectos que se requieren en las dinámicas internas de las organizaciones emergentes, a saber [191]:

- *Canales de comunicación.* tales como el correo electrónico, salas de chat y espacios de trabajo en grupo, los cuales permiten establecer versiones de la identidad de la organización y de la realidad compartida, que entran en conflicto con otras versiones. Este conflicto es importante para la autopoiesis y la emergencia. Estos canales debe extenderse a toda la organización.
- *Grupos emergentes de trabajo.* La organización debe permitir la emergencia de grupos de trabajo. Estos equipos no deben tener historia que limite su adaptación, y eventualmente, eliminar el límite de roles preconcebidos. Otro importante elemento es la eliminación de la idea del “proyecto” como el articulador de las actividades de la organización. Una organización emergente reemplaza la idea de proyectos por “corrientes de reflexión”, que permiten una re-organización continua de las actividades, a partir de los requisitos organizacionales presentes en el momento.
- *Adecuado sistema de adaptación.* Las organizaciones emergentes deben tener formas de ejecutar y valorar la adaptación. El desarrollo de sistemas adaptables es importante, por lo que las necesidades de mantenimiento pasan a convertirse en fundamentales, innovadoras, vinculadas con el objetivo de establecer configuraciones de la organización cambiantes según el entorno. Este conjunto de cambios requiere de actividades de mantenimiento, como la marca de excelencia de una organización emergente, la cual debe ser medible.

En términos generales, en una organización emergente, el hecho tecnológico debe estar bajo constante desarrollo, nunca puede ser completamente especificado y, como las organizaciones para las que se construyen están sujetas a constantes ajustes y adaptaciones, lo tecnológico también lo debe estar. En una organización emergente el hecho tecnológico está enmarcado en un proceso continuo de análisis, de negociación, con una

gran carga de actividades de mantenimiento.

Otro ejemplo interesante de emergencia en una sociedad es cómo se organizan *las ciudades*, cómo en ellas emergen patrones de comportamientos de sus habitantes, zonas urbanísticas con características particulares, entre otras cosas. Esa primera caracterización emergente de las ciudades, la encontramos en un trabajo de Engels, en 1842, llamado “La situación de la clase obrera en Inglaterra” [96]. En ese trabajo Engels describe el caso de Manchester, ciudad que en el siglo XVII se convirtió en uno de los corazones de la revolución industrial. F. Engels describe un modelo de auto-organización de dicha ciudad [96]: “La ciudad está construida de modo que puede vivirse en ella durante años, y pasearse diariamente de un extremo al otro sin encontrarse con un barrio obrero o tener contacto con obreros ... Esto se debe principalmente a que, sea por tácito acuerdo, sea con intención consciente y manifiesta, los barrios habitados por la clase obrera están netamente separados de los de clase media ... igualmente, los comerciantes minoristas ... ocupan las calles principales ... Y sin embargo, Manchester está construida con pocas reglas”. En [96] se afirma de esa constatación de Engels: “Este arreglo desconcertante y atroz, no puede entenderse como resultado de una trama ni de un diseño, es la organización de un estado de cosas demasiado vasto y complejo, para haber sido pensado con anticipación”. Esa combinación de orden y anarquía, es lo que algunos autores han llamado comportamiento social emergente. Mientras Engels caminaba, intentaba encontrar un culpable, una causa, de la perversa organización de la ciudad, aun cuando reconocía que ella no tenía un plan preconcebido. El observaba esa emergencia social, sin poderla reconocer como tal. Algunos aspectos interesantes del comportamiento social emergente de una ciudad son:

- La ciudad produce comportamientos en los humanos que van prefigurándola a ella. En específico, vemos que el comportamiento de los habitantes en zonas de la ciudad difieren, lo cual a su vez retroalimenta a la ciudad.
- El comportamiento emergente se dibuja, se constata, en la ciudad en sí mismo, y no en la percepción empírica del habitante. Así, ese comportamiento tiene una personalidad, una identidad. Por ejemplo, barrios con ciertas cualidades o características propias a ellos.
- Esos comportamientos que emergen, producen un extraño tipo de orden. Por ejemplo: un patrón urbanístico en las calles, a partir de las

acciones no coordinadas de los habitantes locales.

- Esos patrones retroalimentan a la comunidad, por lo que sus ajustes conducen a cambios mayores: Grandes tiendas en los bulevares, Clase obrera relegada a callejones, Los artistas viviendo en zonas específicas de la ciudad, etc.
- La ciudad termina comportándose como una maquina amplificadora de patrones: expresa la conducta repetida de colectivos mayores, recoge información sobre la conducta global, etc.
- Esas estructuras no surgen necesariamente de regulaciones ni planes urbanísticos, sino de miles de individuos y unas pocas reglas simples de interacción. Solo hace falta unos pocos patrones de conducta repetidos, amplificados a formas mayores que perduren durante generaciones: barrios, vecindarios, etc.

Eso fue lo que observó Engels: patrones de conducta humana y de toma de decisiones, que han sido escritos en los edificios, en los barrios, en las calles de la ciudad, patrones que retroalimentaron a los residentes de Manchester, e influenciaron sus decisiones futuras. La historia del urbanismo, es una historia de signos mudos, construidos a partir de las conductas colectivas de grupos, difícilmente detectados por quienes no pertenecen al grupo. Los planificadores urbanos han atacado el problema del urbanismo de los barrios desde un enfoque distinto, un enfoque descendente:

- Demuelen barrios enteros y construyen desoladores edificios dormitorios, rodeados de jardines, etc.
- Mejoran el espacio y la infraestructura, pero es una zona sin identidad que incrementa la tasa de criminalidad y destruye la sensación de pertenencia

El enfoque de *planificación urbana emergente*, para revalorizar los barrios y restaurar su vida ciudadana, consiste en observar sus calles, su funcionamiento, sus dinámicas, sus habitantes, entre otras cosas, y aprender de ellos. Desde esa mirada, el planificador urbano trataría de extraer la identidad del barrio, para establecer un orden, que permita que emerja desde el hacer social del barrio, cualidades como la seguridad en sus calles, los derechos y deberes de sus miembros, etc. Implica una visión de la ciudad, que se corresponde con algo mayor que la suma de sus residentes, más próximo a un organismo vivo, con capacidad de adaptación permanente. Es ver a las ciudades como maquinas de aprender, de reconocer patrones, y desde allí reconstruirse.

En esa mirada de las ciudades, las aceras son importantes, ya que permiten crear órdenes y ofrecen posibilidades de cambiar conductas (retroalimentación negativa), por ser las aceras espacio donde se dan:

- Las interacciones locales (tanto la calidad como la cantidad correcta), que conducen a un orden global.
- Los flujos de información primarios entre los residentes

Vemos que al igual que en las colonias de hormigas, en la ciudad se dan dos escalas, la escala de la vida humana y la escala milenaria de las ciudades. Los macro-desarrollos se dan en la ciudad en su escala milenaria a partir de sus capacidades emergentes: almacenan y recolectan información, y reconocen y responden a patrones.

Para culminar esta parte, otro caso de emergencia en una sociedad que nos interesa nombrar está vinculado a la *economía*. Ya M. Friedman lo sostenía al definir un orden económico como “una emergencia, es la consecuencia no intencional y no querida de las acciones de un gran número de personas movidas por sus intereses” [96]. Como producto de la emergencia, él asocia otros conceptos: la estabilidad, la novedad, la imprevisión, la continuidad, etc. Desde ese concepto, se pueden derivar nociones como “acciones locales”, “órdenes sociales emergentes”, “orden no intencional”, la idea que no hay dirección central (no se controla), la idea de un fenómeno, un comportamiento, un proceso, que surge en un nivel global, como resultado de la interacción de comportamientos locales, muchas veces “egoístas y miopes” (por ejemplo, comportamientos en su propio contexto y en referencia con sus finalidades individuales).

Veamos algunos ejemplos del mundo de la economía. Algunos economistas han venido discutiendo sobre la definición de los precios óptimos de los bienes en una economía, como producto emergente de las interacciones de los agentes que siguen reglas locales de comercio y la ley de oferta y demanda [67]. Este enfoque liberal nunca ha sido aplicado a ninguna economía, por las formas proteccionistas, de subvención, de monopolio, etc. que particularmente, los países desarrollados, imponen a sus productos. Lo que es interesante de ese argumento, es que en un libre juego económico podría emerger un sistema de interacción sin mediadores, distribuidores que se quedan, normalmente, con la mayor tajada, basado en reglas locales, que de-

finirían el precio óptimo de los productos. Si las reglas locales que imperan están vinculadas a formas de solidaridad, solicitud, intercambio, como muchos de nuestros pueblos ancestrales funcionaron, las formas económicas que emergerían serían de colaboración, de compartir, de trueque, etc. Así, vemos que según las reglas locales, las emergencias económicas que se dan pueden ser muy variadas (las que pregonan las teorías liberales o las que tuvieron muchos de nuestros pueblos ancestrales).

Volviendo al tema de los precios óptimos de los bienes, algunos autores lo han explicado como el resultado de una emergencia, basado en el fenómeno de retroalimentación negativa. Dicho precio óptimo se da cuando se llega a situaciones de estabilidad: la alta demanda o la carencia de recursos provocan altos precios, los altos precios a su vez reducen la demanda y aumentan los recursos. El exceso de oferta, o la baja demanda de recursos, traen como consecuencia precios bajos, los precios bajos, a su vez, aumentarán la demanda y reducirán los recursos. Así, los precios, la demanda, etc. van cambiando a través de las relaciones negativas que se van dando entre ellos, hasta que se alcanza un equilibrio parcial. En esa lógica, la ley de oferta y demanda supone que el mercado es perfectamente competitivo (ningún actor tiene el poder suficiente para influir en los precios directamente), y que los agentes actúan racionalmente, lo que no es normalmente así en la realidad. De hecho, desde el momento en que una persona imita a otros deja de actuar racionalmente. En cuanto al proceso de retroalimentación positiva, al mismo se le conoce en economía como “rendimientos crecientes” [186]. Veamos en qué consiste: supongamos un mercado donde hay computadores IBM, sistema operativo Windows, etc.; por el proceso de retroalimentación positiva, dichos productos de esos proveedores pueden llegar a capturar todo el mercado por completo. La retroalimentación positiva puede conllevar a comportamientos económicos que se conservan durante mucho tiempo, como por ejemplo, productos que llegan a tener la totalidad de un mercado (monopolio). La retroalimentación positiva, con sus mecanismos de auto-refuerzo, están vinculados a la imitación: “Necesito un IBM PC con sistema operativo Windows, ya que es el producto que todo el mundo compra/usa”.

En el caso del mercado de valores, se pueden constatar los dos mecanismos de retroalimentación, positivos y negativos, conllevando a un comportamiento oscilante y caótico. Por ejemplo, se puede observar una combinación de retroalimentación positiva a corto plazo (implicando una imitación ciega), y negativa a largo plazo (implicando un examen cuidadoso). Cuando las reservas están aumentando, la creencia de que nuevas subidas son probables, da a los inversores, imitadores y seguidores de tendencias, un incentivo para comprar, lo que elevará el precio aún más (retroalimentación positiva), pero finalmente, el aumento del precio de las acciones y el conocimiento que debe ser finalmente un tope y que después los precios caerán, acaba por disuadir a los compradores (retroalimentación negativa). Una vez que el mercado empieza a caer, algunos inversionistas pueden esperar más y se abstienen de comprar (retroalimentación positiva), pero otros pueden comprar porque lo ven como una oportunidad (retroalimentación negativa). La combinación a corto plazo de retroalimentaciones positivas y a largo plazo de retroalimentaciones negativas, lleva a efectos “burbujas”. Una burbuja es provocada por una fluctuación o irregularidad, que se expande a través de la retroalimentación positiva, y se contrae de nuevo a través de la retroalimentación negativa.

2.2 Emergencia en el Reino Animal

En esta sección se trata, en forma sintetizada, de establecer la relación de la emergencia con el reino animal. Para ello, consideraremos solo un ejemplo inicial, ya que esta sección será bastante ampliada en el capítulo 4, donde presentamos algunos modelos matemáticos de la emergencia que se han constatado en el reino animal (en la búsqueda de alimentos, en la construcción de sus nidos, entre otras situaciones). Comenzaremos por mostrar algunos aspectos interesantes de las colonias de insectos, particularmente el caso de las hormigas [50, 70, 96, 189]:

- Las hormigas, conjuntamente con las termitas, dominan el planeta (representan el 30% de la biomasa del Amazona). Las hormigas tienen cerca de 10 mil especies conocidas, además de un gran impacto ambiental.
- Las hormigas poseen un magro vocabulario basado en feromonas, y habilidades cognitivas mínimas, pero resuelven problemas colectivamente con sutileza e improvisación. La comunicación de las hormigas está compuesta de no más de 20 signos basados casi todos en el feromona.

- Si bien el vocabulario es simple, y no permite estructuras gramaticales complejas, tiene formas: gradientes en el feromona (por ejemplo, intensidad del olor), frecuencia de ciertos semioquímicos⁸. (diferencia entre encontrar 10 a 100 hormigas en una hora), etc. Basándose en esa información (señal de feromona, frecuencia en el tiempo, etc.), las hormigas adecuan su propia conducta.
- Ninguna hormiga está a cargo de la operación, por lo que desarrollan formas de ingeniería y coordinación social. Esas formas codifican el reconocimiento de tareas, la atracción de rastros, alarmas, comportamientos necrofóricos⁹, etc.
- Las hormigas piensan y actúan localmente (prestan atención a sus vecinos), sin esperar ordenes de arriba, pero su acción colectiva produce un comportamiento global.
- Para decidir cómo actuar, las hormigas estiman variables características de la colonia basadas en sus encuentros casuales con otras (esa retroalimentación positiva es la base de la planificación descentralizada). Algunas de las variables estimadas por una hormiga individualmente son: tamaño de la colonia, cantidad de comida almacenada en el hormiguero, presencia de otras colonias.
- Dado que el proceso de toma de decisiones se distribuye entre miles de hormigas, el margen de error es despreciable. Por ejemplo, por cada hormiga que sobreestima el número de hormigas haciendo algo otra la subestima, neutralizándose los efectos.

La conducta global que sobrevive, es una de las características que definen a las colonias de hormigas: hormigas van y vienen¹⁰, y sin embargo, las colonias se vuelven cada vez más maduras, estables y organizadas. Todo ello es producto de las formas de organización, de comportamiento, que van emergiendo en ellas. No somos tan diferentes a los sistemas de insectos: por ejemplo, la relación entre las células del cuerpo son muy parecidas a las de las abejas en el panal.

⁸ Los semioquímicos son sustancias implicadas en la comunicación entre seres vivos. En el caso de los insectos, pueden ser herramientas de gran utilidad en la lucha contra plagas, como alternativas a la aplicación de insecticidas convencionales. Los semioquímicos (feromonas y aleloquímicos) se emplean en el control de plagas tanto para la detección y seguimiento de poblaciones como, de forma directa, en las técnicas de confusión sexual, trampeo masivo y atracción y muerte, entre otras (Tesis Doctoral “Uso de semioquímicos en el control de plagas. Estudios básicos y de aplicación” S. Vacas, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2011)

⁹ Cuando retiran a las hormigas muertas.

¹⁰ Las hormigas no viven más de 12 meses (incluso en algunos casos solo días)

Pasemos a estudiar con más detalle, al fenómeno emergente de la agregación en los animales. La agregación es un fenómeno que se produce, tanto en los más pequeños organismos (bacterias) como en los más grandes (ballenas), y se extiende prácticamente por toda la diversidad del género animal, como parte de las características biológicas fundamentales de las especies [131]. Por ejemplo, la agregación física puede considerarse como parte de un continuo en la integración del grupo. En un extremo de este continuo están los animales territoriales con poca necesidad para participar en la transferencia de información, donde no hay necesidad de la estructuración de un grupo. En el otro extremo están las especies de animales muy integradas, e incluso, a veces, asociadas a miembros de otras especies. Colmenas de abejas, comunidades humanas, son ejemplos de ello. En estos sistemas, las diferentes formas de comunicación (entre personas conocidas, por evolución genética, por intercambio de miembros de grupo), y donde se manifiestan (en la colmena, en la mesa del comedor, etc.), son vitales. Esto da una idea de grupo emergente que se extiende en el espacio. Los grupos tienen “prototipos” (del rebaño, del enjambre, de la manada, de la escuela), y en el efecto de agregación desarrollan otras propiedades emergentes que les permite coordinarse, moverse en grupo, etc. Ahora bien, muchos de estos grupos son muy grandes, por lo que los individuos interactúan con un subgrupo de miembros que representan una fracción del grupo en su conjunto. Esto sugiere que los mecanismos de transferencia de información entre los vecinos son beneficiosos. Tales mecanismos generan un efecto sensorial colectivo que reflejan condiciones globales, como por ejemplo ambientales.

En el fenómeno de agregación en los animales, se dan dos comportamientos emergentes adaptativos en los miembros de los grupos:

1. A corto plazo, modificando sus posiciones con respecto a la de sus vecinos, y
2. A largo plazo, que no necesariamente cambian la posición relativa entre los vecinos inmediatos, pero que contribuyen a las características del grupo.

Estas adaptaciones grupales emergentes se encuentran entre las más fascinantes y más difíciles de evaluar. Esa adaptación permite la emergencia de patrones dinámicos en el grupo, que le confieren ventajas evolutivas en determinadas circunstancias, por ejemplo, evadir depredadores.

Finalmente, un tema central en la agregación es distinguir las “propiedades emergentes” del grupo. La importancia de esta distinción es que las propiedades emergentes están estrechamente vinculadas a la capacidad adaptativa del grupo, derivadas del comportamiento de sus individuos. En ese sentido, las propiedades emergentes son del sistema (del grupo), y no de sus componentes (de los miembros). Por ejemplo, los sistemas de animales en los que los individuos activamente alinean sus direcciones de recorrido a las de sus vecinos, suelen producir grupos coordinados, dicho resultado puede ser considerado una propiedad emergente. Otro ejemplo son los bancos de peces, en el que cada pez estima sus movimientos considerando la orientación, la velocidad y la posición de sus vecinos. De esta manera, el hecho de que no exista colisión, es un resultado directo del cálculo que hace cada pez, no una característica emergente del modelo, pero el movimiento armónico del banco sí lo es.

2.3 Emergencia y Biología

La biología es quizás una de las áreas donde se comprende con más naturalidad la emergencia [21]. La biología puede comprender la emergencia a partir de términos colectivos, y la logra explicar en términos de las funciones de sus partes [39]. Para ello, los biólogos han señalado la necesidad de la caracterización biológica a diferentes niveles: genes, células, órganos, organismos y sociedades. La emergencia ha permitido dar explicaciones a la biología sobre diferentes aspectos de los organismos vivos: sus comportamientos, sus organizaciones, sus orígenes, sus evoluciones. Ella ha permitido desarrollar principios fundamentales como la emergencia de propiedades, la teoría de los niveles, la irreductibilidad emergente, y la causalidad desde abajo [56].

La evolución natural, el proceso de selección natural, están en el corazón de la emergencia de la vida. Ellas nos hablan de la capacidad adaptativa de un colectivo, de los organismos. La evolución natural define tres aspectos esenciales para la emergencia [56]: la interacción entre sus componentes (un fenómeno físico colectivo), un mecanismo de observación y detección capaz de la integración espacio-temporal, y un mecanismo capaz de actuar a partir de la información detectada (proceso de selección natural). El organismo emerge como

resultado de todo ello, a partir, entre otras cosas, de la formidable división de trabajo de nuestros genes. De esta manera, la emergencia aparece como un producto que está en el corazón del proceso adaptativo de las especies (ver figura 2.2) [21].

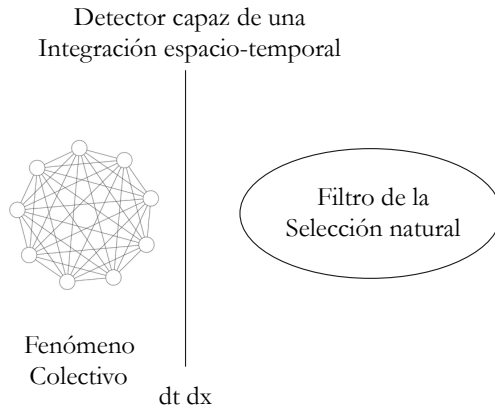


Figura 2.2. La emergencia como producto del proceso adaptativo de las especies (basado en [21])

Lo expuesto en el párrafo anterior, nos establece el centro de estudio de la biología, el organismo. Pero veamos que nos dice la historia de la biología en el siglo XX sobre el papel del organismo y su vínculo con la emergencia. Para ello, nos limitaremos a señalar lo que algunas corrientes del pensamiento en biología, han señalado sobre el papel del organismo [56]. Esa historia nos revela una especie de vacío conceptual entre las nociones sobre el organismo (corriente *organicista*), y sus mecanismos, sin olvidar los increíbles progresos realizados en materia de genética, biología celular, bioquímica, y la biología molecular. Desde la corriente *mecanicista* se podría tener la sensación de que la biología no es una ciencia del organismo. En el mecanicismo, el organismo (como un fenómeno de base, como un problema teórico, como un recurso explicativo) casi desaparece en sus estudios. En las abstracciones de la biología molecular, la complejidad de la organización del organismo (desde los organismos unicelulares a los organismos multicelulares) simplemente se obvia, y el foco de experimentación se dirige hacia el mapeo genético detallado, la síntesis de proteínas, el estudio de la expresión genética, etc. De manera similar, en las abstracciones de la teoría neo-darwinista, la autonomía de

los organismos no se afirma, se da por supuesto en los modelos, como por ejemplo en la selección natural. Así, en el neo-darwinismo ha habido una tendencia a considerar al organismo como un objeto meramente pasivo, sin influencia activa en su entorno. De acuerdo con las *teorías de transformación*, todo cambio evolutivo se concibe como originado desde los mismos elementos que componen una especie, a saber, los organismos. Los organismos individuales fueron, en cierta medida, los orígenes de sus propios cambios, y el cambio es un proceso de despliegue de potencialidades internas. Por el contrario, el principio de cambio en la teoría de Darwin es variacional: los organismos varían, pero no son el nexo causal del cambio evolutivo. El cambio surge de un proceso externo de selección (selección natural), convirtiéndose la selección simplemente en una fuerza externa. La mutación es la fuerza interior que crea la variación, pero esta fuerza es al azar y, por tanto, sin conexiones a las necesidades del organismo y sus funciones. El organismo se convierte en un punto de encuentro pasivo de fuerzas ajenas a él. La ironía es que el organismo se convierte en irrelevante para la biología evolutiva, siendo un medio donde la fuerza selectiva externa se expresa conjuntamente con el productor interior de la variación. Esto puede traer consigo una tendencia a ver el organismo vivo como una cosa pasiva simple.

La creciente insatisfacción con el determinismo genético ortodoxa y neo-darwinismo, abre las puertas a la teoría emergentista. Es un intento de superar las dificultades para representar la complejidad y la diversidad de los procesos de la vida de cualquier organismo vivo. Es una de las bases del *organicismo*, que se ha venido reflejando en diversas disciplinas de la biología contemporánea (por ejemplo, en la genética y la morfología de nuevos y complejos sistemas de adaptación), así como en los nuevos conceptos dentro de la biología teórica (por ejemplo, la expansión del neo-darwinismo para integrar los estudios en auto organización, la teoría de los sistemas autopoieticos, etc.) [98]. El organicismo toma la singularidad y complejidad física del organismo, como un signo de la autonomía de la biología, como una ciencia natural. Esta posición tiene varias raíces históricas, una de ellas es el movimiento emergentista de principios del siglo XX, inspirado en la idea de Kant sobre la noción de la vida [98]: “no podemos renunciar a un principio heurístico de intencionalidad en un organismo... Un producto organizado de la naturaleza, es uno en el que cada parte es recíprocamente fin y medios. En ella nada es en vano, sin propósito, o un mecanismo ciego”. Ahora bien, dentro de la corriente

principal del organicismo la propuesta de Kant se interpreta como más o menos mecanicista, siendo el resultado de las fuerzas de la variación ciega y selección natural, más eventualmente algún proceso adicional vinculado a la auto-organización biológica. La corriente principal del organicismo es aun más emergentista. Por ejemplo, las estructuras y procesos de los diferentes niveles de los sistemas de la vida (los sistemas evolutivos, el sistema nervioso, etc.) son estudiados como propiedades emergentes.

Ahora bien, en el contexto actual es importante tener en cuenta, en primer lugar, el acuerdo entre dos corrientes del pensamiento en biología, el organicismo y el *estructuralismo*, en la comprensión del organismo como un verdadero fenómeno, y como una estructura emergente con especiales propiedades dinámicas. En segundo lugar, también hay que señalar la divergencia relativa a la ontología de la vida orgánica, los organicistas hacen hincapié en la singularidad existencial y limitan la historia de los procesos de la vida a los “programas genéticos”; mientras que los estructuralistas tienden a ver los principios genéricos de formación de patrones en el desarrollo de estructuras físicas como emergentes, no necesariamente específicos a los organismos vivos como tales, sino universalmente existentes en la naturaleza, donde las condiciones del entorno están presentes, no dependientes de la historia. Ambos enfoques, desde diferentes perspectivas, han venido contribuyendo al conocimiento del organismo y sus formas desde una visión emergentista, sin implicar un punto de vista anti-darwinista de la evolución,

Para concluir esta breve reseña del papel ambivalente del concepto de organismo en la biología, señalaremos que desde la filosofía científica, la espontaneidad de un organismo es tanto reduccionista como emergentista [56]: reduccionista en el sentido constitutivo de mirar a la planta, al animal, o cualquiera otro ser, como una simple agregación de moléculas de un material, históricamente organizado por medio de la evolución por selección natural (al ser entendida en términos de operaciones de pura causalidad, tanto a nivel interno (fenotipos que van guiando los genotipos), como externos (producción de un linaje evolutivo)); y emergentista en el sentido de reconocer la complejidad de los organismos (el cuerpo como un sistema de células), con propiedades específicas a ellas (como la auto-reproducción), apareciendo tanto el organismo y sus propiedades como producto de sus niveles inferiores, por ejemplo el de las células, confiriéndole su propia identidad.

Veamos ahora el caso del *cerebro*. Supongamos una de las tantas versiones simplistas del mundo computacional sobre lo que es una neurona, componente de base del cerebro, para poder ser modelada [56]: ella es vista como binaria, activa o no, además ella está conectada a las que están cercanas, y recibe de ellas señales eléctricas moduladas por la intensidad de dichas conexiones. Esas conexiones pueden ser positivas (excitación) o negativas (inhibición). Si lo que recibe una neurona es importante y ella esta activa, entonces continua activa; si estaba pasiva se activa; si por el contrario, lo que recibe no es importante se desactiva, así estuviese activa. Al activarse, ella podrá emitir a sus vecinos señales eléctricas generando cambios en su entorno, y por consiguiente, en todo el cerebro. Esto acontece en paralelo, en todas las neuronas, hasta llegar a estabilizarse el conjunto, en una configuración dada de 0s y 1s. Esas son las únicas reglas de esta versión simplista de un cerebro, que a nivel micro un observador podría constatar. Viendo el grupo de neuronas en su conjunto, se podría observar cómo son capaces de representar una imagen blanca y negra. En ese ejemplo, suponemos que cada neurona sería un pixel (activo sería negro e inactivo sería blanco). Cuando nos ponemos en un nivel macro, observamos al conjunto de neuronas cambiando sus valores en proceso de memorización (aprendizaje) de la imagen mostrada en la figura. El cerebro es así visto, como un medio de almacenamiento y recuperación de imágenes. Las imágenes no son vistas a nivel micro, pero tienen significado semántico a nivel macro. Las neuronas se activan o no según sus reglas, y el efecto de memorización es visto a nivel macro (imágenes). Eso lo podríamos extender a otros ámbitos del hacer de un cerebro: ¿Cómo un cerebro es consciente? ¿Cómo genera la capacidad de pensar? fenómenos emergentes enigmáticos.

Dadas las propiedades electroquímicas dinámicas de las neuronas, y sus interconexiones (sinapsis), podemos fácilmente comprender los regímenes que utilizan las neuronas para definir su comportamiento biológico útil. La interpretación biológica del modelo neuronal biológico, nos demuestra que las neuronas son capaces de generar un tren de potenciales de acción (pulsos de actividad electroquímica), cuando el potencial medio en su membrana se mantiene por encima de su valor normal de reposo. Esa es la información biológica enviada a otras neuronas. Ahora bien, lo que nos interesa estudiar es el comportamiento emergente colectivo del cerebro. Un estudio de los efectos colectivos emergentes en el cerebro, necesariamente deben centrarse en las relaciones entre las neuronas (ver

figura 2.4). Las neuronas, cuyo funcionamiento es predominantemente lineal, se limitan a proporcionar a otras neuronas impulsos eléctricos, por un medio no lineal. El cerebro tiene puntos estables, que son estados donde las neuronas se estabilizan en ciertos valores de activación. Los cambios de estado continúan hasta que un estado estable es alcanzado. Esos estados estables representan los recuerdos que van quedando en el cerebro. Este fenómeno es aparentemente dominado por atractores, que son los recuerdos nominalmente almacenados. El proceso es no determinista, ya que nuevos recuerdos pueden ser continuamente añadidos. La adición de recuerdos lleva a sobrecargas en la capacidad del cerebro y hace que previos estados de la memoria sean irrecuperables (disposición del cerebro para olvidar viejos recuerdos). Así, la saturación es causa de olvido, y sólo los últimos estados de la memoria se mantienen. Recuerdos de un pasado lejano ya no son estables, y recuerdos muy cercanos unos de otros se confunden y tienden a combinarse.

Como hemos visto, cada neurona tiene propiedades elementales y el cerebro tiene una estructura simple. Sin embargo, propiedades colectivas surgen espontáneamente [92]. Algunas propiedades colectivas emergentes del cerebro son su capacidad para la generalización, el reconocimiento, la categorización, la corrección de errores, y la retención de secuencias de tiempo [5]. Esas propiedades emergentes cerebrales, son generadas por la capacidad colectiva de grandes colecciones de neuronas para realizar tareas complejas como las mencionadas anteriormente (generalizar, etc.), a partir de sus interacciones simples. Por ejemplo, los recuerdos son entidades estables que emergen y se pueden recuperar correctamente. La capacidad de generalización del cerebro emerge a través del manejo de las ambigüedades resueltas, sobre una base estadística cerebral.

En general, la emergencia en la biología considera los siguientes supuestos [56]:

- Todo lo que existe en el mundo espacio-temporal son partículas elementales reconocidas por la física, así como sus agregados e interacciones.
- La evolución es un proceso de cambio universal, que es producto de una novedad cualitativa en todos los ámbitos de la realidad.
- La emergencia de propiedades equivale a una novedad cualitativa, cuando los agregados de partículas de materias alcanzan un nivel

adecuado de organización, con características propias que no tienen cualquiera de sus partes.

- La realidad puede ser descrita como una estructura de niveles, donde cada nivel está caracterizado por sus propias propiedades emergentes.
- Las propiedades emergentes son irreducibles a la micro estructura desde donde emergen
- Las entidades de nivel superior manifiestan nuevos poderes causales, que afectan a sus constituyentes, de modo que en el nivel inferior algunos eventos tienen lugar, derivado de ello.

Pero en la biología la emergencia de propiedades no puede ser aceptada simplemente, sino que debe ser explicada adecuadamente. Los biólogos R. Levins y R. Lewontin sostienen que debemos examinar de nuevo los conceptos de la *parte* y del *todo*, a fin de comprender que “parte” y que “todo” tienen una relación especial entre sí, y cómo un “todo” concreto adquiere propiedades en virtud de sus “partes” [110]. Así, el “todo” adquiere nuevas propiedades propias a él, que luego se reflejan en cambios en las “partes”, y así sucesivamente. La evolución es consecuencia de esa relación. El aspecto crucial en la comprensión de las propiedades emergentes se encuentra en la explicación de la forma de causalidad todo-partes, un tipo de causalidad en la que el “todo” organiza sus “partes”. La noción de emergencia de propiedades en la biología, debe tener una racional explicación, al menos por cuatro razones:

- Diversas formulaciones de este concepto, han sido imprecisas y no conciliables entre sí,
- Esta noción parece violar la máxima de que, no se puede obtener algo de la nada,
- Existe una supuesta violación del cierre de causalidad física, y
- No siempre es obvio que sea un fenómeno emergente “a los ojos del espectador”, ya que el fenómeno presupone un marco específico de observación y descripción.

En cuanto al primer aspecto, se requiere de una evaluación crítica, de las diversas formulaciones, para determinar sus complementariedades, divergencias, etc. Las siguientes dos razones son más complejas. Nos enfrentamos a un dilema fundamental: si reconocemos que todos los eventos, los estados y las propiedades de mayor nivel se realizan con eventos físicos, estados, y propiedades de menor nivel, ¿Cómo surgen

las cualidades nuevas? Si todos los sistemas complejos están constituidos por componentes físicos y las cualidades no están en los componentes como tal (son realmente nuevas), ¿De dónde vienen? ¿Han aparecido de la nada? La noción de propiedad emergente genera dudas justificadas. Para evitar esas dudas, la biología simplemente ha considerado la emergencia cómo un fenómeno de alto nivel causado o determinado por una estructura de menor nivel [110]. Finalmente, el último aspecto se puede evitar si se tiene en cuenta que cualquier objeto de investigación científica, desde la emergencia, es una entidad teórica que presupone un marco de observación y descripción. En ese caso, las propiedades emergentes son entendidas como resultados de la dinámica de los sistemas, que sólo pueden ser registradas si hay un mecanismo para observarlos. Por lo tanto, la emergencia es, al mismo tiempo, un fenómeno “en sí” visto a través de los ojos del espectador.

El concepto de emergencia en la biología, ha intentado vincularse al concepto de sobrevenir¹¹. Veamos con más detalle las propiedades emergentes, si pensamos la emergencia desde el término sobrevenir. Desde esa mirada, como las propiedades emergentes son caracterizadas en relación a las propiedades de las partes de los objetos (“propiedades de los objetos que sobrevienen desde las propiedades de sus partes”), la noción de emergencia es redefinida para poder ser usada en ese contexto [56, 128]:

“Propiedades A de los objetos sobrevienen de propiedades B de sus partes, si para cualquier objeto x con una A-propiedad a, entonces hay B-propiedades b, c, d, ... (incluidas las propiedades relacionales), tal que:

- Algunas partes de x tienen varias de las propiedades b, c, d, ... y
- Necesariamente, en conjunto, las partes tienen las propiedades b, c, d, ..., en el objeto del cual son parte”

De esta manera, la emergencia se define simplemente, en términos de las formas que sobrevienen desde las propiedades de las partes de un objeto. Eso nos indica que las propiedades de más alto nivel son determinadas por aspectos fijados en el bajo nivel. Así, las propiedades emergentes muestran una relación aparentemente paradójica, con las propiedades de los componentes de un objeto complejo. Por un lado, se piensa en propiedades emergentes como constituidas por las propiedades de nivel

¹¹ Ese término es entendido desde la acepción: Venir o suceder improvisadamente:

inferior. Por otro lado, una propiedad emergente es una consecuencia necesaria de ciertas propiedades del nivel de base. De esta manera, definen una propiedad emergente de la siguiente forma [128]: P es una propiedad emergente de un objeto O sí y sólo sí:

1. P sobreviene de las propiedades de las partes de O,
2. La propiedad P no la tiene ninguna de las partes de O,
3. P es distinto de cualquiera de las propiedades estructurales de O, y
4. P tiene directa influencia (hacia abajo) en el patrón de comportamiento de las partes de O.

Los dos primeros aspectos son fáciles de entender. Es de esperar, en primer lugar, que los agregados de partículas generen nuevas propiedades (es decir, emergentes) en un cierto nivel de complejidad de la organización, y, en segundo lugar, que dicha propiedad no se encuentre en las partes del sistema, ya que no se podría considerar entonces, como “auténticamente nuevo”. Para entender el tercer punto, ellos definen una propiedad estructural de un objeto O como un patrón configuracional de O, tal que se puede reducir al conjunto de propiedades microfísicas de O. Así, una propiedad estructural es un patrón de configuración, a partir de las propiedades microfísicas de las relaciones de las partes de un objeto. A su vez, definen una propiedad emergente como no-estructural, por lo que no es completamente micro-determinada.

De esta manera, la emergencia de propiedades en varios niveles, puede ser entendida en términos de una serie de procesos de construcción abstracta. Considere un nivel S_1 . Por algún tipo de mecanismo de observación $OBS_1(S_1)$, se pueden obtener o “medir” las propiedades de ese nivel. S_1 puede estar sometido a una familia de interacciones, INT , o, para decirlo de otra manera, a un conjunto específico de situaciones, de las que un nuevo nivel S_2 aparece, $S_2 = R(S_1, OBS_1(S_1), INT)$, donde R representa el resultado del proceso de construcción. Las propiedades de S_2 se pueden obtener por medio de otro mecanismo de observación OBS_2 , que también observa a S_1 . P se define como una propiedad emergente de S_2 , sí y sólo sí, P pertenece a $OBS_2(S_2)$ y no pertenece al conjunto $OBS_2(S_1)$ (ver figura 2.3). Una propiedad emergente, por lo tanto, se redefine de la siguiente manera [56]: Una propiedad P es una propiedad emergente de un objeto O, sí y solo sí,

1. P sobreviene de las propiedades y relaciones de las partes de O,
2. P no se observa en cualquiera de las partes de O, es decir, pertenece al conjunto $OBS_2(S_2)$ pero no al conjunto $OBS_2(S_1)$, y
3. P tiene una influencia causal funcional sobre sus partes, limitando sus relaciones en el espacio-tiempo, para explicar el patrón generado por P.

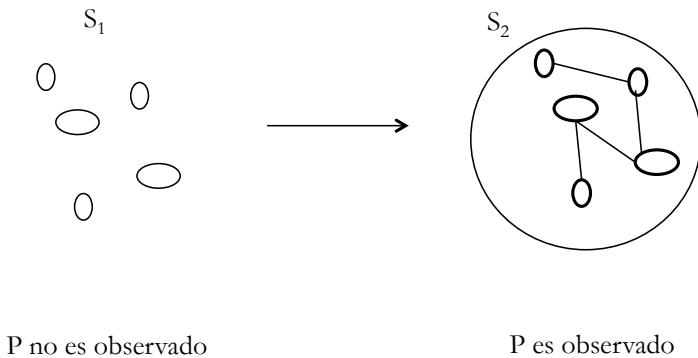


Figura 2.3. La emergencia de propiedades, entendida como un proceso de construcción abstracta

Esa influencia causal sobre el patrón del micro-nivel, no es reducible a las propiedades de donde sobreviene. Según [57], es esa influencia causal la que explica por qué una propiedad emergente no es una propiedad estructural.

Otro aspecto que constatamos en los sistemas biológicos, es que funcionan sin la guía de un controlador externo, o incluso interno [160]. En su lugar, encontramos a menudo que los sistemas biológicos funcionan con *mecanismos de control descentralizado*, en el que numerosas moléculas de una célula, las células de un organismo, o los organismos de un grupo, ajustan sus actividades por sí mismo, sobre la base de la información limitada de una zona. Un árbol de manzana, por ejemplo, “sabiamente” asigna sus recursos entre el tronco, sus raíces, sus hojas, sus frutos, etc. sin un gestor central de sus células. Gran parte del desafío en la comprensión del funcionamiento interno de los sistemas vivos, pasa por entender en qué consisten sus mecanismos de control descentralizado, lo cual es más difícil de comprender para la mente humana que el caso de control centralizado. Para ello es necesario apoyarse en el paradigma de la *auto-orga-*

nización y su vinculación con la emergencia [131]. En el capítulo siguiente abordaremos ello, aquí veremos solamente la relación de la auto-organización con la biología.

Un sistema biológico, normalmente está compuesto por un gran número de subunidades que se auto-organizan (esas subunidades no tienen las habilidades computacionales ni comunicacionales necesarias para la ejecución de un control centralizado). Un control centralizado de cualquier sistema implica necesariamente un muy bien informado y muy inteligente supervisor (órgano central de toma de decisiones), y requiere, además:

- Que una enorme cantidad de información- generalmente dispersa entre todas las subunidades del sistema- sean comunicadas a un órgano central de toma de decisiones (una sub-unidad o un grupo de subunidades),
- Que ese órgano integre toda esta información, para decidir un curso de acción, y
- Que a continuación, dé instrucciones a las subunidades del sistema.

Cuando miramos a través de la gama de entidades en la naturaleza, vemos que algunas han desarrollado mecanismos sofisticados de comunicación y de cómputo necesarios para un cierto grado de control centralizado. Por ejemplo, encontramos un elaborado sistema nervioso periférico que hace posible la transmisión rápida de información en todo el organismo, y un sofisticado sistema nervioso central que procesa la información sensorial y decide la mayor parte de las actividades motoras del organismo. También, nosotros los humanos, hemos desarrollado sofisticados medios de comunicación y tecnologías computacionales que hacen posible que ciertos grupos humanos, en particular militares y unidades de producción, funcionen con un alto nivel central de control jerárquico.

Pero así como hay sistemas biológicos que funcionan con algún grado de control centralizado, hay muchos otros que operan con poco o ningún control central. Estos son sistemas auto-organizados. Sus subunidades no han desarrollado amplias redes de comunicación o de cómputo de gran alcance, por lo que no es de extrañar que operen sin una planificación central. Un ejemplo clásico de sistema auto-organizado son las colonias de insecto, no tienen sofisticados sistemas comunicacionales que permitan que la información fluya rápida y eficazmente y, ningún individuo dentro

de una colonia de insectos es capaz del procesamiento de enormes cantidades de información. Pero un buen ejemplo en biología son las formas multicelulares que desarrollan los animales durante su desarrollo, es decir, antes de que se hayan conformado sus redes de comunicación (sistema nervioso periférico) y computador central (sistema nervioso central).

Pero, ¿Por qué hay auto-organización? Dado que algunos sistemas biológicos han evolucionado con control centralizado, es claro, que la auto-organización no es siempre la mejor manera de coordinar las subunidades en un sistema. La ausencia de una autoridad central (molécula o célula) los hace propensos a oponerse para responder a diferentes condiciones locales, y no a la global del sistema en su conjunto. También, cuando no hay supervisión, en un sistema pueden haber redundancias innecesarias. Por otra parte, la ausencia de un sistema centralizado puede limitar su capacidad de encontrar la solución óptima a nivel global. En resumen, los sistemas con control descentralizado pueden faltar “de una visión general”. Pero a pesar de los problemas potenciales del control descentralizado (auto-organización), muchos sistemas biológicos se basan en él. Una razón de peso para el control descentralizado es que es más adaptable que el control centralizado. Además, se requiere de altos costos para tener los sofisticados mecanismos de comunicación y de cómputo que subyacen en el control centralizado (sólo considere el alto costo metabólico de mantener el sistema nervioso de un organismo). Los altos costos deben ser compensados por las altas prestaciones. No es difícil imaginar situaciones donde se encuentran prestaciones realmente bajas para tener un control centralizado. Una de ellas es cuando un sistema biológico es altamente susceptible a la pérdida de subunidades debido a la depredación o enfermedad. En un sistema con control centralizado la pérdida del gerente central puede resultar en un fracaso catastrófico de todo el sistema. En contraste, los sistemas con control descentralizado son generalmente sólidos a la pérdida de subunidades.

Por lo dicho hasta ahora, los sistemas biológicos cuyas subunidades carecen de habilidades de comunicación, o sofisticados mecanismos computacionales (cognitivo), o ambos, deben funcionar con control descentralizado. Es bueno subrayar, sin embargo, que las subunidades de un sistema auto-organizado no necesariamente son de baja capacidad cognitiva. Las subunidades pueden poseer las capacidades cogniti-

vas altas, pero bajas en relación con lo que se necesita para supervisar efectivamente un sistema grande. Un ser humano, por ejemplo, es un ser inteligente, pero es una subunidad de la economía de una nación, y no posee las capacidades de procesamiento de información que se necesitan para ser un planificador central exitoso de la economía de una nación. También, es posible que las subunidades posean altas capacidades cognitivas, pero en un sistema que carece de una extensa red comunicacional, estas subunidades serían muy inteligentes pero mal informadas. Es importante tener en cuenta la cuestión de las capacidades cognitivas de las subunidades en sistemas descentralizados (auto-organizados), ya que apunta a un defecto fundamental, en muchos estudios en auto-organización: el supuesto de que las subunidades en un sistema auto-organizado deben ser tontas. Es cierto que muchos fenómenos de la auto-organización no requieren de una alta capacidad cognitiva de sus individuos, por ejemplo en las colonias de insectos la construcción de nidos, la búsqueda de alimentos, etc. Pero hay otros fenómenos, como en el caso de los humanos, donde esa alta capacidad cognitiva puede estar presente, por ejemplo, en el comportamiento de los peatones. Estos casos los estudiaremos en el capítulo 4.

2.4. Emergencia e Internet

Quizás la primera pregunta a hacernos sería: ¿La Web es inteligente? Para que haya inteligencia se requiere tanto de conectividad, como de organización (por ejemplo, patrones). La Web interconecta cada vez más gente (interacción) pero requiere de mecanismo para organizarse (estructura). La organización sirve para perseguir fines, por ejemplo, mover los músculos del organismo. La auto-organización y emergencia son mecanismos que revisten de energía creativa y poder para organizarse, y se deben explotar para producir inteligencia. Esos mecanismos posibilitan la aparición de macro-patrones: distribución de sitios web, caminos virtuales de búsqueda de información, etc. La Web con ciertos cambios puede adquirir esas capacidades, para ello requiere que se den relaciones reciprocas que permitan la retroalimentación que posibilite estructuras más organizadas. La Web 2.0 o web social, la Web 3.0 con la posibilidad de interactuar en ambos sentidos, la semántica web que posibilita interpretar semánticamente los contenidos, entre otras cosas, abren esa posibilidad. La explosión de Internet, y recientemente de las redes sociales en ella, ha sido caracterizada en algunos casos, por un modelo democrático de

gestión de comunidades virtuales [152]. Wikipedia¹² es un modelo de ello, donde todos los usuarios tienen igual posibilidad de agregar o modificar el contenido de ese diccionario virtual. Wikipedia ha sido desarrollado usando Wiki¹³, un tipo de software social que permite una forma democrática de escribir en colaboración páginas web con documentos que se entrecruzan entre ellos. Mientras que los diferentes tipos de Wiki permiten variadas formas de colaboración, ellos tienen en común que conciben una estructura social de trabajo comunitario y maneras de ir agregando las contribuciones de todos los usuarios. Así, se dan formas de agregación del conocimiento individual en un conocimiento colectivo que ayuda en procesos de resolución de problemas, toma de decisión, etc. Según las reglas sociales que se van configurando, y las contribuciones y agregaciones que ocurren, van emergiendo patrones.

Un ejemplo de esto es Smartocracy¹⁴, un sistema informático social para la *toma de decisiones colectiva* [152]. El sistema se compone de una red social de confianza que vincula a individuos para dialogar, etc., y una red de decisión que se acopla entre los individuos que deben votar sobre decisiones a tomar. La red de decisión puede usar una variedad de algoritmos de acoplamiento/agregación; que según las decisiones tomadas por los participantes individuales dichos algoritmos las convierten en resultados específicos de decisión grupal. Así, el software agrega los votos individuales y deriva una decisión colectiva final. Cada algoritmo de acoplamiento permite una interpretación diferente de las decisiones individuales, dando una variedad de resultados desde diversos panoramas de toma de decisión. La figura 2.6 proporciona un esquema del proceso de decisión colectiva de Smartocracy [152]. Dado un problema particular, cada individuo en Smartocracy puede proponer una potencial solución. Después, los individuos pueden votar por las soluciones propuestas. Votando por las soluciones, los individuos están proporcionando, explícitamente, su grado de solución al problema. Smartocracy va agregando todos los votos, según alguno de los algoritmos de agregación que él posee, escogido por los usuarios. El resultado del algoritmo de agregación, es considerado la decisión/solución colectiva. Desde allí, si fuese necesario, se escogería la solución final.

¹² Es un proyecto para construir una enciclopedia virtual de contenido libre en diferentes idiomas (<http://es.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Bienvenidos>)

¹³ B. Leuf, W. Cunningham. *The Wiki way: quick collaboration on the Web*. Addison-Wesley, 2001.

¹⁴ http://www.mediaventure.org/docs/Smartocracy-wgf_v11.htm

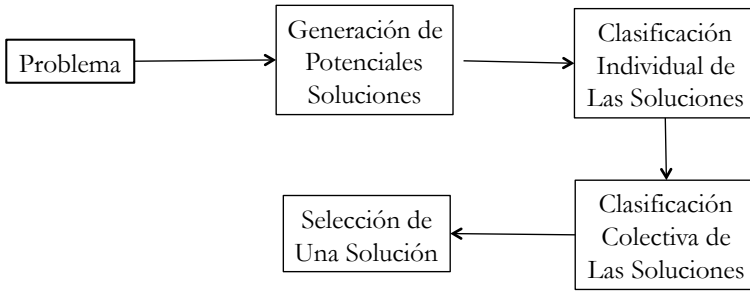


Figura 2.4 Proceso de decisión colectiva en Smartocracy [152].

Este esquema colectivo de decisión, se basa en redes de confianza entre los individuos. En Smartocracy, eso indica que se puede confiar en la decisión de los otros. Para ello, modelan el problema de toma de decisiones usando grafos: $G = \{N, W\}$ donde N es un conjunto de nodos que representan a humanos (H), problemas (P), y soluciones (S), y W es el conjunto de arcos que representan las relaciones semánticas entre los nodos, tal que $N = H \cup P \cup S$, y que $H \cap P \cap S = 0$. Por otro lado, w_{n_i, n_j}^λ significa que hay una relación semántica λ entre los nodos n_i y n_j , donde λ puede ser “voto por”. El modelo de confianza lo representan como una probabilidad condicional: un arco entre $h_i \in H$ y $h_j \in H$, significa que el individuo h_i cree que la solución que toma el individuo h_j es buena, tal que

$$w_{h_i, h_j}^{\text{Confiar}} = P(h_j \text{ es buena} \mid h_i \text{ conoce a } h_j) \quad (2.5)$$

Esta relación indica que h_i confía en h_j , en función de alguna probabilidad, de que la decisión que tome h_j sea una buena decisión, dado que h_i conoce de h_j . Dado que los humanos somos multidimensionales (varias habilidades y creencias), la confianza se puede acotar a dominios específicos; así, la expresión anterior se puede ajustar a

$$w_{h_i, h_j}^{\text{Confiar}} = P(h_j \text{ es buena en el dominio } d_1 \mid h_i \text{ conoce a } h_j \text{ en el dominio } d_1) \quad (2.6)$$

Esa idea ha sido extendida en [152], usando el grafo G , tal que cualquier persona que vote por una solución de un problema, crea un arco dirigido desde sí mismos en H a la solución en S , lo cual puede ser representado semánticamente como:

$$w_{h_i p_i(s_m)}^{\text{voto por}} = P(S_m \text{ es una buena solución para el problema } p_i | h_i \text{ conoce de } p_i) \quad (2.7)$$

Esa fórmula indica que la persona h_i cree, de acuerdo con cierta probabilidad, que s_m es un buen solución del problema p_i . Esto permite crear una red de decisión basada en votos.

En particular, los algoritmos de agregación basados en enjambres de partículas usan esa idea. En un enjambre de partícula, cada partícula es considerada un átomo que influencia el proceso de toma de decisiones. Para determinar una decisión colectiva para un problema en particular, las partículas se expanden por los nodos humanos de G , y desde allí se interconectan de manera estocástica con los nodos de soluciones de los problemas, usando ($w_{h_i p_i(s_m)}^{\text{voto por}}$). Al final del algoritmo de propagación de partículas, la distribución de partículas sobre el conjunto de nodos soluciones, da la solución colectiva al problema, configurando así la red de decisión basada en votos. Basado en esta última idea, en Smartocracy proponen varios algoritmos de agregación [152]:

- *Democracia directa:* parte de la idea de que una persona es un voto. En la democracia directa, la red social basada en confianza no se utiliza para calcular la decisión colectiva. Sí no participa un individuo, él no influye en la solución colectiva. La distribución de partículas sobre los nodos (red de decisión), representa la solución directa colectividad. La figura 2.7 muestra un ejemplo de las trayectorias posibles, de un enjambre en democracia directa. Supongamos que grupos de seres humanos h_1 , h_2 , y h_3 , cada uno proporciona 100 partículas. Después del primer el paso, debido a que la difusión de las partículas es un proceso estocástico, nodo s_1 habrá acumulado aproximadamente 50 partículas, nodo s_2 60 partículas, y nodo s_3 90 partículas. Las partículas de h_2 se destruyen porque él no vota por ninguna solución, dándonos una solución colectiva por democracia directa de $s_1 = 0.25$, $s_2 = 0.30$, y $s_3 = 0.45$.

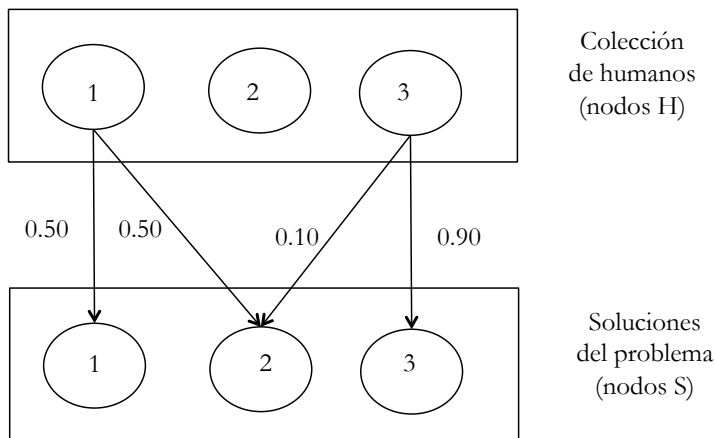


Figura 2.5. Ejemplo de democracia directa (inspirado en [152])

Democracia dinámicamente distribuida: es usada para manejar niveles de participación que fluctúan. En este caso, la idea es asegurar que cada individuo pueda influenciar la decisión colectiva. En este algoritmo, si un individuo no puede votar por una solución en particular ($w_{h_i, s_j}^{\text{voto por}} = 0 \forall s_j$), sus partículas usan la red social, basada en la confianza para moverse a otro nodo humano ($w_{h_i, h_k}^{\text{confiar}} \neq 0$). Si ese otro nodo no ha votado, las partículas buscan un siguiente nodo humano en la red de confianza, iterativamente, hasta conseguir un nodo humano que haya votado ($w_{h_k, s_j}^{\text{voto por}} \neq 0$ para algunos s_j). En la figura 2.8 se muestra ese mecanismo, donde h_2 no vota una solución, y por consiguiente delega en h_1 según la red de confianza (Así, h_1 proveerá 200 partículas). De esta manera, después de dos iteraciones, s_1 tendrá 100 partículas, s_2 110, y s_3 90, dándonos una solución colectiva de $s_1 = 0.33$, $s_2 = 0.36$, y $s_3 = 0.30$. Este modelo es útil en dominios donde es deseable que cada individuo tenga un mismo peso en la decisión colectiva, es decir influya, así sea a través de la confianza que tenga en otros.

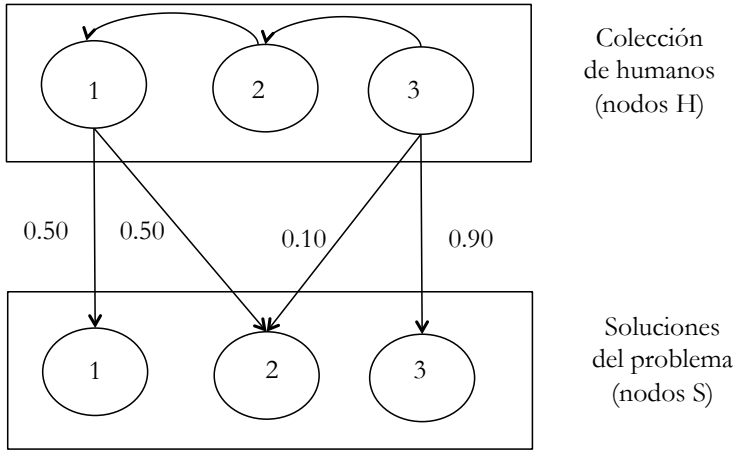


Figura 2.6. Ejemplo de Democracia dinámicamente distribuida (inspirado en [152])

Voto de poder: Está es una extensión del esquema anterior, donde la distribución inicial de partículas es predispuesta por la red de confianza entre los individuos. Es decir, si hay más confianza en un individuo en particular, el individuo recibe inicialmente más partículas. Este algoritmo se utiliza para los dominios donde hay expertos en la solución de un problema, por lo que la igualdad entre los individuos no se desea. Para el voto, se asume que el grado del individuo es una representación de su nivel de experticia en el problema. En la figura 2.9, a h_1 se le suministran 200 partículas, igual a h_2 , y a h_3 100 partículas; el número de partículas de h_1 y h_2 son el doble que las de h_3 , porque hay mayor confianza en ellos. Como en el ejemplo anterior, h_2 le da sus partículas a h_1 , porque h_2 confía en h_1 y h_2 no tiene capacidad de votar por una solución al problema. Así, h_1 tiene 400 partículas para distribuir. Después de dos iteraciones, s_1 tendrá 200 partículas, s_2 210 partículas, y s_3 90 partículas, dándonos una solución colectiva de $s_1 = 0.400$, $s_2 = 0.42$, y $s_3 = 0.18$. Según eso, la solución que emerge es s_2 .

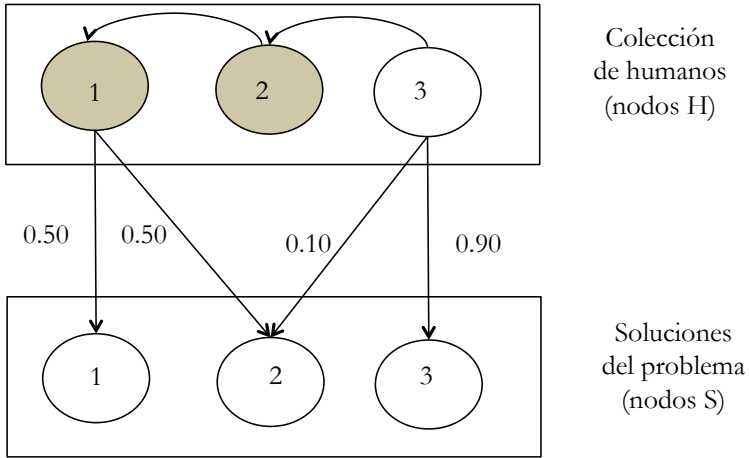


Figura 2.7. Ejemplo de Voto de poder (inspirado en [152])

Smartocracy puede usarse para tomar decisiones sociales dentro de comunidades de cualquier tipo: científicas, judiciales, políticas, económicas (por ejemplo, financiamiento de proyectos), competencias (artísticas, etc.), etc. En general, sistemas sociales de toma de decisión como estos, requieren de sensores capaces de entregar la información relevante para esos procesos de toma de decisión. Las encuestas es una manera para recoger la información relevante para procesos de toma de decisión. Las desventajas de las encuestas son: requieren la participación pública de un sector grande de la población, o puede que se polarice el muestreo (por lo tanto, no representante la opinión colectiva). Ahora bien, explotando las estructuras internas de las redes sociales para que fluya la información, podrían superar esas desventajas.

En general, los algoritmos de agregación de solución, nos muestran como se efectúa la emergencia de un resultado colectivo. El uso de esos sistemas en redes sociales virtuales, abre un potencial democrático en Internet.

Por otro lado, la Web también le proporciona a la emergencia una fuente de *memoria colectiva* [85]. En general, la información almacenada en libros, se puede considerar como una memoria colectiva para la sociedad humana, no obstante ellos son demasiados estáticos y fragmentados. La posibilidad de colocar toda la información escrita en línea de modo

que llegue a ser inmediata y universalmente accesible, es un primer paso hacia la eliminación de estos obstáculos. La Web con su formato hipertexto parece adaptada como un medio para crear una memoria colectiva dinámica [85]. Primero, el espacio de almacenaje proporcionado por millones de computadoras conectadas en red es prácticamente ilimitado. En segundo lugar, la información almacenada se puede alcanzar virtualmente e instantáneamente, para la lectura y para la escritura. Por otra parte, el formato hipertexto permite que diversos documentos se conecten directamente, permitiendo construir una telaraña.

Una dificultad es que la memoria ilimitada hace fácil almacenar todo, y la memorización de demasiada información obstaculiza las ayudas para resolver problemas. Las herramientas más conocidas para filtrar información son los motores de la búsqueda, los cuales devuelven solamente los documentos que contengan las palabras claves proporcionadas por el usuario [85]. Esta forma de búsqueda tiene defectos serios. Primero, con la explosión de documentos, incluso solo usando las palabras claves, dan como resultado de centenares a millares de información, muchas de ellas de mala calidad. En segundo lugar, para seleccionar palabras claves relevantes, el usuario debe tener una idea clara de cuales podría formular.

Un mecanismo más inteligente de relación entre documentos, vinculado a la emergencia, está implícito en la estructura del hipertexto de la telaraña que conforma la Web. El autor de un documento de la telaraña, incluye solamente acoplamientos a otros documentos relevantes y de suficiente calidad, al tema general de la página. Así, la localización de un documento relevante a un tema dado, podría ser suficiente para después ir a información adicional. Los documentos de alta calidad contienen información útil enlazada a ella, mientras que los documentos de baja calidad conseguirán pocos enlaces a ellos. Así, un enlace habla de una preferencia implícita a un documento. Esta preferencia es producida colectivamente, por el grupo de todos los autores de la web. Un primer paso hacia el conocimiento colectivo, consistiría en la extracción de la información implícita de acoplamientos existentes en la web. Recientemente, varios tipos de algoritmos se han desarrollado con este fin, tal que se puede determinar la calidad o la "relevancia" de una página web, en base al número y calidad de las páginas que la enlazan. Esos algoritmos son como que un usuario intentara determinar una "opinión media", basada en las opiniones de la gente que tiene

intereses similares a los suyos (autores de páginas web de interés para él, y los enlaces desde ellas). Estamos hablando de la emergencia de un modo colectivo de recomendación. Como dijimos antes, inspirados en esa idea, se han propuesto *mecanismos de recomendación* (veremos algunos de ellos en los siguientes capítulos) [85, 89, 90]. Un primer ejemplo de dichos mecanismos se basa en lo siguiente [85]:

1. Se registran las preferencias de un gran grupo de personas
2. Usando una métrica de similitud, un subgrupo se selecciona, cuyas preferencias son similares a las preferencias de la persona que busca consejo;
3. Se calcula el promedio de las preferencias para ese subgrupo;
4. El resultado se utiliza para recomendar a la persona, sobre opciones de las cuales aun no ha opinado.

Un ejemplo de métrica de similitud es el coeficiente de correlación entre dos usuarios a y b, el cual se define como:

$$R_{ab} = \frac{\sum_i (\overline{p_i^a} - \overline{p^a})(\overline{p_i^b} - \overline{p^b})}{\sqrt{\sum_i (\overline{p_i^a} - \overline{p^a})^2 (\overline{p_i^b} - \overline{p^b})^2}} \quad (2.8)$$

Donde, $\overline{p_i^a}$ denota la preferencia de a por la opción i, y $\overline{p^a}$ la preferencia media entre todas las opciones,

Si esta métrica es usada para personas con gustos similares, las opciones que son evaluadas altamente por el grupo, seguramente serán apreciadas por el buscador de consejos. El uso típico de estos tipos de sistemas es para la recomendación de CDs de música, películas, libros, etc. El sistema llega a ser solamente útil después de que una “masa crítica” de opiniones se haya recogido. Este principio es aplicado por Amazon (www.amazon.com); para cada libro, ofrece una lista de libros relacionados, que fueron comprados por la misma gente que compró ese libro.

Otra forma para recoger preferencias implícitas en la web, es colocar todos los documentos que han sido consultados por un usuario dado en un sitio Web. Se tendría una lista de todos los documentos disponibles, con preferencia 1 para los que se han consultado y 0 para los otros, con

lo cual se determina una función de preferencia para ese usuario. Usando una métrica de semejanza, se podría determinar vecindades de usuarios con intereses similares [86].

Como hemos visto, desde los documentos consultados por los usuarios con intereses similares, se da una especie de emergencia de inteligencia colectiva en la Web. Para ello, se pueden derivar funciones colectivas de las preferencias que describan asociaciones entre los usuarios. Un ejemplo es determinar la fuerza intrínseca de la relación entre un documento x y un documento y , podemos utilizar la probabilidad condicional que un usuario consulte x dado que también consultó y . Esa probabilidad $P(x|y)$, determina una matriz M_{xy} , que representa las fuerzas de las conexiones entre los documentos:

$$M_{xy} = P(x|y) = \frac{\#(x \& y)}{\#(y)} \quad (2.9)$$

Donde $\#(x)$ representa el número de usuarios que consultaron x , y $\#(x \& y)$ el número de usuarios que consultaron x e y . La fórmula indica que la fuerza del enlace entre x e y es cero si no hay usuarios que consultaron tanto x como y , y llega a su máximo valor de 1 si todos los usuarios que consultaron y también consultaron x .

Podríamos también explotar la idea de listas, como las indicadas antes, explotando el hecho de que la web son documentos, con listas de enlaces a otros documentos. Si dos documentos x e y aparecen en la misma lista, podemos asumir que el autor de esa lista considera estos documentos igualmente relevantes al tema de esa lista, y por lo tanto, similares de cierta manera. Si x e y aparecen juntos en otras listas, podemos asumir más fuerte la relación entre ellos, y por lo tanto, debe ser más fuerte el peso que los conecta [85].

Estas ideas son los primeros pasos hacia la emergencia de una *inteligencia colectiva en la web*. Los procedimientos basados en listas, filtrado, etc. permiten construir una función colectiva de preferencia: el acoplamiento (enlace) entre dos nodos, se refuerza solamente porque estos nodos están simultáneamente presentes en una cierta selección. Esto ha dado origen al área de conocimiento conocida como *minería web*.

Ahora bien, la actividad básica en la web es secuencial: un usuario selecciona un nodo después de otro. Este patrón secuencial puede proveer también información. Para extraer esta información secuencial, podemos inspirarnos en el rastro de las hormigas. Cada vez que una hormiga utiliza un rastro para encontrar el alimento, el rastro es reforzado. Semejantemente, podríamos aumentar el peso de un acoplamiento en la web en una cantidad pequeña, fija, cada vez que un usuario selecciona ese acoplamiento. Los acoplamientos frecuentemente usados conseguirían así, un peso más alto que acoplamientos menos usados. Ahora bien, hay una diferencia básica entre la web y el terreno que las hormigas exploran para encontrar alimento. Una hormiga no tiene que elegir entre los rastros existentes: puede desviarse y comenzar siempre un rastro enteramente nuevo, y por otro lado, un usuario de la web debe siempre elegir solamente entre los acoplamientos que están disponibles en la Web [85, 89, 90]. Esto nos indica que se le debe agregar más “creatividad” al procedimiento anterior que conlleve a la emergencia de la inteligencia colectiva en la red. Ya hay algunos trabajos en ese sentido, como los hechos por la corporación Alexa¹⁵ incorporados en Netscape e Explorer [85, 89, 90]. Particularmente, ellos se basan en el principio de *relevancia/importancia de un documento*: más grande es el número de los acoplamientos a un documento nuevo, desde documentos que se han evaluado ya como relevantes, más relevante se espera que sea ese nuevo documento. Por ejemplo, podríamos expresar el grado de importancia R de un documento d_j como:

$$R(d_j) = K(d_j) \sum_i P(l_{ij}) R(d_i) \quad (2.10)$$

Donde, $K(d_j)$ determina la relación entre un grupo de palabras claves dada por el usuario y el documento d_j (calculada a partir de una lista de palabras claves que da el usuario al iniciar una búsqueda, tal que K será más grande si el documento contiene la mayoría de esas palabras claves, e irrelevante si no contiene ninguna), y $P(l_{ij})$ es el peso del acoplamiento entre los documentos i y j .

Esa expresión nos indica como algunos documentos que contienen algunas de las palabras claves, pero están conectados fuertemente a relevantes documentos, probablemente serán relevantes. Es una especie de difusión

¹⁵ www.alexa.com

de la activación, tal que cada nodo encontrado es activado en función de su relevancia a la consulta, dada por su relación con las palabras claves de la consulta y la fuerza de sus enlaces a documentos relevantes para la consulta. Igualmente, esta activación es difundida a sus documentos enlazados en proporción a la fuerza de su enlace.

En general, la minería web permite hacer búsquedas más inteligentes y eficientes explotando el conocimiento colectivo almacenado en patrones. Ese conocimiento colectivo en la Web es una memoria externa, compartida, a la cual todos los miembros tienen cierto grado de acceso de lectura/grabación. Las limitaciones cognoscitivas hacen imposible para que cualquier individuo controle o supervise completamente el desarrollo del conocimiento colectivo. Por lo tanto, necesitamos de mecanismos de auto-organización. La idea de usar el feromona inspirado en las hormigas, nos ejemplifica un paradigma de auto-organización, para la emergencia de un conocimiento colectivo desde una variedad de contribuciones locales individuales. Algunas de las consideraciones en ese enfoque, para la emergencia de un conocimiento colectivo, son [85]:

- Se debe posibilitar la agregación de todas las contribuciones individuales,
- Se debe posibilitar la regeneración entre contribuciones subsecuentes (amplificar o reforzar contribuciones, eliminar algunas, etc.),
- Se debe realizar una división del trabajo, permitiendo que una diversidad de ideas especializadas sean integradas en ese conocimiento colectivo.

La web como memoria compartida tiene ya la estructura de nodos y arcos, pero carece de la carga sobre las preferencias en los acoplamientos (arcos). En cualquier caso, ese conocimiento colectivo podría encontrar soluciones a problemas, confiando en la sabiduría colectiva de los usuarios, la cual es mucho más inteligente que la de cada uno aislado. Hay muchas variaciones posibles en los métodos de minería web, y hay muchas fuentes de conocimiento colectivo por explotar. Esta área requiere de investigadores que tomen este desafío, y comiencen a experimentar con los diversos algoritmos que permiten generar inteligencia colectiva.

2.5. Emergencia y Filosofía

La emergencia también ha sido objeto de reflexión por los filósofos. Podríamos remontarnos a Aristóteles y Platón para encontrar reflexiones sobre “el todo versus las partes”. Ahora bien, G. Lewes es considerado por muchos autores como el primero que ha abordado abiertamente el problema de la emergencia, llamando a una “entidad emergente” como “el resultado de acciones de entidades más fundamentales, por lo que puede ser perfectamente nueva e irreductibles con respecto a esas últimas” (“The problems of life and mind”, entre 1875 y 1879 [111]).

A los filósofos, la emergencia los ha ayudado en sus reflexiones alrededor de los temas cuerpo y espíritu, ya que las explicaciones neurofisiológicas no les ha sido suficiente. El pensamiento sistémico enriquece ese vínculo con la emergencia, al pensar en sistemas de objetos macroscópicos compuestos por conjuntos de agentes con interacciones, eventualmente no lineales, no descomponibles. Un aspecto clave de esas reflexiones, tiene que ver con el status que le dan al observador y su distancia con respecto al fenómeno estudiado. Pero esas reflexiones vinculadas a la emergencia, también alimentan un debate que lleva mucho tiempo en el campo filosófico, que trata con la desacralización de la vida. Ese espacio del hacer filosófico se alimenta del fenómeno de la conciencia y su emergencia en nuestro organismo.

El concepto de emergencia en filosofía se opone esencialmente al de “reducción”, que consiste en considerar que un fenómeno puede siempre ser explicado por procesos subyacentes. La temperatura es uno ejemplo clásico. El término temperatura se emplea diariamente para designar un fenómeno, que se conoce, gracias al enfoque reduccionista, que resulta de la agitación térmica de las moléculas. Veamos formalmente esa relación entre esos dos conceptos [139]: Sean dos ámbitos de discurso (o teorías, puesto que es el término que se utiliza en filosofía) D y D' , cada uno compuesto por un conjunto de entidades E y E' , respectivamente, por un conjunto de propiedades P y P' , y por un conjunto de leyes L y L' . En esas leyes es necesario distinguir entre las leyes causales C y C' (que permiten describir una dinámica) y las generales G y G' (que permiten describir la composición o conservación del ámbito en cuestión); tal que $L=C \cup G$ y $L'=C' \cup G'$, respectivamente. Varias relaciones son posibles entre estos dos ámbitos de discurso:

- Es posible que no haya una relación establecida entre D y D' .

- Se podrían considerar las mismas entidades ($E=E'$), pero con otras propiedades ($P \neq P'$).
- Se podrían distinguir varios tipos de reducciones (relaciones) [139]:
 - E' es *ontológicamente reducible* a E , si toda entidad de E' es una entidad o una composición de entidades de E (por ejemplo, un gen es un conjunto de segmentos de ADN);
 - P' es *reducible por propiedades* a P , si toda propiedad de P' es una propiedad o una composición de propiedades de P (por ejemplo, el calor es la energía cinética media de las moléculas);
 - C' es *causalmente reducible* a C , si todas esas leyes causales son una ley causal, o una composición de leyes causales de C (por ejemplo, las leyes de los gases son reducibles a las leyes estadísticas de la termodinámica).
 - Si D' tiene simultáneamente la reducción ontológica, la reducción por propiedades y la reducción causal, entonces D' es reducible a D ,

Para situar la emergencia en este marco, el concepto de emergencia viene del hecho de la no reducibilidad de un discurso en otro.

También, en filosofía los conceptos de “acaecimiento”, de “realización” y” de “epifenómeno”¹⁶ son cercanos al de emergencia. Con respecto al concepto de *acaecimiento*, se dice que una propiedad P_2 ocurre desde una propiedad P_1 , si cuando dos entidades tienen la propiedad P_1 tienen también la propiedad P_2 . Este concepto supone que P_2 depende de P_1 . Esa relación de dependencia puede ser de varias formas [139]:

- *Acaecimiento escaso*: si dos entidades tienen la propiedad P_1 , entonces tienen también la propiedad P_2 ,
- *Acaecimiento global*: si dos entidades en mundos idénticos tienen la propiedad P_1 , entonces ellas tienen también la propiedad P_2 ,
- *Acaecimiento fuerte*: si dos entidades en dos mundos diferentes tienen la propiedad P_1 , entonces tienen también la propiedad P_2 (independencia del contexto). En este caso, el acaecimiento sería una emergencia.

Es bueno acotar, que la relación de acaecimiento es asimétrica (como la de reducibilidad).

¹⁶ Fenómeno accesorio que acompaña al fenómeno principal, y que no tiene influencia sobre él

En cuanto al concepto de *realización*, se aplica a la vez a las propiedades y a las leyes. En lo que se refiere a las propiedades, se dirá que la propiedad P de una entidad E lo realiza la propiedad Q, si y solamente si Q realiza las dos propiedades P y Q, y existe entre P y Q una conexión explicativa. Esa conexión explicativa se basa en una teoría que posee leyes que explican las transformaciones, algunas desde el punto de vista de la causalidad, otras por correlaciones entre propiedades, y otras por narrativas. Por ejemplo, una conexión explicativa vinculando las propiedades P (“tener una determinada estructura atómica y cristalina”) y Q (“ser transparente”) sugiere que P debe asociarse a la micro-estructura de E y Q a su macro-estructura. Con respecto a la realización de las leyes, Si P realiza Q y P’ realiza Q’, es necesario establecer un vínculo entre las leyes que conectan P a P’ y las leyes que conectan Q a Q’ para que se pueda decir que las leyes sobre P y P’ realizan una ley entre P y Q. Hay que señalar que la realización de leyes supone de una determinada manera que D y D’ describen niveles sucesivos. ¿La realización es el revés de la reducción? Parece que no, debido al último ejemplo. En efecto, una estructura atómica y cristalina realiza la propiedad de transparencia, pero sin embargo, el fenómeno de transparencia no se observa a nivel atómico, pues es emergente de la micro estructura atómica. Eso colocaría la realización como un concepto muy general que conecta dos ámbitos de discurso D y D’ (algunos aspectos de D’ son reducibles o emergentes de D). En realidad, la realización sirve para volver explícitos las condiciones de acacimiento entre dos propiedades.

El concepto de epifenómeno es [139]: “fenómeno emergente que no es nada para otras partes”, no tiene impacto causal sobre otras cosas. Un ejemplo es la sombra de la mano, epifenómeno puesto que su presencia no cambia lo que hace la otra parte (mano).

En concreto, la aparición del término “emergencia” en filosofía se da en medio de un debate entre cuatro corrientes [139]:

- El vitalismo sustancial, que afirma que existe una sustancia vinculada a lo vivo;
- La teoría mecanicista, para la cual no somos más que máquinas;
- La teoría de la emergencia, que distingue dos tipos de leyes que organizan la naturaleza:
 - El método homopático o resultante, que se puede explicar por

leyes causales o por composición de las causas. En este caso, las causas se suman para producir un efecto;

- El método heteropático o químico, que no se puede explicar por leyes causales (como la adquisición de las propiedades del agua a partir de las propiedades del oxígeno y el hidrógeno). En este caso, el efecto es algo más que la suma de las partes.

La emergencia plantea una visión del mundo en niveles, que se articulan los unos sobre los otros, y entorno a la existencia de entidades de un nivel dado, emergentes del nivel directamente inferior. En esa mirada filosófica de la emergencia, las entidades de un determinado nivel $n+1$ emergen de un nivel n existente, si y solamente si no se encuentra una relación causal, y en consecuencia, una explicación de los fenómenos del nivel $n+1$ desde el nivel n , de lo contrario uno es reducible del otro. Para que haya emergencia, es necesario no encontrar una causalidad entre $n+1$ y n , o $n+1$ y $n+1$. Si hay una causalidad entre n y $n+1$, es un epifenómeno¹⁷. En esta argumentación, la existencia de una causalidad descendente es fundamental. Se pueden distinguir dos tipos de causalidad descendente (efecto del nivel $n+1$ sobre n) [139]:

- Una causalidad macro-micro efectiva. Es el caso cuando una cosa x realizó una cosa y . Este argumento, mezclando causa eficiente y causa final, no tiene sentido, excepto en los casos de causalidad circular, en cuyo caso toda causa eficiente se convierte en una causa final y recíprocamente.
- la macro estructura tiene una causalidad sobre la micro estructura, cuando la macro estructura hace existir la micro estructura en una perspectiva temporal: por ejemplo, una organización social (nivel macro) permite garantizar la existencia de los individuos que allí participan (nivel micro).

Por otro lado, algunos filósofos han hablado de dos tipos de emergencia, la emergencia epistemológica y la emergencia ontológica [22]. La emergencia epistemológica estipula explicar el nivel n , pero desde un vocabu-

¹⁷ Es un fenómeno derivado, o dependiente de otro, considerado principal, y al que se asocia, sin poderse afirmar que es esencial o tenga influencia sobre él. En este sentido, se puede considerar que, o bien simplemente “acompaña” al fenómeno principal, o “emerge” de él. Un ejemplo de uso del término, es para explicar la relación entre el cerebro y el alma o la mente. Según ese término, la actividad cerebral es el fenómeno principal, mientras que el alma o la mente son un epifenómeno de la actividad cerebral.

lario en torno al nivel $n+1$. La emergencia ontológica afirma la existencia de entidades emergentes. Así, desde la teoría filosófica de la emergencia se caracteriza un fenómeno (o una propiedad) emergente (emergencia epistemológica), para plantearse a continuación la cuestión de su verdad existencial (emergencia ontológica). Los principales criterios sobre los que se apoyan esas definiciones son la no causalidad efectiva (partes \rightarrow todo), y la irreductibilidad.

Para finalizar, algunas de las ideas de la emergencia, vinculadas a la jerarquía y a la visión holística de la naturaleza, son también parte de la tradición filosófica [39]. Ya Platón lo decía al pronunciar que “el todo es más que la suma de sus partes” (las palabras y frases, por ejemplo, son más que las letras que las componen). De acuerdo con el *principio de plenitud* desarrollado en la filosofía, vivimos en un mundo en términos de jerarquía y de holismos, pero donde está ausente la idea de novedad evolutiva [36, 39]: algo más no sale de algo menos. Por el contrario, en la *filosofía de la emanación*, la aparición de nuevas cosas se lleva a cabo desde algo superior, como un proceso del ser, que reside en el principio divino antes del proceso de la creación. Por ejemplo, la mente humana no ha surgido de la vida animal, ha surgido “desde arriba”, desde niveles aún más altos. La emergencia permite ver la naturaleza como intrínsecamente capaz de producir esa novedad genuina. Ahora bien, esto se suscribe en un naturalismo científico según el cual los procesos mentales sobrevienen de procesos biológicos, y los procesos biológicos de procesos físicos (se distancia de las causas teológicas, que buscan explicaciones teológicas en los datos biológicos). Lo nuevo en la emergencia es que los efectos no se pueden deducir de la simple adición de las causas individuales, siendo totalmente heterogéneos a ellas. Veamos el caso del agua: “Ningún rastro de las propiedades del hidrógeno o de oxígeno son observables en el agua”. De esta manera, se puede hablar de dos tipos de causas [36, 39]: resultantes y emergentes. Las primeras se describen a través de leyes, teorías, etc., mientras que las emergentes constituyen una nueva clase cualitativa de fenómenos. Esa nueva clase de causalidad se basa en la siguiente idea [36, 39]: “A y B tienen una relación de *orden ascendente emergente*, si todas las instancias de B se componen de A, y si ciertas propiedades de B no las posee A, y no se pueden deducir de las propiedades de A”.

La idea anterior es la base para la construcción de lo que algunos autores han llamado como *leyes emergentes* [22, 36, 39]. Ahora bien, al hablar de leyes

emergentes las propiedades emergentes no tienen un carácter falso ad-hoc. Una ley emergente puede ser investigada científicamente [36, 39]: “una vez que se ha descubierto, se puede utilizar para sugerir experimentos para hacer predicciones, que nos proporcionen indicios sobre los sistemas”. Por ejemplo, las regularidades de los patrones de movimiento, pueden ser investigadas empíricamente. Esa característica emergente co-existe con el producto resultante. Así, la emergencia desafía la existencia de otros componentes desde su descripción como producto, pero también se niega a reducir la capacidad material desde donde aparece a nivel de micro.

2.6 Emergencia y Complejidad

El campo de investigación sobre la Complejidad, ha estado vinculado, desde el principio, a los conceptos de emergencia y auto-organización, como lo indican en [68], cuando lo definen como sistemas “críticos donde sus componentes interactúan y se auto-organizan para formar estructuras que exhiben propiedades emergentes del sistema”. La emergencia ha ayudado a caracterizar a las tres definiciones clásicas de sistemas definidas en la teoría de la complejidad, las cuales son [68]:

- Sistemas simples: describen situaciones con 2 o 3 variables como la rotación de la tierra.
- Complejidad desorganizada: millones de variables cuya resolución es a través de mecánica estadística, teoría de probabilidades, etc. Imposible de hacer predicciones desde ellas. Un ejemplo es la explicación del comportamiento de la herencia genética
- Complejidad organizada: número moderado de variables interrelacionadas. Se siguen reglas específicas y a partir de las diversas interacciones emerge una macro conducta particular. La morfogénesis fue uno de los primeros intentos en definir un problema de complejidad organizada

En general, el orden que vemos alrededor de nosotros, es sólo un pequeño subconjunto del orden teóricamente posible. Pero ¿Por qué no vemos más variedad? Para ello, el campo de la complejidad se ha acercado a la auto-organización, buscando normas generales sobre el crecimiento y la evolución de las estructuras sistémicas, y métodos de predicción de dicha organización futura, como resultado de los cambios realizados en sus componentes. A pesar de que el concepto de auto-organización ha cambiado

con el tiempo, hay algunos “principios de auto-organización” aceptables por la comunidad. Por ejemplo, un sistema dinámico siempre tiende a evolucionar hacia un estado de equilibrio, comúnmente llamado atractor [125]. Esto reduce la incertidumbre que tenemos sobre el estado del sistema. Así, los atractores son de importancia crucial, ya que capturan a largo plazo, dinámicas de comportamiento de un sistema complejo. Típicamente, un atractor puede ser un punto, una ruta, o una compleja secuencia de estados. La relación entre el espacio de estado del sistema (su volumen) con respecto al volumen del de los atractores, se puede utilizar como una medida, del grado de auto-organización presente en un sistema. Desde esta idea algunos autores han sugerido el concepto de entropía¹⁸, como medida del nivel de auto-organización en un sistema [125].

Curiosamente, a pesar de que la dinámica física de un sistema caótico es impredecible, hay ciertos aspectos del sistema que se pueden predecir, ya que siempre se sigue alguno de los caminos de uno de los atractores. Se puede ver la relación entre la entropía y la dimensión del atractor [125]: menor es la dimensión del atractor menor es la entropía. Lo que es importante para la teoría de la complejidad, es el hecho de que “un sistema con muchos componentes simples, exhibirá un comportamiento del conjunto, que parece más organizado que el comportamiento de las partes individuales”, a esto hemos llamado emergencia. También hemos dicho, que las propiedades emergentes generalmente se encuentran inesperadamente y, que no se pueden explicar. Los patrones o generalidades encontradas, en cierta medida, permiten interpretar el comportamiento emergente observado. En tales casos, las propiedades emergentes se anidan en capas en un sistema completo, y hay que buscar en el nivel superior para obtener una interpretación, más que desde el nivel inferior de los componentes. Así, vemos que la distinción entre la auto-organización y la emergencia es borrosa, y no universalmente separada en la literatura (realizaremos una revisión del vínculo de ambos conceptos en el siguiente capítulo). Sin embargo, una distinción entre ellos es que los comportamientos emergentes en sistemas complejos no son siempre beneficiosos. Por el contrario, la auto-organización podría verse como un comportamiento emergente “bueno”, que aumenta la aptitud del sis-

¹⁸ Es usado en termodinámica, mecánica estadística y teoría de la información. En todos los casos es una “medida del desorden” de la incertidumbre y de la información necesarias para, en cualquier proceso, poder acotar, reducir o eliminar la incertidumbre (http://es.wikipedia.org/wiki/Entrop%C3%ADa_%28informaci%C3%B3n%29)

tema para resolver “un problema”. De esta manera, la emergencia se asocia con la capacidad de auto-organización para cambiar de manera drástica en respuesta a un cambio en el medio ambiente (por ejemplo, la capacidad de un banco de peces a disociarse cuando un depredador pasa a través de ellos, y rápidamente después re-tomar el estado organizado precedente). Esto es una característica del sistema que demuestra la emergencia. Por lo tanto, la entropía pudiera ser utilizada para medir el nivel de emergencia producido [125].

En específico, el vínculo entre esos tres términos (emergencia, auto-organización y complejidad), puede ser establecido de la siguiente manera: La emergencia son fenómenos negativos o positivos que se encuentran/dan en los sistemas complejos. Un fenómeno positivo emergente que explota los sistemas complejos es la auto-organización (le permite al sistema adaptarse a un problema y ser auto-sostenible¹⁹, incluso cuando el entorno cambia). Así, el término “auto-organización” se refiere a una forma específica de emergencia.

Algunos autores señalan que en cualquier sistema dado, la emergencia (aparición de una propiedad inesperada) es, en general, proporcional a la complejidad del sistema [81]. Estas propiedades inesperadas pueden aparecer, desaparecer y por consiguiente alterar la complejidad del sistema. Ahora bien, en un sistema auto-organizado, a medida que aumenta la complejidad, la propiedad emergente (por ejemplo, el comportamiento global de una colonia de hormigas) se mantiene y enriquece. Pero eso sólo puede ocurrir después de un umbral dado (dos hormigas no exhiben el comportamiento emergente que se encuentran en un nido de hormigas grande, pero una vez que hay una cierta masa crítica (número de hormigas), un comportamiento global emerge, el cual se mantiene, y se enriquece con el aumento del tamaño de la colonia). Es esto lo que nos sugiere que la auto-organización es una forma específica de emergencia.

¹⁹ La “auto-sostenibilidad” de un sistema la usamos de la misma forma como fue usado por Maturana y Varela, vinculada a los términos de auto-poiesis y auto-organización [118, 119, 195]. Así, la “autosostenibilidad” caracteriza los sistemas que:

- Mantiene la definición de su organización a través de las perturbaciones del medio ambiente y de su cambio estructural y
- Regeneran sus componentes en el curso de su operación.

La primera condición es una propiedad general de la auto-organización, mientras que la segunda es la autopoesis.

S. Kauffman trabajó en el paradigma de la Complejidad Computacional (CC), que tiene como objetivo explicar la aparición evolutiva de la vida, a través de un enfoque computacional de abajo hacia arriba [39, 100]. La CC está interesada en la definición de algoritmos que caractericen patrones evolutivos y secuencias temporales que describen estructuras complejas, ya que las ecuaciones matemáticas, no son capaces de explicar la aparición persistente de dichas estructuras. Así, el paradigma de la CC pone ante sí, el objetivo de simular los códigos de los fenómenos naturales evolutivos de una manera ascendente. En este caso, la simulación de la evolución significa encontrar el conjunto mínimo de cómputo necesario para la regeneración de fenómenos complejos. ¿Cuál es la relación entre la emergencia y el CC? Mientras que algunos emergentistas han afirmado que una reducción de causalidad no es posible, los representantes principales de las CC creen que sí es posible comprimir los sistemas complejos en algoritmos relativamente simples. Así, hay diferencias importantes entre el enfoque de la teoría de la emergencia clásica y la teoría de CC. La teoría de la emergencia clásica tiene su fuerza en la propuesta de un modelo causal genérico, mientras que los estudios de CC utilizan un enfoque científico puramente cuantitativo. Para resolver esa diferencia, la emergencia debe aceptar el análisis computacional de la emergencia en los niveles de orden superior, admitiendo que la CC ofrece modelos útiles sin comprender los procesos causales reales. Ahora, no todo lo emergente surge o se comprende desde la complejidad. La aparición de algo así como “el color rojo escarlata” es mucho más simple que una descripción exacta de los procesos ambientales, sensoriales y neurales que participan en la producción de esa sensación en particular. Así, no toda descripción de lo emergente debe partir desde su complejidad.

2.7. Emergencia y Teología

P. Clayton, en [36, 37, 38], hace una discusión compleja y polifacética sobre la “emergencia”. Parte del hecho de que los sistemas irreductibles y complejos, pueden co-existir con sus propias estructuras, leyes y mecanismos causales. Clayton considera las consecuencias de esta visión, no sólo para la filosofía de la ciencia, sino también, para la biología, la neurología y la teología. Él explica las diversas formas que la materia toma, la emergencia de características, la irreductibilidad de los fenómenos que emergen, y la causalidad hacia abajo. Clayton describe cómo la física clásica hace

emerger al quantum, cómo modelos teóricos de sistemas artificiales (tales como redes neuronales artificiales, colonias de insectos artificiales, simulaciones de juego de la vida, etc.) se reflejan en casos reales de emergencia en bioquímica (auto-catálisis, sistemas de auto-organización), etc. Él sostiene que la ciencia no será capaz de entender la conexión entre la mente y el cerebro, hasta que la emergencia no sea tomada en serio. Curiosamente, a pesar de que Clayton sugiere una especie de “gradualismo”, en el que los sistemas más complejos emergen de los sistemas de nivel inferior, sostiene que, “en algún momento en la evolución hubo un aumento cuantitativo (en el tamaño del cerebro y la interconectividad) que dio lugar a un cambio cualitativo” [36, 37, 38]. Por lo tanto, la conciencia humana representa una especie de “salto” en la evolución.

Clayton ha argumentado que el mundo está abierto a sistemas de orden superior, y a la causalidad de arriba hacia abajo [36, 37, 38]. Por lo tanto, afirma que Dios es un sistema emergente que está más allá de la conciencia humana. La razón para postular eso es, “puesto que la actividad de razonamiento no puede explicarse por sí sola” [36, 37, 38]. Así, como Clayton argumenta que el naturalismo no puede dar cuenta de todo, no ve la razón del “por qué hay que estar de acuerdo para trabajar bajo las limitaciones de su ontología (naturalista)”. Clayton considera que también debería haber un argumento a favor de la acción divina. Él sostiene que el nivel adecuado de complejidad en que la causalidad divina está activa, es en el nivel de ‘la persona como tal’ o ‘la persona como un todo’ [36, 37, 38]. Por lo tanto, Clayton concluye: “la persona humana, entendida como un yo integrado a la comunidad, ofrece el nivel adecuado para introducir la posibilidad de la acción divina”. En este caso, la intervención divina podría ejercer la causalidad descendente, sin reducirse a un manipulador de partículas físicas o de neurotransmisiones.

Ahora bien, la física clásica sostiene que todas las fuerzas causales son, en última instancia, explicables en términos de las leyes de la realidad física subyacente [37]. El razonamiento de las ciencias físicas depende de una idea de *causalidad eficiente*, es decir, explicaciones dadas en términos de lo detectable y reconstructible desde las historias causales en el mundo natural. En esa visión cualquier forma, o materia, se reduce a las fuerzas que lo generan. Un proceso causal es una cadena de acontecimientos lineales, que causa su sucesor inmediato. En esa visión, el género causa no puede incluir

influencias que no se puedan analizar en términos de la física. Eso indudablemente tendría una influencia sobre el fenómeno de la emergencia. Pero evidencias para un acercamiento diferente al de la física clásica, lo encontramos en muchos ámbitos: causas mentales en psicología, epigénesis²⁰ en biología, etc. En el caso de la emergencia del cerebro humano y del sistema nervioso central, la evidencia de la causalidad es quizás intuitiva desde la biología. Pero reconocer el reino de la mente como fenómeno emergente, nos daría problemas desde la física, a pesar que en las últimas décadas la neurobiología humana, la ciencia cognitiva, y la psicología, lo han comenzado a reconocer como tal. La dificultad principal consiste en demostrar la irreducibilidad de los fenómenos mentales a leyes físicas, como también si los fenómenos mentales pueden tener efectos causales en el cuerpo y en el mundo (aunque esto es más fácil de demostrar).

Lo que emerge en el caso humano no es una mente o un alma separada, es un organismo que puede hacer cosas mentalmente y físicamente. Al decir que los seres humanos son organismos, estamos hablando de complejas entidades, las cuales evidencian diversas características y causas que funcionan en diversos niveles de complejidad. Para la vida, el cuerpo y el cerebro son condiciones necesarias, pero con todos los avances en neurología y psicología, podemos decir que no son condiciones suficientes. La persona no se puede traducir en términos “de niveles inferiores”; las personas evidencian causas, características y fenómenos que son únicamente personales. La historia causal de la mente, no se puede entender en términos físicos, porque el comportamiento mental no es claro. De hecho, la ciencia ofrece principios que son cada vez más divergentes de una causalidad física. Por ejemplo, las explicaciones causales de las ciencias biológicas basadas en la selección natural, son diferentes de las explicaciones causales de la física fundamental. La estructura del ADN contiene un expediente de la acción causal sobre las células y los organismos (historia evolutiva), desde un punto de vista lejano de la física fundamental.

Pero este ejemplo de la evolución representa un caso, particularmente difícil de explicar para la teoría de la influencia causal divina de Clayton. Sin embargo, se podría afirmar que Dios de cierta manera, dirige el proceso de evolución para causar el divino proceso creativo. Esa influencia causal

²⁰ En Biología, epigénesis (del griego epi: sobre; génesis: generación, origen, creación) es una teoría científicamente aceptada sobre el método por el cual se desarrolla un individuo (<http://es.wikipedia.org/wiki/Epig%C3%A9nesis>)

podría ser explicada desde la teoría de la información. La dimensión de la información es central dentro de la biología, que se ha concentrado en el descubrimiento del código genético, responsable de la información sobre las células y el organismo en su conjunto. Trabajos recientes, interpretan las estructuras biológicas y las interacciones del organismo con su ambiente, como procesos que implican el almacenaje, el uso, y el intercambio de información [44, 160]. Al combinar los conceptos de información y causalidad para comprender las influencias causales en biología, se pueden constatar aspectos como que hay dos vías de interacción entre el ADN de una célula y la célula en su conjunto (puesto que las proteínas particulares en la célula funcionan selectivamente, para causar que segmentos del genoma (es decir, elementos particulares de información genética) sean expresados, entonces las influencias de determinación son de arriba hacia abajo como de abajo hacia arriba). No hay leyes biológicas violadas en ese caso, y lo vemos claramente en los sistemas biológicos complejos tales como el cerebro, los cuales tienen emergentes características mentales, las cuales son fundamentales para el funcionamiento del cerebro.

Vista la relación entre la evolución y la causalidad, volvamos a analizar la causalidad divina. Por definición, Dios no puede ser apenas una causa, junto a otras del mundo natural, ni el ser divino pertenecer al finito orden causal. Pero al igual que la influencia causal biológica, no hay leyes físicas violadas, al suponer un intercambio de información entre una fuente divina y la conciencia humana. Todo lo anterior permite introducir la idea de *causalidad inesperada/emergente* [44, 160]. La emergencia nos muestra que no es la propagación ascendente causa de toda la historia. El estado del sistema químico entero obra recíprocamente con las partículas, la célula entera, el organismo entero, el cerebro entero, afectando al comportamiento de las partículas y las interacciones causales que tienen. Los fenómenos permiten, y pueden requerir la noción hacia abajo de una propagación causal de influencia. Los físicos obvian esa discusión, interpretando los fenómenos mentales como características de un objeto físico, en este caso el cerebro, con características micro-físicas que son suficientes para explicar los efectos de lo que llamamos mentalidad. En oposición a la interpretación física, Clayton sostiene que la causalidad mental (por ejemplo, como nuestras ideas y pensamientos causan movimientos corporales), va más allá que la limitación impuesta por sus características micro-físicas, y es la base de una causalidad emergente. Esa misma idea de causalidad emergente, puede ser usada para explicar la causalidad divina.

Volviendo a la idea de evolución, pareciera incompatible con la causalidad divina, pero podríamos superar esa diferencia si las vemos como complementarias. La teoría evolutiva contemporánea, excluye fuerzas vitales o influencias causales del exterior. La teoría teísta (causa divina)²¹, requiere solamente que el producto del proceso evolutivo refleje la intención divina de crear criaturas racionales, que pueden estar en relación consciente con Dios. Esto pudo ocurrir porque Dios inició un proceso, donde sabía por adelantado que produciría necesariamente tales criaturas. Además, Dios podría dirigir el proceso de la emergencia evolutiva a través de la introducción de nueva información (causalidad evolutiva). La ciencia no puede proporcionar la evidencia de esa causalidad evolutiva (explicaciones científicas de ese fenómeno biológico), pero sí de la existencia del mismo. El único detalle es que nuestro marco sobre la emergencia, no nos permite establecer el tipo de control del proceso evolutivo tradicionalmente defendido por los teístas. Pero para la emergencia, es suficiente hablar de la emergencia de una providencia divina [139].

Vemos así que la emergencia se puede utilizar como categoría general, para entender el mundo físico y divino. Fenómenos físicos donde las características del agua difieren de las de sus componentes moleculares, se han citado como ejemplos de emergencia. Para los emergentistas las miradas a un fenómeno son múltiples. Por ejemplo, pueden ver el fenómeno de la mente y simultáneamente suscribir los avances encontrados en neurología. De esta manera, un emergentista puede sostener que ciertas clases de sistemas son interpretados mejor en términos de una emergencia reduccionista, otras clases de sistemas se interpretan mejor en términos de la emergencia fisicalista no reductible, y algunos otros desde la emergencia radical (ver capítulo 1 para más detalles sobre esa clasificación de la emergencia). También se podría hacer un análisis similar usando otra clasificación de la emergencia. Al tratar de explicar como la emergencia se aplica a un fenómeno particular, tal como el sentido humano, usaría esas múltiples miradas. El enfoque no reduccionista pone un límite en la imaginación científica, una camisa de fuerza, que confina la interpretación de la investigación en lo que es actualmente concebible. La emergencia radical no fuerza soluciones a los problemas existentes, no necesita explicar los fenómenos del sen-

²¹ Viene del término teísmo, que significa creer en un Dios, que interviene en el curso del mundo y en la vida humana. En este sentido, hay rasgos teístas en casi todas las religiones.

tido en términos de categorías y modelos científicos existentes, y permite la introducción del concepto de Dios. Sin embargo, la emergencia radical también tiene sus peligros, esto se ve en las discusiones sobre el sentido humano. Para ella es suficiente decir, que el sentido humano es un fenómeno emergente. Mientras que esto puede ser satisfactorio a nivel teológico, no es muy práctico en la neurología y las disciplinas relacionadas. La emergencia radical puede llevar a un desaliento para la investigación científica, ya que cualquier fenómeno que no se pueda explicar se puede etiquetar como inesperado. Una pregunta importante es cuándo etiquetar algo como inesperado.

En general, la caracterización del ser humano propuesta por la teoría de la emergencia, afecta profundamente su comprensión [38]. Las prácticas religiosas y científicas toman muy diversos caminos, dependiendo si la emergencia es débil o fuerte:

- Emergencia epistemológica débil: puede reflejar las limitaciones en nuestras teorías y métodos experimentales.
- Emergencia epistemológica fuerte: puede reflejar características intrínsecamente desconocidas del mundo natural.
- Emergencia ontológica débil: puede reflejar las estructuras más o menos estables en el mundo natural.
- Emergencia ontológica fuerte: puede reflejar las entidades que son completamente verdaderas.

La perspectiva del emergentista es que las preguntas que no pueden ser resueltas en la esfera humano-cultural por hechos (por ejemplo, biológicos), es un objeto de discusión/reflexión, que tiene una dimensión en su caracterización vinculada a sus componentes. Pero intentar resolver solo con valoraciones “hacia abajo”, es el error a menudo del anti-emergentismo. Es desde esa mirada, que ha llevado a ciertos autores a preguntarse si no puede haber otro nivel, el nivel de la espiritualidad [36]. Es desde ese nivel donde Dios puede tener alguna influencia en el universo. Desde esa mirada de la historia del universo, Dios estableció leyes, tendencias y condiciones iniciales, tales que hizo altamente probable, o inevitable, que la vida inteligente emergiera naturalmente sobre el curso de la historia cósmica [36, 37, 38].

Para terminar esta sección, haremos algunas reflexiones teológicas sobre la emergencia y complejidad. El emergentismo británico tiene diferentes interpretaciones religiosas de la emergencia. L. Morgan era un teísta clásico que entiende que Dios es la fuente inmaterial de todo lo que existe [39, 123]. S. Alexander, en cambio, vio a Dios como el producto de un mundo en desarrollo [12]. Lo que hace a la emergencia y complejidad abiertas a una interpretación religiosa, es el hecho de ver a la naturaleza intrínsecamente inventiva y llena de maravillas naturales, y a la evolución como centro de esa capacidad inventiva a partir de la interacción divina con ese mundo en evolución.

Alexander postula una deidad²² como un paso más en la escalera de emergencia. La deidad tiene sus raíces en el camino espacio-temporal, o evolución, de la naturaleza, que lleva a más complejos modos de realización [12]. Esta es una posición muy clara, de una visión totalmente naturalista de la providencia. Desde esa mirada del mundo, la emergencia puede vincularse sin restricción alguna a Dios. Según la lógica teológica de Alexander, en la medida en que el universo es entendido como el cuerpo de Dios, Dios coincide con el universo. El mundo es el cuerpo de Dios, y Dios es el “dueño” de las cualidades divinas. En consecuencia la deidad de Dios se presenta sólo en una parte del gran universo, el de las cualidades divinas, de las que sobrevienen las cualidades emergentes de la vida y la mente. En este sentido, la deidad es “una cualidad como la mente o la vida” en el continuo espacio-tiempo - con sus procedimientos internos hacia la divinidad. Así, la realidad de Dios, y las cualidades de la divinidad, emergen junto con, y como resultado de la historia evolutiva.

También, algunos autores han argumentado que Dios es el iniciador de la emergencia [36, 37]. Una primera versión de este punto de vista es el teísmo clásico atemporal [36, 37]. Aunque Dios es el creador de un mundo temporal, Dios se supone más allá del tiempo y el espacio. Esta idea de un Dios eterno, se profesa para salvaguardar la alteridad de Dios. En su forma extrema, un teísmo-temporal se convierte en un deísmo, que sólo ve a Dios como el gran iniciador del universo. Una versión más compleja de un teísmo-temporal ha propuesto reciente-

²² Es un Dios, considerado como un ser presumiblemente sobrenatural al que normalmente se le atribuyen poderes importantes (aunque a algunas deidades no se les atribuye poder alguno, <http://es.wikipedia.org/wiki/Deidad>).

mente el físico P. Davies [45]. Él tiene un punto de vista uniforme²³ de la relación Dios-mundo. Se centra en la manera en que las leyes básicas de la física se combinan con las ambientales, para dar lugar a la emergencia de la complejidad organizada, a esto llama “uniformismo modificado”. No hay supervisión divina de los detalles de la evolución, pero, dice Davies “... Dios ‘inicialmente’ seleccionó las leyes del universo, tanto para las bases del Big Bang como para la evolución creativa posterior... Dios fue capaz de otorgar una rica creatividad al cosmo, porque las leyes del universo tienen una notable capacidad para canalizar, estimular y facilitar la evolución de la materia y la energía que conducen a una mayor complejidad organizativa”. Vemos en este punto de vista, una interpretación teísta de la llamada visión cósmica de las leyes, para la producción de un mundo formado por la vida y la conciencia. Eso hace a Davies interesarse en los fenómenos emergentes que “conducen a la aparición de un tipo diferente de orden macro - el orden de la complejidad - en el nivel global” [45]. Dios, en ese punto de vista, sería la mente creativa que seleccionó las leyes, que combinadas con las porciones adecuadas del azar – dan lugar a la complejidad emergente. Dios es como el inventor de un juego como el ajedrez, que establece las normas, dejando abierto el espacio para el auto-desarrollo del juego. De esa manera, Davies establece que Dios actúa en conjunto con las capacidades naturales del mundo, a partir de una teoría coherente de cómo Dios lo hace sin violar las leyes de la naturaleza [44, 45]. Otro ejemplo de una teoría como la anterior, es la establecida por P. Clayton [36], “Dios orienta el proceso de emergencia mediante la introducción de nueva información (causalidad formal), y manteniendo un ideal o imagen que influye en el desarrollo, sin alterar los mecanismos de la evolución (causalidad final)”.

Otras versiones de la misma idea, han aparecido en estudios teológicos posteriores, tanto filosóficos como doctrinales, siendo el teísmo temporal el que tiene una posición mayoritaria, con una afinidad particular con la emergencia. En el trabajo del bioquímico Peacocke, nos encontramos con una clara combinación del teísmo temporal y la emergencia [132, 133]. Para que Dios este omnisciente (significa que *Dios* conoce todo y lo sabe todo), Dios tiene que saber todo lo que es lógicamente posible. Pero en la medida que en el futuro no se pueden determinar

²³ Dios es visto, no sólo como creador del universo, sino también, mantiene la existencia y el orden del universo, incluyendo las leyes de la naturaleza

las propiedades emergentes, Dios no puede conocer todas las realidades futuras. Dios puede conocer el espacio de las posibilidades futuras, pero no la ruta exacta de la evolución emergente. Esta limitación del conocimiento divino puede ser vista por los críticos como una limitación externa a Dios. Pero los defensores de esta visión indican que esta limitación no es externa a Dios pues es la raíz de la generosidad del amor divino, ya que Dios creó el mundo dándole la libertad a su auto-exploración. La auto-limitación de Dios es motivada a la auto-realización del amor divino.

Peacocke sugiere ver a Dios como la “Realidad Circundante” del universo [132, 133]. Dios, sin embargo, no debe ser percibido como algo lejano externo al universo, ya que, siendo inmanente²⁴ al mundo, Dios está presente de forma ubicua y activo para elaborar las intenciones divinas, “en, con y bajo” el nexo con la naturaleza en su conjunto. Es en este contexto que Peacocke utiliza la causalidad de arriba hacia abajo (o “todo-parte”): “... Dios podría hacer que se produzcan patrones particulares ... que expresan las intenciones de Dios. Estos últimos no habrían sucedido si Dios no lo hubiese previsto”. Así, Peacocke sugiere que Dios obra a través de un mundo de procesos emergentes. Estos procesos no sólo se pueden describir como un medio para la acción divina, sino que son vistos como inherentemente flexibles, a fin de estar abiertos a que Dios ejerza una influencia continua en el curso de la evolución. En general, Peacocke sólo encuentra dos fuentes de indeterminación ontológica en el mundo de la naturaleza: la indeterminación cuántica y la conciencia. También establece que la naturaleza en su conjunto, con su exposición a la emergencia, se mueve en la dirección de una complejidad cada vez mayor. Por lo tanto, la explicación teológica de Peacocke está principalmente relacionada con el mundo en su conjunto: “en analogía a la forma en que los sistemas de mayor nivel (por ejemplo, una bandada de aves migratorias) ejercen una influencia informativa en los sistemas de nivel inferior (las aves individuales), Dios ejerce un persistente flujo de información sobre el mundo como un todo”.

²⁴ En filosofía se califica a toda aquella actividad como inmanente a un ser, cuando la acción perdura en su exterior, cuando tiene su fin en otro ser. Algunos autores señalan que la inmanencia es una propiedad por la que una determinada realidad permanece como cerrada en sí misma, agotando en ella todo su ser y su actuar (<http://es.wikipedia.org/wiki/Inmanencia>).

De lo expuesto antes, no se extrae “un factor divino” en el flujo natural de la información, Dios está activo en un nivel superior de la naturaleza. Por el carácter racional de entendimiento de la realidad, las lagunas en las explicaciones científicas son resueltas desde una versión fuerte de la emergencia, que incluye auto-organización y autopoiesis como propiedades divinas emergentes. Los sistemas inmunológicos, el cerebro, y el idioma, serian ejemplos de ello.

Ahora bien, lo antes dicho debe ser contrastado a la luz de los conceptos clásicos de auto-organización y autopoiesis. Por ejemplo, N. Gergersen sostiene, al introducir el concepto de autopoiesis [80, 81], que “la teoría autopoietica niega una autonomía de la existencia de sistemas de nivel superior, los cuales siempre dependen ontológicamente de los sistemas de nivel inferior. La teoría autopoietica, sin embargo, tiene la pretensión de una autonomía del proceso. Por lo tanto, el hecho de que diferentes sistemas se puedan describir juntos, en un esquema uniforme de causalidad, es porque tienen una misma base ontológica de la evolución pluriforme en sí misma” (por ejemplo, el sistema inmunológico selecciona anti-cuerpos para ser clonados en sus procesos emergentes, mientras que la emergencia de significados en el lenguaje humano es generada por los sonidos pronunciados). Ahora bien, según [80], el concepto de sobrevenir, introducido al inicio de este capítulo, nos permite explicar la génesis de los sistemas de nivel superior en el mundo de la biología con un toque de causalidad divina. Por ejemplo, la aparición de la vida y de los sistemas nerviosos centrales en la historia natural. Una vez que estos sistemas han aparecido, a través de la evolución, asumen un papel causal autónomo.

Como hemos visto, los conceptos de complejidad y emergencia se pueden utilizar para entender la acción divina. El crítico preguntaría, ¿Cómo es exactamente posible todo esto? Peacocke, Clayton, entre otros, nos han dado algunas ideas para responder. Presuponen que la naturaleza y Dios están tan íntimamente entrelazados, que la presencia de Dios no puede ser sustraída del mundo de la naturaleza. La naturaleza es igual a Dios. Los argumentos propuestos no son parte de una teología natural, que tiene como objetivo defender la “existencia de Dios”, en el contexto de la emergencia y complejidad. Por el contrario, es un tipo de razonamiento: si la naturaleza implica casos de emergencia (con la participación de la auto-organización y la autopoiesis), y si

Dios es el creador, entonces tenemos un acercamiento natural entre una visión del mundo emergentista de la naturaleza y la tradición de un teísmo temporal.

En este libro hemos definido la emergencia, sin buscar una explicación religiosa, pero esta visión era importante señalarla, si queríamos tener una completa contextualización de la teoría de la emergencia. A la luz de la variedad de aspectos expuestos hasta aquí, podemos constatar las fuerzas y las debilidades de la emergencia en las ciencias; la emergencia en la filosofía de la ciencia; las alternativas a la y de la emergencia; y las implicaciones posibles de la emergencia para la comprensión de la vida, del sentido, de la naturaleza humana, de la religiosidad y espiritualidad humana, entre otras.

Capítulo 3: Conceptos Vecinos a la Emergencia

En esta sección exploramos algunos conceptos vinculados al término de emergencia. Revisamos en qué consisten dichos términos, cómo se dan esas relaciones, y qué consecuencias tienen los mismos para la emergencia.

3.1 Auto-organización

Como lo vimos en el capítulo anterior, dos conceptos fundamentales en los sistemas complejos son: la emergencia y la auto-organización. Ahora bien, el término “auto-organización” se usa ampliamente en la literatura científica, sin una definición clara del mismo. La auto-organización ha sido usada para explicar fenómenos biológicos (por ejemplo: la organización de las sociedades de insectos), físicos (por ejemplo: la formación de tornados), químicos (por ejemplo: la formación de estructuras disipativas²⁵), e incluso matemáticos (como los producidos con autómatas celulares) [149]. Pero quizás lo más relevante para este libro es la gran confusión entre los términos emergencia y auto-organización. Iniciemos la constatación de la relación íntima entre la auto-organización y la emergencia, con un ejemplo.

En grupos de animales (colonias, manadas) emergen comportamientos (por ejemplo, el reclutamiento de individuos para buscar alimentos, la coordinación de emboscadas a presas, etc.), bajo formas de organización que van evolucionando, para hacer cada vez más eficiente el trabajo del grupo [160]. Un fenómeno similar sucede en la evolución del sistema celular de los organismos multicelulares: van emergiendo formas de organización de las células que permiten generar sus sistemas inmunológicos, sofisticados métodos de adquisición de alimentos, de circulación interna, etc. En esos casos se da la emergencia de comportamientos y procesos de auto-organización. Muchos otros ejemplos existen, donde ambos aspectos se dan: la regulación térmica de las colonias en las abejas, la selección de néctares en las abejas, los enjambres de armadas de hormigas, la formación de patrones en las bacterias, la agregación de alimentos en los escarabajos, la sincronización en los bancos de peces y las bandadas de

²⁵ Una estructura disiparia consiste en la aparición de una estructura coherente, en un sistema lejos de su equilibrio.

aves, la formación de rastros en las hormigas, la resolución de un atasco de tráfico de vehículos, la alternación entre las líneas blancas y negras de las cebras, las olas en el mar movidas por el viento, entre otros.

En todos los casos, son sistemas constituidos por componentes (granos de arena, células pigmentosas, hormigas, etc.), que interaccionan localmente entre ellos, y a partir de allí, emergen patrones como resultado de la auto-organización espontánea. La coordinación de movimientos, la selección colectiva, etc., son muestras de la ocurrencia de patrones como resultado de un proceso de auto-organización. Ese proceso de formación de patrones (desde granos de arena, grupos de células, etc.), permite la emergencia de estructuras y/o comportamientos necesarios para el medio donde se da. Eso que emerge, que resulta, es reutilizado en el proceso de auto-organización. Esto nos permite hacer una primera afirmación: la auto-organización en muchos casos implica una emergencia, y el elemento que emerge (zonas cerebrales, trazas, ruta y velocidad seguida, etc.), permite al sistema (sistema neuronal, colonias de hormigas, manadas de mamíferos, bancos de pescado) auto-organizarse.

Ahora bien, como expresamos al inicio, en la literatura se puede constatar una gran confusión entre el significado de la emergencia y la auto-organización. Uno de los motivos de la confusión proviene del hecho de que una combinación de ambos fenómenos, a menudo, ocurre en los sistemas dinámicos. Pero la emergencia y la auto-organización consideran diferentes propiedades en un sistema, y representan aspectos diferentes de un sistema. Incluso, ambos fenómenos pueden existir de manera aislada. Como consecuencia, la emergencia y la auto-organización no son sinónimos, como muchos autores a veces los han usado en la literatura.

A continuación, un ejemplo de la confusión entre los dos términos. La emergencia se define a menudo como un orden global que emerge desde interacciones locales. Podemos describir ese proceso como sigue [86]: dos componentes que obran recíprocamente pasan por una variedad de configuraciones hasta que encuentran una que es mutuamente satisfactoria. Para alcanzar un orden global, ese ajuste debe propagarse a los otros componentes (por ejemplo, dos moléculas se pueden ensamblar en una tercera, y cuarta, y así sucesivamente, para la formación eventual de un cristal macroscópico. Dos personas que descubrieron un interés común pueden comenzar a hablar, y terminar en la fundación de un club, de

un movimiento político, o de una compañía). Si bien cada componente guarda sus propias características individuales, como una especie en un ecosistema, las estructuras colectivas serán más complejas. La interacción entre los componentes reproduce o produce el crecimiento de una estructura colectiva, hasta que se estabilice (por ejemplo por agotamiento de recursos, como el caso de un club de ajedrez que parará de crecer cuando no hay más personas en una ciudad interesadas en el ajedrez, o en pertenecer al club de ajedrez). Más adelante, llamaremos a eso retroalimentación positiva. La estructura colectiva auto-organizada no es estática ni rígida. Cuando el ambiente cambia, los componentes que obran recíproca y directamente con el ambiente, tendrán que adaptar su estado. Este ajuste se propaga hasta que de nuevo la estructura colectiva se adapte a la nueva situación. Así, ella se reorganiza constantemente, balanceando al mismo tiempo las presiones internas y externas para el cambio, mientras que intenta mantener su organización esencial.

En el capítulo 1, hicimos un análisis sobre las definiciones de emergencia. Veamos un breve resumen aquí. Como acabamos de decir, algunos autores describen la ‘emergencia’ como un fenómeno donde el comportamiento global surge de las interacciones entre las partes del sistema. En el pensamiento occidental, desde la época de los antiguos griegos, se ha dicho que la configuración o patrón de elementos de un todo no pueden ser descritos simplemente como la suma de sus partes: ¿Cómo explicar el comportamiento global? ¿Qué aportan los comportamientos locales de sus componentes? eran algunas de las preguntas que se hacían. En el contexto de un sistema dinámico, el significado de la emergencia no es nuevo tampoco. El filósofo Inglés Lewes lo utilizó hace más de 100 años para distinguir entre productos químicos “resultante” y “emergentes” de una reacción química cuando comentaba [111]: “... Aunque cada producto es el resultado de sus componentes, no podemos siempre seguir los pasos del proceso a fin de obtener el producto. En este último caso, propongo llamar a ese proceso una emergencia ...”. En general, el concepto de emergencia se ha utilizado contra el reduccionismo, que declara que un sistema puede reducirse a la suma de sus partes. El concepto de emergencia, en el caso de los sistemas complejos, tiene raíces científicas y matemáticas muy diversas. Por ejemplo, el Instituto Santa Fe ha desarrollado la teoría de los *sistemas complejos adaptativos*, que utiliza de forma explícita el término “emergencia” para referirse a los patrones a nivel macro derivados de agentes que interactúan [63, 82]. Otro ejemplo es la

Teoría de los *sistemas dinámicos no lineales* y la teoría del *caos*, que definen el concepto central de atractores (una conducta específica a la cual el sistema evoluciona). Un tipo específico de atractor es el atractor llamado *extraño*, que D. Newman en [125] lo define como un auténtico fenómeno emergente. En el capítulo 1 vimos otras definiciones del concepto de emergencia que se encuentran en la literatura desde diferentes corrientes del pensamiento, en todas ellas aparecen dos características importantes:

- Un comportamiento global que surge de las interacciones de las partes locales,
- El comportamiento global no puede explicarse desde dichas partes individuales.

Para analizar la relación de este concepto con la auto-organización usaremos la definición siguiente [54]: “*Un sistema emergente presenta una estructura coherente en un macro-nivel, la cual surge dinámicamente desde las interacciones entre las partes del nivel micro*”. En esa definición se utiliza el concepto ‘emergente’ como un término general para denotar el resultado del proceso de emergencia: propiedades, comportamientos, estructuras, patrones, etc. La palabra “nivel” se refiere a ciertos puntos de vista. El nivel macro considera el sistema en su conjunto y el nivel micro considera el sistema desde el punto de vista de las entidades individuales que componen al sistema. Pasemos a analizar las características que se derivan de esa definición [54]:

- *Efecto Micro-Macro*: Esta es la característica más importante que se menciona en casi toda la literatura sobre emergencia. Un efecto micro-macro se refiere a las propiedades, comportamientos, estructuras o patrones que se sitúan en un alto nivel (macro,) los cuales surgen de las interacciones que se dan en el nivel inferior del sistema (a nivel micro). Llamamos “emergentes” a tales propiedades, patrones, etc. Dicho de otro modo, el comportamiento global del sistema (es decir, el emergente) es el resultado de las interacciones entre las distintas entidades que componen al sistema.
- *Novedad Radical*: El comportamiento global es nuevo, es decir, los comportamientos individuales del nivel micro no tienen una representación explícita del comportamiento global (es emergente en el macro-nivel, por lo que no es reducible a las partes del nivel micro del sistema). Es radical, ya que la novedad se debe a que la conducta colectiva no es fácilmente comprensible desde el comportamiento de

las partes. El comportamiento colectivo es, sin embargo, implícitamente incluido en el comportamiento de las partes. Todo lo anterior nos dice que las propiedades emergentes no pueden ser estudiados mirando a las partes. Sin embargo, pueden ser estudiadas observando a cada una de las partes en el contexto del sistema en su conjunto.

- *Coherencia*: se refiere a una lógica y coherente correlación de las partes. El producto emergente aparece como una totalidad integrada que tiende a mantener un sentido de identidad en el tiempo (es decir, un patrón persistente). La coherencia correlaciona los componentes del nivel inferior en una unidad de nivel superior. La coherencia es también llamada por algunos como el “cierre de la organización”.
- *Interacción de las partes*: Las partes necesitan interactuar. Sin interacciones los comportamientos interesantes a nivel macro no surgen.
- *Dinámica*: la emergencia surge porque el sistema evoluciona en el tiempo. Esta emergencia es un nuevo tipo de comportamiento, que se hace posible en un momento determinado en el tiempo. Por lo tanto, se puede relacionar la emergencia a la aparición de nuevos atractores (bifurcaciones) en un sistema dinámico.
- *Control Descentralizado*: No hay control central, es decir, ninguna parte del sistema orienta el comportamiento a nivel macro. De esta manera, el conjunto no es directamente controlable, a pesar de que las acciones de las partes puedan ser controlables. Esta característica es una consecuencia directa de la novedad radical que se requiere para la emergencia. Un control centralizado sólo es posible cuando existe/hay una parte/componente del sistema con una representación del comportamiento global (por ejemplo, un plan), lo cual no es el caso en los sistemas emergentes.
- *Relación Bidireccional*. En los sistemas emergentes existe una relación bidireccional entre el nivel macro y el nivel micro. Del nivel micro al nivel macro, las partes dan lugar a una estructura emergente. En la otra dirección, la estructura emergente influye en sus partes (propiedades del nivel superior tienen efectos en el nivel inferior, a esto se le llama causalidad descendente. Por ejemplo, en las colonias de hormigas la ruta emergente influye en el movimiento de las hormigas, a nivel micro, para seguir los feromonas).
- *Robustez y flexibilidad*: La necesidad de un control descentralizado y el hecho de que ninguna entidad tiene una representación global, implica que no hay una entidad como punto único de fallo. Los sistemas emergentes son relativamente insensibles a las perturbaciones

o errores: la calidad de la salida puede disminuir gradualmente sin pérdida repentina de la funcionalidad. Esta flexibilidad hace que las entidades individuales puedan ser reemplazadas, y sin embargo, la estructura emergente puede permanecer (por ejemplo, las aves de una bandada pueden ser sustituidas por otras aves, sin embargo, el fenómeno de bandada persiste).

En los fenómenos emergentes los niveles, y por lo tanto, también la terminología, pueden cambiar según donde se situó el observador. Por ejemplo, en algunas circunstancias puede ser que sea útil referirse a las células como elementos (por ejemplo, colonias bacterianas); en otros como sistemas (por ejemplo, regulación genética); y en otros como sistemas que se coordinan con otros sistemas (por ejemplo, morfogénesis).

A continuación, algunas definiciones de la *auto-organización*. Una definición intuitiva y lingüística de la auto-organización, propuesta por Dempster en 1998, es [47]: “La auto-organización se refiere exactamente a lo que se sugiere: sistemas que pueden organizarse sin una dirección, manipulación o control externo”. Otra definición es la dada en [73], donde indican que “es un proceso en el que el patrón (arreglo organizado particular de objetos en espacio y tiempo) en el nivel global de un sistema, emerge solamente de las interacciones numerosas entre los componentes de nivel inferior del sistema”. Esta última definición es prácticamente la misma que la de emergencia, prestándose a una confusión entre los dos términos, por consiguiente, consideraremos la primera definición para nuestro análisis en esta sección. También estableceremos que, en general, un sistema auto-organizado es uno en el cual, sus elementos interactúan autónomamente, con el fin de permitir que el sistema se adapte dinámicamente a su entorno.

En general, el problema para dar una exacta definición de un sistema auto-organizado, viene dado por su dependencia del observador [76]: Por ejemplo, si decidimos llamar al estado “preferido” como estado atractor de un sistema “organizado”, entonces la dinámica llevará a una auto-organización del sistema. Así, la auto-organización es entendida como un proceso en la cual los elementos obran recíprocamente para alcanzar dinámicamente un estado, el cual eventualmente, puede reflejar una función o un comportamiento global. Esta función o comportamiento, no es impuesto por uno o algunos de los elementos del sistema, ni determinado jerárquicamente. Se alcanza autonomía porque los elementos obran

recíprocamente el uno con el otro, sin control externo. Estas interacciones producen regeneraciones que regulan el sistema. Esto le permite a los sistemas adaptarse rápidamente a los cambios imprevistos.

Pero un sistema auto-organizado no sólo regula o adapta su comportamiento, sino que crea su propia organización [76]. Es ese el aspecto diferencial, con respecto a un sistema creado por un diseñador. En ese caso, la organización se define como una estructura con una función dada²⁶. Por el contrario, la auto-organización significa que aparece una estructura funcional espontáneamente. El control para alcanzar esa estructura, se distribuye sobre todos los componentes participantes. De esta manera, los sistemas auto-organizados son robustos: pueden soportar una variedad de errores, perturbaciones²⁷, o aún destrucción parcial. Ellos serán capaces de repararse o corregir la mayoría de los daños, volviendo a su estado inicial. Eso les permite adaptar su organización a cualquier cambio en el ambiente. También, hemos señalado que un sistema auto-organizado es dinámico: los componentes están cambiando constantemente el estado del sistema. Pero debido a la dependencia mutua, los cambios no son arbitrarios: algunos estados son “preferibles”, en el sentido que serán reforzados o estabilizados, mientras que se inhiben o se eliminan otros. Hay un montón de sistemas con esas cualidades: cerebro, ecosistemas, sociedades, mercados, enjambres de animales, etc. La computación ofrece también algunos ejemplos: el protocolo TCP/IP, los algoritmos genéticos, etc. Algunas áreas donde se ha estudiado la auto-organización son la economía, la ecología, la teoría de sistemas, la informática, la física, entre otras (por ejemplo, en la informática se ha usado en el contexto de maquinas de aprendizaje, sistemas artificiales adaptativos, computación distribuida, etc.) [135, 136]. Igualmente, algunos autores la han asociado al área de las “ciencias de la complejidad” [135, 136].

Dos aspectos claves para la auto-organización son la “autonomía” y el “ajuste de la estructura”. Basado en esos dos aspectos, y para la comparación con la emergencia que haremos en esta parte, definiremos la auto-organización como: “*un proceso dinámico y adaptable en los sistemas para adquirir y/o mantener la estructura de sí mismos, sin control externo*”. La “estructura” puede ser espacial, temporal, funcional o una combinación de ellas.

²⁶ La *estructura* significa que los componentes de un sistema están arreglados en un orden particular, integrados en un conjunto. La *función* significa que esa estructura satisface un propósito.

²⁷ Las perturbaciones los ayudan a concebir una organización siempre mejor.

“Un control no externo” se refiere a la ausencia de dirección, manipulación, interferencia, presiones o participación de actores fuera del sistema. Partiendo de esa definición, a continuación se resumen las características de un sistema auto-organizado [86]:

- *Aumento del Orden*: Una característica importante de la auto-organización es el concepto de «organización». Ella puede ser definida como el arreglo de piezas seleccionadas a fin de generar una función específica. Esto restringe el comportamiento del sistema, de tal manera que se limite a un volumen más pequeño de su espacio de estados. Ese espacio de estados es lo que hemos llamado atractor. De esta manera, la organización puede ser considerado como un aumento en el orden del comportamiento del sistema que le permite adquirir estructuras espaciales, temporales, o funcionales. Para algunos autores, un sistema sin orden no muestra un comportamiento útil, pero también un sistema con mucho orden puede tener ese problema. Los sistemas en el medio, es decir entre el orden y el caos, pueden presentar una mayor flexibilidad y organizar un mejor comportamiento. Por lo tanto, la auto-organización necesita encontrar un equilibrio entre sin ningún orden y mucho orden. La manera más común de formalizar la noción de “orden” es asociarla con la entropía²⁸ del sistema.
- *Autonomía*: No todo aumento del orden es auto-organización. La segunda característica importante de la auto-organización, como lo hemos venido acotando, es la ausencia de control externo. Un sistema debe organizarse sin interferencia desde el exterior. En este caso la noción de “frontera del sistema” es muy importante: para ser capaz de decir si un determinado sistema es auto-organizado se deben poder definir claramente las fronteras del mismo.
- *Adaptación (aprendizaje, evolución)*: es el proceso de cambios en el sistema para hacer frente a cambios de su entorno. Así, la adaptación le permitirá al sistema modificarse para “estar” mejor dentro del ambiente. Esta adaptación implica la necesidad de que el sistema sea capaz de exhibir una gran variedad de comportamientos. Esto es fundamental en la auto-organización, ya que es lo que permite la

²⁸ Normalmente se usa el concepto de entropía estadística (H), el cual puede ser aplicable a cualquier sistema cuyo espacio de estado (S) puede ser definido. El expresa el grado de incertidumbre que se tiene sobre el estado del sistema en términos de una distribución de probabilidad P que indica como “cada sistema tiende a su más probable estado”:

$$H(P) = -\sum_{s \in S} P(s) \log(s).$$

evolución hacia un atractor determinado en el espacio de estados²⁹. Para adaptarse el sistema tiene que hacer frente al problema de selección entre sus comportamientos.

- *Robustez*: es la capacidad de adaptabilidad del sistema ante la presencia de perturbaciones, errores, etc. Un sistema es robusto si continúa funcionando frente a perturbaciones. La robustez permite que el sistema soporte perturbaciones sin perder su función o propósito. Esto se puede alcanzar con estrategias de modularidad, redundancia, entre otras. La modularidad puede ser útil para prevenir la propagación del daño en un sistema. La redundancia es cuando hay varias copias de un tipo de elemento, de modo que si uno falla otros puedan tomar su papel. Los sistemas auto-organizados utilizan combinaciones de esas estrategias para mantener su integridad ante cambios inesperados.
- *Anticipación (cognición)*. El sistema predice los cambios de su entorno para enfrentarlos, y por consiguiente ajustarse. Éste es un caso especial de adaptación donde el sistema no requiere experimentar la situación para responder a ella. La anticipación prepara al sistema para los cambios antes de que ocurran, adaptando el sistema sin que llegue a estar perturbado.
- *Dinámico*: Debido a su cualidad de adaptabilidad a un contexto (que puede estar en permanente evolución), la auto-organización tiene que ser dinámica, tal que cambios en el entorno influyan en la organización. Una propiedad esencial de la auto-organización es la de ser un proceso. De esta manera, a fin de adaptar el sistema a su entorno, requiere de procesos que se encarguen de los cambios requeridos. A eso nos referimos como auto-organización.

La auto-organización requiere de cuatro insumos [137]:

- *Retroalimentación Positiva*. En la sección 3.4 se explica la misma, pero básicamente es la que permite la creación de estructuras.
- *Retroalimentación Negativa*. En la sección 3.4 se explica la misma, pero básicamente se combina con la retroalimentación positiva para estabilizar un patrón colectivo.
- *Amplificación de las Fluctuaciones (Aleatoriedad)*. No sólo las estructuras emergen a pesar de la aleatoriedad, sino que la aleatoriedad es funda-

²⁹ Hay diferentes tipos de atractores: un punto de atracción (que permite sólo un comportamiento), atractor caótico (que permite una variedad muy grande de conductas), etc.

mental ya que permite que nuevas estructuras se desarrollen aumentando su capacidad de adaptación (por ejemplo, una hormiga que se pierde al seguir un rastro de su colonia, favorece la exploración de nuevas áreas, eventualmente encontrando fuentes de alimento no explotadas).

- *Múltiples Interacciones.* la auto-organización generalmente requiere de una densidad mínima de elementos/individuos capaces de hacer uso de los resultados de sus actividades, como también de las de los otros (por ejemplo, redes de rastro de hormigas se auto-organizan porque ellas usan su feromona como el de las otras hormigas).

En resumen, la esencia de la emergencia es la existencia de un comportamiento global nuevo, diferente del de los elementos constitutivos del sistema. La esencia de la auto-organización es un comportamiento adaptable que de forma autónoma adquiere y mantiene un orden (es decir, una estructura). Veamos sus similitudes y diferencias. En cuanto a las diferencias entre ambos conceptos tenemos que ambos enfatizan en aspectos distintos del comportamiento de un sistema (en un caso novedad radical, efecto Micro-Macro, entre otros; en el otro caso aumento del orden, autonomía, entre otros). La principal similitud es que la emergencia y la auto-organización son procesos dinámicos que surgen con el tiempo, que le confieren robustez a un sistema. Sin embargo, la robustez en la emergencia se basa en que la falla de una parte del sistema no resulta en una falla general de la propiedad emergente, mientras que en la auto-organización se basa en la capacidad de adaptabilidad al cambio y de aumento del orden. Ambos conceptos se complementan entre sí, cuando se combinan, haciendo cada uno hincapié en diferentes características de un sistema. Pero también, ambos conceptos pueden existir aisladamente, veamos algunas situaciones posibles:

- *Auto-organización sin emergencia.* Por ejemplo, un sistema auto-organizado sin ningún efecto micro-macro (ver figura 3.1). En general, como hemos dicho antes, las propiedades específicas para la emergencia, pero no necesarias para la auto-organización, son la novedad radical, el efecto micro-macro, la flexibilidad y el control descentralizado. Cuando una de estas propiedades no está presente no tenemos emergencia. Otra propiedad importante de los sistemas emergentes es que cada entidad, individualmente, no es esencial para el funcionamiento de todo el sistema. Un sistema auto-organizado en el que cada entidad es esencial, no se ajusta a las características necesarias para la emergencia.

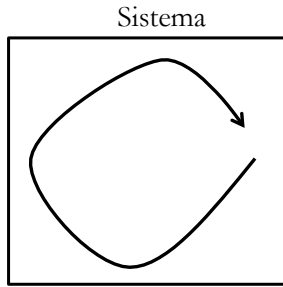


Figura 3.1 Sistema auto-organizado no emergente

- *Emergencia sin auto-organización.* Por ejemplo, el sistema tiene un efecto micro-macro, pero no es auto-organizado (ver figura 3.2). Las propiedades esenciales de la auto-organización son: el incremento en el orden del sistema, control no externo y capacidad de adaptación. La emergencia sin la auto-organización (sin esas propiedades), es definitivamente posible. Por ejemplo, un gas material que tiene un cierto volumen en el espacio. Ese volumen es una propiedad emergente que resulta de las interacciones (es decir, atracción y repulsión) entre las partículas individuales. Sin embargo, ese gas se encuentra en un estado estacionario (las partículas pueden cambiar de lugar, pero la estructura sigue siendo la misma). En este caso tenemos un sistema cuyas condiciones iniciales son suficientes para mostrar las propiedades emergentes. Otro ejemplo es un sistema caótico, que muestra una gran variedad de comportamientos cambiantes constantemente, que surgen de las interacciones entre las partes a nivel micro. Tal sistema no es auto-organizado, ya que no se organiza para promover una función específica.

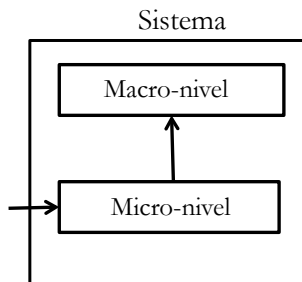


Figura 3.2 Sistema Emergente no auto-organizado

- *Combinación de la emergencia y auto-organización:* En la mayoría de los sistemas que se consideran en la literatura, la emergencia y la auto-organización se presentan juntas. La auto-organización requiere un aumento en el orden que promueva una cierta función o propiedad. Por otro lado, debido a la complejidad de muchos sistemas, es imposible imponer una estructura inicial del sistema, resultando en una propiedad emergente. También, la única posibilidad de obtener un comportamiento coherente en el nivel macro, es dejar que el comportamiento surja y se organice de forma autónoma, es decir, auto-organizadamente. Ahora bien, la combinación de la auto-organización y la emergencia de un sistema, impone la pregunta sobre cómo ambos fenómenos deben estar vinculados entre sí. Una primera posibilidad es considerar la auto-organización como una causa, es decir, las propiedades emergentes en sistemas complejos, son el resultado de un proceso de auto-organización. Así, las interacciones entre las entidades individuales, son el proceso de auto-organización. La auto-organización se encontraría en el nivel micro del proceso emergente. Una segunda posibilidad es ver la auto-organización como un efecto, es decir, los resultados de la emergencia es la auto-organización (en este caso, la auto-organización es una propiedad emergente). La figura 3.3 ilustra eso: “... el comportamiento auto-organizado se produce en el nivel macro”. Este punto de vista se explica porque en un sistema emergente, a menudo, en el nivel micro la dinámica es muy complicada y desordenada, y en el nivel macro se aumenta el orden, es decir, es más organizado. Hay una característica que es propia de la combinación de los dos fenómenos, *la no linealidad*. La no linealidad permite los efectos secundarios en el macro-nivel (lo que llamamos emergente), y se realiza generalmente a través de la retroalimentación positiva (por ejemplo, la auto-catálisis) [54]: las primeras amplificaciones de nuevo generan una retroalimentación positiva que amplifica los cambios iniciales; y después de cierto tiempo, los componentes se “alinean” ellos mismos a la configuración creada por los cambios iniciales (la evolución de la configuración se detiene). Esta alineación es a menudo la propiedad emergente del sistema (es decir, el sistema emergente se auto-organiza). En una “alineación” no-lineal con retroalimentación positiva, la única posibilidad para escapar de esa alineación, y terminar en una nueva alineación que se adapte a la nueva situación que se le presente al sistema, es con el uso

de la retroalimentación negativa. De esta manera, en sistemas auto-organizados complejos habrá varios bucles positivos y negativos entrelazados, tal que los cambios en algunas direcciones se amplifican, mientras que los cambios en otras direcciones se suprimen. La presencia de la retroalimentación positiva y negativa es importante para el comportamiento adaptativo del sistema (lo veremos más adelante). Así, un sistema emergente auto-organizado, implica que la emergencia debe ser adaptable a fin de tener un sistema que se auto-organiza en presencia de una situación cambiante.

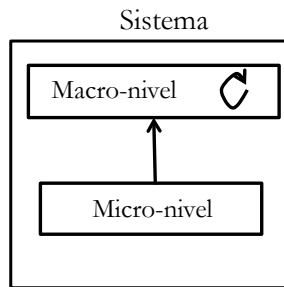


Figura 3.3 Sistema en que la auto-organización es el resultado de la emergencia

Para culminar esta sección, veamos algunas definiciones y aspectos sobre auto-organización y emergencia en las áreas de inteligencia colectiva y ciencias de la computación: En el área de la inteligencia colectiva, según [29], la auto-organización es un proceso en el que el patrón³⁰, en el nivel global de un sistema, emerge de las interacciones entre los componentes de nivel inferior del sistema. En este caso, combinan ambos fenómenos en uno sólo, y consideran la auto-organización como un efecto, es decir, la emergencia resulta en auto-organización (segundo punto de vista discutido anteriormente). De esa manera, la auto-organización es definida, como la emergencia espontánea de una organización a nivel del sistema, a partir de las interacciones locales entre las sub-unidades que lo conforman, sin codificarse explícitamente a nivel local la estructura producida [3]. En ciencias de la computación se consideran ambos fenómenos separadamente [92], con la idea de combinarlos a nivel de aplicación. Según [1, 22], la auto-organización se refiere al proceso en el que la estructura interna de un sistema aparece autónomamente sin un

³⁰ Arreglo organizado de objetos en el espacio y/o tiempo.

control explícito o restricciones desde fuera del sistema. Las dinámicas del sistema modifican su entorno, y las modificaciones del entorno influyen en el sistema sin alterar sus mecanismos internos. El sistema evoluciona dinámicamente en tiempo y/o espacio, este puede mantener una forma estable o puede mostrar fenómenos transitorios. Con respecto a la emergencia, la refieren al hecho que una estructura, sin explícitamente estar representada en un nivel bajo, aparece en un nivel más alto. Adicionalmente, la emergencia es usualmente relacionada a la noción de crear nuevas propiedades, propiedades de un sistema que no están presentes en el nivel más bajo sino que son producto de las interacciones de sus elementos, por lo tanto no pueden ser predichas antes que ellas hayan sido observadas [97]. La combinación de la emergencia y la auto-organización ha sido usada para el diseño e implementación de sistemas de gran escala, como por ejemplo un Sistema Multi-Agentes (SMA) [94]. En un SMA la complejidad es enorme, lo que hace inviable imponer una estructura a priori: el sistema necesita auto-organizarse. Además, por problemas de escalabilidad, no se puede tener un plan completo global, en una sola entidad: tenemos que dejar que el comportamiento emerja, desde las interacciones entre sus entidades. Este es el reto en la implementación de los futuros SMAs.

Hemos mostrado que los dos conceptos son importantes, pero desde nuestra óptica se refieren a dos fenómenos distintos. Cada uno de ellos enfatiza diferentes características de un sistema. La emergencia hace hincapié en la presencia de una novedad coherente que emerge a nivel macro (propiedad, comportamiento, estructura, patrón, etc.), como resultado de las interacciones entre las partes a nivel micro. La auto-organización hace hincapié en la dinámica y adaptativa del sistema para aumentar su orden o estructura, sin control externo. Ambos fenómenos pueden existir en forma aislada, sin embargo, una combinación de ambos está a menudo presente en los sistemas dinámicos complejos.

3.2 Autopoyesis

La autopoiesis proviene del griego ‘auto’ y ‘poiesis’ (producción, creación). Se define como una propiedad de un sistema para producirse por sí mismo (o también mantenerse, definirse a sí mismo). El concepto de autopoiesis nació con Maturana y Varela en 1972 [118, 119]. De acuerdo

con Varela [195], “un sistema autopoietico se organiza como una red de procesos de producción de componentes que pueden:

- Actualizar continuamente sus estructuras y sus interacciones en la red que las produjo
- Representar el sistema como una unidad concreta en el espacio donde existen, especificando el dominio topológico donde se presentan como red”.

De esta manera, un sistema autopoietico se organiza como una red de procesos de producción de componentes que:

- Se regenera continuamente y se da cuenta de la red que lo produce,
- Se constituye como una unidad distinguible en el dominio en el que existe.

Así, el término Autopoiesis ha sido acuñado para describir la capacidad de un sistema para generar su constitución específica [118, 119, 195]: sus componentes (estructura) y sus interacciones (organización). Es decir, la teoría de autopoiesis se refiere a un continuo auto-hacerse desde procesos locales. Ella está vinculada a aspectos como la emergencia desde un proceso de abajo hacia arriba, con un espontáneo orden del desorden (fenómeno sinérgico). Así, la idea de la autopoiesis es que los elementos de un sistema, son producidos y reproducidos dentro del sistema mismo.

En específico, Maturana y Varela usaron el término de autopoiesis para caracterizar sistemas que [118, 195]:

- Mantienen la definición de su organización, a pesar de perturbaciones del medio ambiente
- Regeneran sus componentes en el curso de su operación

La primera condición es una propiedad general de un sistema auto-organizado, mientras que la segunda es más específica a la autopoiesis. Un sistema auto-organizado mantiene su organización, pero no regenera sus propios componentes. Así, la autopoiesis es más que la auto-organización.

El ejemplo clásico de un sistema autopoietico es la célula biológica. La célula biológica está hecha de componentes bioquímicos diferentes (ácidos nucleicos, proteínas, etc.), y está organizada según diferentes estructuras. Estas estructuras, basadas en las moléculas que la componen y la energía “producida” por los flujos de sus componentes, se mantienen y crean nuevos componentes.

Ahora bien, el término permite describir dinámicas estructurales, con momentos de inestabilidad, es decir, estados organizados que se mantienen estables durante largos períodos de tiempo. Algunos conceptos cercanos a este término son, auto-catálisis, auto-referencia, etc. El término, según Maturana y Varela, tiene varios aspectos a considerar [118, 195]:

- Autopoyesis es más que auto-organización, ya que establece que los elementos pueden auto-crearse. Dentro de un sistema autopoietico no hay separación entre productor y producido. Su funcionamiento interno determina la construcción de los nuevos elementos, sus características, etc.
- La autopoyesis ve la realidad del mundo como un todo, y está basada en las ideas de autonomía y de irreductibilidad de los sistemas.
- Un sistema autopoietico es un sistema abierto energéticamente, dependiendo de ser suplido externamente, pero operacionalmente cerrado.
- La auto-reproducción no está vinculada a específicas estructuras físicas, porque las estructuras pueden cambiar dinámicamente cuando el sistema opera.
- Los elementos de un sistema autopoietico son constituidos por el sistema mismo.
- La interpretación entre diferentes estructuras del sistema, siempre ocurre en el mismo sistema.

Según Maturana, las características de un sistema autopoietico son las siguientes [118]:

- *Autonomía*: integra mecanismos para su auto-mantenimiento.
- *Individualidad*: tiene su identidad, independiente de las acciones mutuas entre él y los observadores externos.
- *Auto-determinación de los límites del sistema*: determina su frontera a

través de sus procesos de reproducción.

- *Ausencia de entrada y salida en el sistema:* Incluso, si un estímulo independiente del sistema autopoyético produce cambios continuos en el sistema, estos cambios están subordinados al mantenimiento de su organización. Así, los sistemas no reciben entradas (los estímulos los percibe, y en consecuencia actúa) ni produce salidas.

Una teoría alrededor de este concepto interesante es la de H. Kawamoto [101]. Kawamoto afirma que “un sistema autopoiético es una red compuesta por las relaciones entre los procesos de producción de componentes. ... El sistema sólo existe si las componentes se reproducen en la red social de los procesos de producción. La estructura del sistema es una realización del sistema a través de la operación del sistema en el espacio físico, y la organización del sistema es una forma de la red. La organización es funcionalmente especificada, y la estructura se realiza en el espacio físico” [101]. Esta definición de Kawamoto tiene una implicación importante: la organización de un sistema difiere de la estructura, ya que existen en niveles diferentes. La figura 3.4 muestra este aspecto.

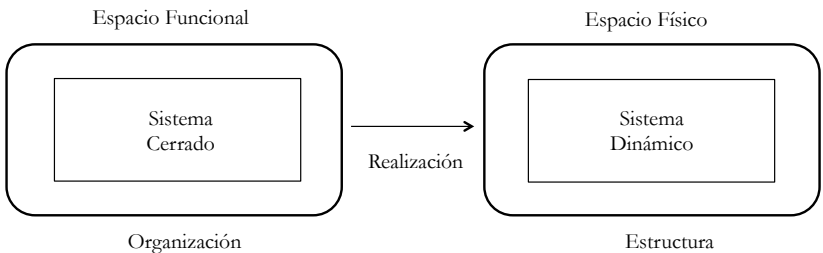


Figura 3.4. Diferencia entre la organización y la estructura de un sistema

Desde la teoría de sistemas, este paradigma está directamente relacionado con el concepto de *auto-referencia*. Auto-referencia es la capacidad del sistema para utilizar, de forma recursiva, la imagen que tiene de sí mismo, y es la condición para el surgimiento del concepto de autopoiesis en los sistemas. Esto amplía el concepto de auto-organización, que se ve limitado “sólo” a la estructura del sistema. Los sistemas autopoiéticos, según Maturana, basado en la idea de auto-referencia, se definen “como redes de producción de componentes que, por sus interacciones, generan de forma recursiva la

red que los produce y constituye, en el espacio en el que existen, y los límites de la red son elementos que intervienen en la construcción de la red” [118]. La presencia de un medio ambiente es esencial para la formación de un sistema auto-referente, ya que sin él no hay diferencia posible.

El concepto de autopoiesis fue pensado originalmente para definir qué es la vida, o lo que hace que algunos sistemas estén vivos. Según [18], el uso literal del concepto de autopoiesis en el campo de las ciencias sociales se enfrenta a un gran problema, a la dificultad de aplicar el modelo de reproducción biológica en un sistema social: “la reproducción social es una metáfora, una extensión indebida de la reproducción biológica, porque los resultados de la reproducción biológica es la creación de otra persona biológica, espacialmente separada de sus padres. En verdad, la sociedad no se reproduce porque, normalmente, no da lugar a una sociedad *separada físicamente* (con algunas excepciones)”.

Luhmann dio solución a ese problema diciendo que el concepto de autopoiesis en los sistemas sociales y psíquicos sigue un camino diferente [18]. El reconoce que hay sistemas autopoieticos de vida, pero el supone que hay otros donde la vida no es el modo de reproducción (abandona la premisa aristotélica de que los sistemas sociales y psíquicos son sistemas vivos). A partir de ahí, Luhmann define los sistemas sociales y psíquicos como sistemas autopoieticos no vivos, cuyo modo de auto-reproducción no es “la vida” [112, 113, 114]. Según Luhmann, el elemento básico de los sistemas sociales es la comunicación, mientras que en los sistemas psíquicos son los pensamientos. Tanto los pensamientos como las comunicaciones se producen y reproducen de forma recursiva, y en el caso de las comunicaciones, desde una red de comunicaciones que no puede existir fuera de ella. Hablar sobre el sistema social es, por lo tanto, hablar de un sistema de comunicaciones compuesto exclusivamente de comunicaciones. La naturaleza del evento de comunicación presupone el concepto de autopoiesis, es decir, el sistema es necesario para reproducirse constantemente. Ahora, el evento, por definición, es único y efímero: sólo pasa una vez y desaparece de inmediato. El sistema de comunicación de cualquier sistema social, por lo tanto, se enfrenta a un peligro constante: eventos que desaparecen tan rápidamente como aparecieron. Como resultado, la disolución continua del sistema se convierte en una causa necesaria de la reproducción autopoietica [112, 113, 114].

Luhmann señala que sólo la comunicación es necesaria e inherentemente social [112, 113, 114]: “la comunicación permite diseñar sistemas sociales como sistemas autopoieticos”. En el acto de comunicación, se da la comunicación del significado de la acción o de la intención del actor, y también, la comunicación de la definición de la situación, en espera de ser comprendido y aceptado, etc. Así, para Luhmann, comunicación y acción son complementarias. Por otro lado, Luhmann hace una distinción clara entre “auto-organización” y “autopoiesis” [93], indicando que la auto-organización es estructural (se concentra en la formación de estructuras), y la autopoiesis se concentra en el sistema de auto-formación. Luhmann indica que [93]: “La autopoiesis es diferente a la auto-organización (produce en el tiempo sus propias estructuras) ya que caracteriza a sistemas que se auto-referencian ... Todo lo que es utilizado por el sistema referencia a el sistema mismo”. De esta manera, los elementos de los sistemas autopoieticos son constituidos por el propio sistema, no son importados. Además, en un sistema autopoietico lo que existen son eventos momentáneos que no tienen una duración. Los eventos (elementos) desaparecen tan pronto como se realizan. En consecuencia, el sistema debe continuar la producción de los elementos, con el fin de mantener su existencia. En este sentido, la autopoiesis intrínsecamente, implica una relación circular entre el sistema y sus elementos.

También, el concepto de sistemas creativos ha sido vinculado al de un sistema autopoietico [93]. La creatividad ha sido definida en [93] como “la novedad en un producto”. Durante las últimas décadas, los científicos han tratado de hacer una medición de la creatividad, sin embargo, resulta difícil, debido a la naturaleza contingente de la creatividad. Incluso, investigando los detalles de un proceso creativo no se podría extrapolar a otros. En otras palabras, un proceso creativo no sigue necesariamente leyes deterministas ni necesariamente suceden al azar. Además, el proceso creativo a menudo se basa en varios descubrimientos, y tienden a contener no sólo las buenas ideas, sino también equivocadas o inútiles ideas³¹. Por otro lado, la colaboración aporta un valor añadido a la creación. La creación a través de la colaboración, nos lleva a la emergencia. La colaboración impulsa la creatividad, al fomentar la generación de chispas más allá de las mentes individuales.

³¹ Por ejemplo, Charles Darwin produjo muchas ideas equivocadas antes de llegar a las conclusiones que lo hicieron famoso.

Otra aproximación interesante a la autopoyesis es desde el punto de vista de la teología, particularmente, como ella concibe el modelo que relaciona Dios con el proceso de creación natural. En ese modelo, el concepto de autopoyesis aparece entendido como auto-creación o auto-reproducción [80]. Ese modelo es basado en las siguientes hipótesis:

- Si Dios es el creador y el proceso autopoyético es natural, entonces Dios es el creador de ese proceso.
- Dios es creativo al soportar y estimular el proceso de autopoyesis. Dios soporta el proceso de autopoyesis al concebir las dinámicas que permiten la creación, y lo estimula al generar las causas de dicho proceso.

Desde las diferentes visiones del concepto autopoyético, podemos concluir que no toda emergencia es autopoiética, ni todo proceso autopoyético es emergente. Un sistema emergente será autopoyético, si lo que emerge es su auto-creación desde su auto-referencia; y un sistema autopoyético será emergente, si la auto-creación es una novedad, producto de las interacciones de sus componentes (irreducible a ellos).

3.3 Estigmergia

El término de estigmergia fue introducido por Grassé para describir una forma de comunicación indirecta mediada por modificaciones al medio ambiente que observó en dos especies de termitas [79]. El término estigmergia viene de los términos griegos “marca” (estigma) y “trabajan” (ergon). Aunque Grassé lo introdujo para explicar el comportamiento de las sociedades de termitas, ese término después fue usado para describir esa forma de comunicación que se observa también en otras sociedades de insectos (avispa, abejas, hormigas, etc.). Es la base del proceso de cooperación en las sociedades de insectos, que consiste en complejas interacciones indirectas basadas en simples sistemas de señalización. La estigmergia permite concebir un mecanismo de retroalimentación basado en esas interacciones indirectas entre los agentes y el entorno, que permite alcanzar formas emergentes de comportamiento coordinado, a nivel de la sociedad [23]. Ese mecanismo usa el entorno como medio de inscripción de los efectos de comportamientos pasados para influir en el futuro y en un proceso auto-catalítico³² [85].

³² Un proceso auto-catalítico es un proceso que entre más ocurra más probable es que continúe ocurriendo en el futuro [1].

Así, “un proceso es estigmérgico si la obra (“ergon” en griego), realizada por un agente proporciona un estímulo (“estigma”) que atrae a otros agentes para continuar con el trabajo” [23]. La estigmérgica permite establecer la siguiente forma de coordinación: cada insecto (hormigas, abejas, etc.) influye en la conducta de otros insectos mediante el uso de artefactos como medios de comunicación indirecta (por ejemplo, trazas de productos químicos o material de construcción del nido). La acción de un actor produce cambios en el medio ambiente, y estos cambios pueden proporcionar un estímulo para que otros actores respondan con otra acción provocada por la anterior, y así sucesivamente. De esta manera, las huellas dejadas por un individuo, o el resultado de su trabajo, pueden actuar como una fuente directa de estímulo para los demás. Ese proceso permite la construcción de estructuras complejas, sin coordinación central ni comunicación directa.

La racionalidad estigmérgica social explica, cómo agentes simples, sin deliberación, comunicación directa ni coordinación central, pueden contribuir a un resultado común simplemente respondiendo a los estímulos proporcionados por otras personas o por el medio ambiente. El mecanismo fundamental es que el ambiente, que es utilizado como medio compartido para almacenar la información que es interpretada por los agentes [146]. A diferencia de un mensaje hablado que se dirige a un agente en particular en un momento específico, una señal estigmérgica puede ser usada por el individuo en cualquier momento. Un mensaje hablado que no alcanza a su destinatario o no se entiende, se pierde. Una señal estigmérgica es almacenada en un medio estable que es accesible a todos. La señal estigmérgica funciona como una memoria a largo plazo para el grupo.

También, algunos autores, como Leslie et al. [109], han hablado de objetos estigmérgicos. La diferencia entre el objeto de Leslie y la señal estigmérgica de Grassé, es que el objeto funciona como una memoria cuyo estado cambiante representa la situación actual, mientras que la señal va acumulando los cambios anteriores por sus actualizaciones constantes. En ambos casos, las acciones coordinadas exhibidas por los individuos de un enjambre (multitudes de pájaros, banco de pescados, manadas de ovejas, etc.), son en reacción al estado percibido por los individuos, y las mismas se dan “en tiempo real”. Un ejemplo típico de proceso estigmérgico basado en objetos se da en un juego de fútbol. Los jugadores de fútbol necesitan raramente comunicarse directamente (además, muchas

veces es penalizado), se coordinan porque todos se centran en la posición y en el movimiento del balón. El estado del balón les incita a ejecutar acciones particulares (por ejemplo, ir hacia el balón, pasarlo a otro jugador, etc.). Así, el balón funciona como un objeto estigmérgico³³. Un ejemplo típico de proceso estigmérgico basado en señales estigmérgicas es lo que ocurre en las sociedades de insectos, a través del feromona que ellas dejan (en el capítulo 4 se estudia ese proceso).

En general, en la estigmergia se pueden dar dos situaciones [79]:

- Una en la que la comunicación es a través de la modificación de un entorno físico. Un ejemplo es la construcción de senderos/caminos. Por ejemplo, al mirar un parque, un espacio público, y ver la grama/hierba desgastada, nos revela un camino de tierra no planificado (insinúa un acceso directo no oficial a un destino).
- Otra en la que la comunicación es a través de una marca de un mecanismo de señalización. Un ejemplo típico es el feromona en los insectos sociales. El feromona aumenta la probabilidad que otras hormigas hagan una actividad dada. A diferencia de la anterior, las marcas no contribuyen directamente a una tarea determinada (en el caso anterior, el paso nuestro por el camino ayuda a desgastar la hierba, es decir, a concebir el camino).

La estigmergia en sus primeras formulaciones se definió como una clase de mecanismo que media las interacciones animal-animal, fundamental para el logro de formas emergentes de coordinación de comportamiento a nivel de una sociedad de insectos [15]. Ese concepto resuelve la paradoja siguiente: por una parte, los grupos de insectos sociales parecen cooperar en forma organizada, coordinada; y por otra parte, cada individuo parece trabajar como si estuviera solo, sin interactuar con los demás, ni participar en cualquier comportamiento colectivo. La explicación a esa paradoja de coordinación estigmérgica es [15]:

³³ Otro ejemplo es cuando tomo uno de dos vasos en una mesa para beber. No estoy explícitamente comunicándome con mi amigo en el otro lado de la mesa (diciéndole “toma el otro vaso”). Estoy simplemente tomando el vaso. Sin embargo, mi amigo puede interpretar mi acción en el espacio de trabajo compartido como una comunicación implícita, y podría, por ejemplo, entender que puede tomar el otro vaso.

- Los insectos interactúan indirectamente: cada uno de los insectos (hormigas, abejas, termitas) afecta la conducta de otros insectos a través del medio ambiente.
- El medio ambiente no es simplemente un paisaje pasivo, donde todas las interacciones se producen, sino más bien es un mediador, donde las reglas de interacción se dan.
- La interacción estigmérgica se produce localmente, y afecta directamente a una parte del medio ambiente.
- El medio ambiente es visto limitado a elementos bien definidos (por ejemplo, feromona, nido, etc.) que encapsulan la lógica de la interacción local.

De esta manera, la estigmergia describe cómo los individuos pueden afectar el comportamiento de otros, y el suyo, a través de objetos productos de su propia actividad. La estigmergia a menudo está asociada con la flexibilidad: cuando el medio ambiente cambia a causa de una perturbación, los insectos responden adecuadamente a la perturbación.

De manera general, se podría decir que este concepto fue introducido para explicar la coordinación mediada por artefactos [150]. Ellos se refieren a un tipo de *cognición interactiva* (basada en las interacciones) que produce un mecanismo de coordinación (el comportamiento se encuentra coordinado a nivel de la sociedad). La interacción es la acción de un individuo tal que puede influir y modificar el comportamiento de otro individuo. Hablamos de un fenómeno de interacción social, formando un puente entre el individuo y el nivel social. El producto de ese fenómeno social es emergente, sin control social, mediado por las características del medio ambiente. Ese fenómeno colectivo permite alcanzar metas.

Otro aspecto a resaltar es que la estigmergia se basa en la *noción de estímulo-respuesta*: la acción de un individuo afecta el medio ambiente, que estimula a actuar a otros individuos. De esa manera, la secuencia de estímulos-respuestas altera constantemente al estímulo. Ahora bien, en algunos casos, el estímulo varía de tal manera cuantitativamente que altera la probabilidad de provocar las futuras respuestas de los individuos (por ejemplo, a veces es tan grande el rastro de feromonas que genera un comportamiento pseudo-determinista) [27]. Este mecanismo ha sido denominado por Bonabeau y Theraulaz como *estigmergia cuantitativa*, y es caracterizado por la retroalimentación positiva y las

transiciones de fase (debido a que la estigmergia es típica de sistemas multi-estacionarios, que se encuentran en situaciones de inestabilidad). En otros casos, los estímulos pueden cambiar de manera cualitativa (por ejemplo, formas de estructuras, etc.), y al igual que antes, pueden provocar diferentes respuestas. Pero este último tipo de estímulo no permite generar un tipo de retroalimentación positiva, y por consiguiente, no se considera un ingrediente para la emergencia.

Las características generales de un sistema estigmérgico son [87, 109, 185]:

- Un medio ambiente (que puede ser virtual) parcialmente perceptible.
- Una multiplicidad de agentes que lo pueblan.
- Las características emergentes surgen de las interacciones entre los agentes y con el medio ambiente, características que no son ni predecibles ni reducible a sus componentes.
- El comportamiento de los agentes es afectado por los cambios en el medio ambiente.

Normalmente, en los sistemas donde existen procesos estigmérgicos, son sistemas compuestos por agentes simples y homogéneos, sin habilidades cognitivas (agentes no racionales), que interactúan a través de modificaciones locales al medio ambiente, dando origen a estructuras, comportamientos, o propiedades globales. Algunos autores han explorado el uso de estigmergia en el contexto de sociedades compuestas por agentes cognitivos/racionales, como un medio de apoyo a actividades sociales basadas en el conocimiento [150]. En esos casos, para los agentes, los patrones que aparecen en el medio ambiente tienen más sentido, debido a su conciencia y a su capacidad de análisis (pueden interpretarlos, etc.). Ellos se refieren a este tipo de estigmergia como *estigmergia cognitiva*. La estigmergia cognitiva se basa en el uso de los artefactos que forman parte del medio ambiente, por parte de una población de individuos inteligentes, de manera compartida y racional, según sus objetivos. Los artefactos son usados como medios de comunicación indirecta con contenido semántico en el medio ambiente de trabajo que comparten los individuos, alcanzado dicha población un fluido espacio creativo colaborativo como en el caso de las sociedades de insectos.

En general, el concepto de estigmergia está muy vinculado a la emergencia, debido a que las interacciones, en este caso indirectas, son ne-

cesarias para la creación de un “patrón” en un nivel macro [185]. Este patrón puede consistir en una estructura física espacio-temporal, o un comportamiento, y este patrón es “emergente” sin poder deducirse desde los componentes de bajo nivel o la naturaleza de las interacciones. En el caso de la estigmergia, la emergencia implica que hay algún tipo de interacción aditiva, no lineal, involucrada; lo que conlleva a un proceso de retroalimentación positiva. Además, pueden haber múltiples tipos de interacciones, enriqueciendo el fenómeno emergente. Ahora bien, la emergencia de patrones surgirá sólo cuando se pase un cierto número o densidad de interacciones o componentes.

Como expresamos al inicio, el ejemplo típico de estigmergia es el de la construcción de nidos por las termitas, es el ejemplo original utilizado por Grassé para introducir el concepto. En ese caso, las termitas trabajadoras usan granos del suelo, que los impregnan de feromona para construir pilares. Dos fases sucesivas tienen lugar durante la construcción. En primer lugar, una fase no coordinada que se caracteriza por un depósito al azar de arena. Esta fase dura hasta que uno de los depósitos alcanza un tamaño crítico. Entonces, una fase de coordinación comienza cuando el grupo de constructores es suficientemente grande. En esta fase los pilares surgen, ya que la existencia de un depósito inicial de granos del suelo estimula a los trabajadores a acumular más material, a través de un mecanismo de retroalimentación positivo (la acumulación de material refuerza el atractivo de los depósitos, a través de la difusión de la feromona emitida por dichos depósitos). Las termitas son atraídas por el olor, lo que conlleva a que depositen con más frecuencia para formar pilares, arcos, túneles y habitaciones). Este efecto bola de nieve auto-catalítico lleva a la fase coordinación (ver figura 3.5). Si la densidad de los constructores es demasiado pequeña, la feromona desaparece entre dos sucesivos pasajes de los trabajadores, y el mecanismo de amplificación no puede trabajar, lo que lleva a un comportamiento no-coordinado. Este ejemplo ilustra la retroalimentación positiva (el efecto bola de nieve), la retroalimentación negativa (deterioro de feromonas), la amplificación de las fluctuaciones (pilares podrían surgir en cualquier lugar), las interacciones múltiples (a través del medio ambiente), el surgimiento de la estructura (es decir, los pilares) la multi-estabilidad (los pilares pueden surgir en cualquier lugar), en un medio homogéneo (es decir, una distribución espacial uniforme de arena), a través de un proceso estigmergico de coordinación entre los trabajadores.

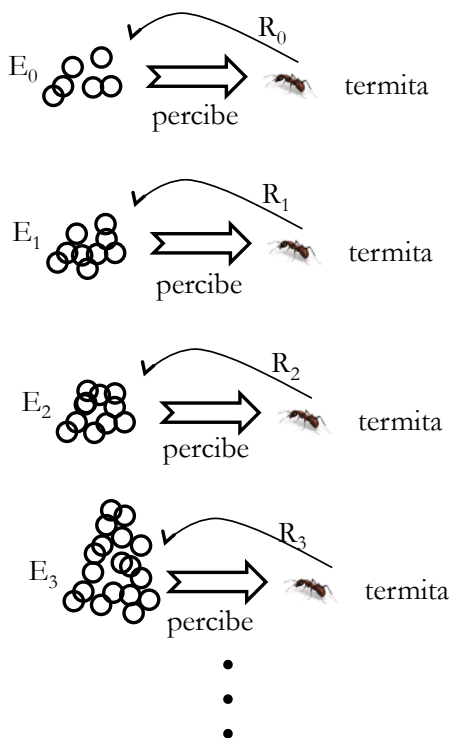


Figura 3.5. Ejemplo de un proceso estigmérgico en la construcción de pilares en las termitas (E_i : estado actual, R_i : respuesta de la termita).

Grassé puso de manifiesto que la coordinación y regulación de las actividades de construcción, no dependen de los propios trabajadores, se consiguen, principalmente, a través de la estructura del nido: una configuración estimulante desencadena las respuestas de los trabajadores, la transformación de la configuración en otra configuración puede desencadenar, a su vez, otras acciones, posiblemente diferentes, realizadas por las mismas termitas trabajadoras de la colonia, o por otras.

Como las hormigas amontonan elementos (organismos muertos (cadáveres), larvas, etc.) en sus colonias, es otro fenómeno paradigmático de estigmergia (ver figura 3.6). Una vez más, el proceso estigmérgico trabaja: las hormigas depositan elementos en lugares inicialmente al azar. Cuando las hormigas perciben otros elementos depositados, son

estimuladas para depositar objetos semejantes al lado de ellos, siendo este tipo de organización (agrupación y clasificación) un tipo de conducta adaptativa emergente.

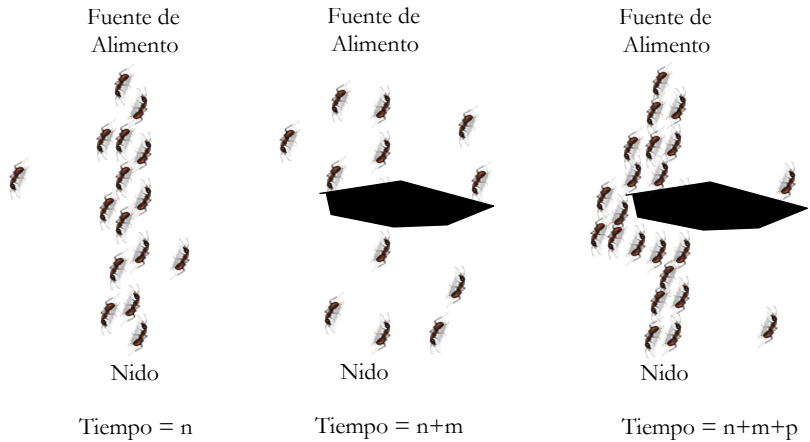


Figura 3.6. Fenómeno de estigmergia en las colonias de hormigas.

La estigmergia (comunicación indirecta) es una forma de coordinación distribuida, eficiente y robusta [5, 65]. Es crucial en sistemas formados por múltiples individuos actuando de forma autónoma, en función de sus propias decisiones individuales. Uno de los principales problemas en estos sistemas, especialmente sistemas de gran envergadura, es la comunicación intensiva, tal que se deban evitar cuellos de botella. Además, es difícil, si no imposible, que cada componente mantenga una comunicación global en un entorno dinámico. Estos aspectos son resueltos eficientemente a través de los mecanismos estigmérgicos [65].

La estigmergia requiere que los individuos tengan la capacidad de detección, la mayoría de las veces, a productos químicos/físicos que actúan como catalizadores [65]. Cada individuo en el ambiente tiene asociado catalizadores precisos (son los que podrá detectar), que pueden ser amplificados o evaporados en el tiempo, para adaptarse a un entorno dinámico. Cada vez que un individuo detecta un objetivo (catalizador), actualiza dicho elemento estigmérgico. Una manera de modelar un proceso estigmérgico es [65]:

$$w_{ij}^k = \left(\frac{\tau_{ij}(t)}{1 + \tau_{ij}(t) / \delta^k} \right)^\lambda \quad (3.1)$$

Esta función mide la probabilidad relativa que un individuo k se mueva a un objetivo (i, j) con una densidad estigmérgica $\tau_{ij}(t)$. El parámetro λ controla el grado de aleatoriedad con que cada individuo sigue el mecanismo estigmérgico; y δ^k denota la capacidad sensorial del individuo k , que disminuye en altas concentraciones de individuos. Para emular la creación, mejora o eliminación de la señal estigmérgica del mundo natural, la densidad estigmérgica $\tau_{ij}(t)$ se debe actualizar usando una ecuación como la siguiente:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + T_{ij}^k \quad (3.2)$$

Donde, T_{ij}^k es la intensidad de la interacción estigmérgica recibida de los individuos vecinos a través del objetivo en (i, j) , que representa el número de individuos que potencialmente están procesando el objetivo (i, j) , y ρ es un coeficiente de evaporación.

En general, la estigmérgica como mecanismo de coordinación social, basada en la interacción a través de modificaciones locales de un entorno compartido, es un mecanismo fundamental de coordinación en el contexto de sociedades y organizaciones, con las siguientes cualidades [150]:

- Las modificaciones al medio ambiente son susceptibles de una interpretación en el contexto de un sistema convencional de signos compartidos,
- Los agentes interactúan en función de las capacidades cognitivas usadas en las interacciones,
- El medio ambiente es un espacio de trabajo compuesto de artefactos necesarios para el proceso estigmérgico (señales u objetos).
- Los artefactos pueden ser adecuadamente diseñados, con el fin de procesar la información cognitiva compartida por los agentes.

La noción de espacio de trabajo ejemplifica claramente la idea de un no trivial, no pasivo, medio ambiente, donde los artefactos representan la

articulación del medio ambiente [109]. Todo comportamiento en esa área de trabajo es susceptible de una interpretación por los observadores, y afecta sus posteriores comportamientos. Por otro lado, detrás de los artefactos, hay implícito un proceso cognitivo: alrededor de ellos se da una actividad inteligente, para hacer que funcionen y comprender sus significados. Los artefactos no tienen objetivos internos, ni presentan un comportamiento pro-activo, simplemente proporcionan a los agentes algún tipo de funcionalidad, que pueden explotar adecuadamente. Entre las principales actividades que se pueden hacer con los artefactos podemos citar [185]:

- *Inspeccionarlos y controlarlos*, tanto a sus estructuras, estados y comportamientos, en tiempo de ejecución,
- *Cambiarlos/ adaptarlos* en tiempo de ejecución, de acuerdo a las nuevas necesidades o acontecimientos imprevisibles que ocurren en el ambiente,
- *Componerlos/ integrarlos* en tiempo de ejecución (composición de artefactos), ampliando la complejidad de la respuesta para proveer la función prevista.

Las formas emergentes de coordinación que se derivan de la estigmergia, parten de que no hay un plan preestablecido para definir exactamente las relaciones entre los agentes y los artefactos del medio-ambiente. Los artefactos son una especie de *conciencia estigmera*, al mantener rastro de las acciones adoptadas por los agentes individuales durante una sesión de trabajo. Particularmente, los artefactos en estigmergia cognitiva buscan, ante todo, promover la conciencia, es decir que los agentes estén perfectamente conscientes de la labor y las prácticas de otros agentes, lo que a su vez podría ser eficaz para conducir y mejorar sus propias actividades [150]. La conciencia es un aspecto clave para apoyar a las formas emergentes de coordinación donde no hay un plan preestablecido, tal que la coordinación surge espontáneamente de las actividades de ellos mismos. Así, la estigmergia es una técnica de coordinación emergente en sociedades compuestas por una gran cantidad de agentes. Los artefactos son abstracciones que median en el medio ambiente para la interacción con el agente, y permiten la coordinación emergente [150]: se pueden utilizar para encapsular y poner en práctica los mecanismos y el conocimiento compartido, en procesos emergentes de coordinación.

En todos los sistemas estigmérgicos, los efectos de las acciones del agente sobre el medio ambiente son entendidos como signos. Una vez creados los signos, persisten de forma independiente de su creador, son observables por los demás agentes, y son objeto de manipulación por parte del medio ambiente, de acuerdo a las leyes que caracterizan los procesos estigmérgicos: difusión, evaporación, etc. En particular, los signos en la estigmergia cognitiva tienen un valor simbólico: contiene información de algún tipo, con un valor semántico (puede referenciar a una ontología, y normalmente se le llama *anotaciones*). Las anotaciones son útiles tanto para objetivar comentarios o reflexiones que no se refieren a un artefacto específico, para expresar un comentario concreto de un artefacto (su utilidad, eficacia, etc.), o para expresar formas de razonamiento basadas en ellas. Los agentes requieren de operaciones para la creación, observación y manipulación (agregación, difusión, selección) de las anotaciones en la estigmergia cognitiva. Existen dos tipos básicos de anotaciones [87]:

- Anotaciones de forma explícita y deliberadamente creadas por los agentes. Estas incluyen, por ejemplo, comentarios del agente (evaluación) sobre un artefacto específico, etc.
- Anotaciones creadas automáticamente por los artefactos de apoyo a sus actividades. Ejemplos incluyen anotaciones sobre la cantidad que se ha utilizado un artefacto (en tiempo, en capacidad, etc.), sobre sus características, etc.

Algunos de los mecanismos básicos estigmérgicos que pueden ser incrustados en los artefactos son [87, 185]:

- *Difusión*: distribución de una señal estigmérgica. Ella se refiere a una regla simple basada en el hecho de que las anotaciones que se refieren a un artefacto en específico, podrían ser útiles también para los artefactos que están directamente vinculados al artefacto.
- *Agregación*: transformación, de forma automática, de un conjunto de anotaciones en una única anotación. Los mecanismos de agregación, que implican una transformación del conocimiento individual en un tipo único de conocimiento social, nos definen un tipo de conocimiento social desde la estigmergia.
- *Selección*: priorización de la información almacenada en los artefactos, según distintos criterios o dimensiones, que pueden ser subjetivos u

- objetivos. Un ejemplo de criterio de selección para un ordenamiento, es la medición de la relevancia de una anotación de acuerdo a su edad.
- *Evaporación o disipación*: es un mecanismo frecuente en estigmergia. Puede ser considerado como un caso específico de selección, donde la información que no se selecciona es olvidada.

La estigmergia puede verse como una forma de inteligencia adaptativa. Ella hace hincapié en la naturaleza distribuida del conocimiento y la cognición. Parte del principio que nadie tiene un conocimiento global, no hay un plan maestro, y gran parte de las acciones futuras dependen de los cálculos que se hagan desde lo que se es observado en los artefactos. Hay algunos *algoritmos de recomendación* que se han inspirado en esa idea, por ejemplo los del tipo filtrado colaborativo (FC) y modelos de grupo (MG). Los de FC tratan de imitar el proceso por el cual, la gente recomienda productos o servicios a otros. Los de FC se ejecutan entre personas similares, agregando puntuaciones a elementos al reconocer que tienen usuarios similares, y genera una recomendación de un nuevo elemento a un usuario, cuyo usuarios similares han estados interesados en ese nuevo elemento. Por el contrario, los de MG plantean la tarea de recomendación como un problema de clasificación. A cada agente se le asigna una categoría, compuesta por agentes de similares perfiles. Entonces, se van asociando elementos a dichas clases, según los intereses individuales que vayan apareciendo (se extrapolan al grupo). Sólo entonces se generan las recomendaciones. Los algoritmos que usa Amazon.com son un ejemplo de una mezcla de las recomendaciones FC y MG. Consideremos un ejemplo: una búsqueda en Amazon por estigmergia devuelve 176 artículos, ordenados por relevancia (diferencia de precios, fecha publicaciones, etc.)³⁴. Amazon los categoriza combinando un filtrado según: “los clientes que han comprado este libro también compraron libro A”, con listas que clasifican a las personas según si están vinculadas a un tema dado, usando un filtro basado en sus compras recientes (material estigmérgico vinculado a los cookies de Amazon en un navegador, si no se han borrado). El proceso estigmérgico del algoritmo de Amazon es claro [109]: un elemento de búsqueda genera un sendero que da lugar a patrones de comportamientos emergentes. En otros términos, las acciones individuales cognitivas (leer la presentación de un libro, decidir comprar ese libro), en un contexto local (la vista del navegador), de un artefacto cognitivo (la página de compra), en el medio ambiente

³⁴ A un usuario que consulta la página de un libro, se le proporciona una lista de otros libros comprados por los usuarios que compraron el mismo libro.

compartido (el sitio web de Amazon), cambian la situación del medio ambiente y el comportamiento de los individuos, de tal manera que en conjunto, el comportamiento global del sistema se ve afectado.

Un segundo ejemplo es el algoritmo de búsqueda de Google. El algoritmo de Clasificación de Páginas (CP) de Google (PageRank en inglés) es un descendiente directo del sistema de citas utilizadas en las bibliotecas [109]. Las citas, en un documento en particular, son usadas basadas en técnicas de agregación, para determinar la importancia del documento dado. Usando esa idea, Google evalúa la importancia o relevancia de una página Web. Los motores de búsqueda son sistemas de reputación. CP evalúa la importancia de una página contando los enlaces a ella. Ese algoritmo se puede explicar de la siguiente manera: Asumamos que la página A tiene las páginas T_1, \dots, T_n apuntándolas a ella (es decir, son las que la citan). Por lo general, $CP(A)$ se define como el número de enlaces que van a la página A. El valor de CP de una página A, se puede calcular de la forma siguiente [85]:

$$CP(A) = (1 - d) + d \sum_{i=1}^n \frac{CP(T_i)}{C(T_i)} \quad (3.3)$$

Donde, $C(T_i)$ es el número de enlaces que salen de la página i (vayan o no hacia A), y d es un factor de amortiguamiento entre 0 y 1, que representa la probabilidad de que un usuario continúe pulsando links al navegar por Internet, en vez de buscar directamente.

De esta manera, $CP(A)$ es una probabilidad que indica la importancia de la página A. Un usuario puede abrir esa página sin haber sido dirigido por otra página web, es decir, por motivos que son para nuestros propósitos al azar, $1-d$ cubre esa posibilidad. Si por el contrario, se trata de alguien que navega por la web, es a través de enlaces de otras páginas que se llega a la página A. Para cualquier página T_i que tiene un enlace a la página A, si tiene $C(T_i)$ enlaces, es razonable suponer en promedio que el surfista tendrá una probabilidad de $1/C(T_i)$ de elegir cada enlace, y por lo tanto, en particular, de elegir el enlace a la página A. La probabilidad de llegar a A a través de T_i es la probabilidad del evento compuesto de primero llegar a T_i , y a continuación pasar de T_i a A. En el supuesto razonable de la independencia de estos dos movimientos, esta probabilidad es el producto de la probabilidad de que se mueva a T_i (es decir, $CP(T_i)$), y después pasar de T_i a A (es decir,

$1/C(I)$). Asumiendo que hay n páginas con enlaces a A , deben sumarse esas probabilidades. Por último, esta suma se pondera por d , la probabilidad de que sea a través de enlaces de otra página que el usuario llega a la página A (es decir, navegando por la web). CP sigue el modelo de cadenas de Markov basado en la premisa: "tal vez los demás sepan algo que yo no sé". De la misma forma que en el cerebro las sinapsis se fortalecen al usarse, mientras que las conexiones no utilizadas se debilitan, también lo son las relaciones sociales entre los enlaces de hipertextos, en el algoritmo CP de Google.

Otros ejemplos de procesos estigmérgicos se encuentran en los mercados de valores, los patrones de tráfico, las logísticas de suministro, los memes culturales, etc. Además de los casos de uso de los algoritmos tipo FC en Google y Amazon, otros ejemplos aparecen en Internet basados en el software wiki, los weblogs, y toda la gama de medios de comunicación social de la web 2.0 o web social, y web 3.0.

Mediante la explotación de la estigmérgica se han desarrollado una serie de algoritmos con éxito en diversos campos [150]: optimización combinatoria, enrutamiento en redes de comunicación, asignación de tareas en sistemas multi-robots, exploración (minería) de datos, etc. También, en los últimos años, el estudio de estigmergia ha influido en los SMAs. En ellos se ha utilizado para definir mecanismos de coordinación, a ser usados en la construcción robusta de sistemas fiables en entornos impredecibles. La principal fuente de inspiración son, obviamente, los estudios sobre las sociedades de insectos, lo que ha permitido proponer modelos de coordinación basados en agentes simples y homogéneos, que no poseen capacidades cognitivas relevantes [150]. Dichos agentes interactúan entre sí a través de modificaciones locales al medio ambiente, originando estructuras y comportamientos globales con el tiempo. Si bien esta corriente de investigación ha producido una serie de resultados muy interesantes, también han generado varios sesgos:

- Un modelo de agentes muy simple que no explota sus capacidades cognitivas,
- Un modelo del medio ambiente a menudo muy básico, con signos como feromonas/señales y mecanismos simples de difusión, agregación y evaporación.

3.4 Retroalimentación

La retroalimentación ha sido usada para generar procesos auto-catalíticos y de auto-reforzamiento. Por ejemplo, a más estímulos en un sitio de la comunidad, más agentes intentarán seguirlo, lo que estimula a más acumulación de estímulos. En general, es un mecanismo o proceso de regreso, de un efecto sobre el sistema mismo que le dio origen [53]. En términos más generales, en un sistema hay una propagación de la señal, desde la entrada hacia la salida, ante la llegada de una señal externa, lo que define un sentido natural, o dirección, de la ruta; la retroalimentación describe la propagación de la señal en el sentido inverso. Cuando una muestra de la salida del sistema se retroalimenta, en el sentido inverso, para contribuir a la entrada, se denomina “retroalimentación” [53]. La propagación de la señal en todo el circuito de retroalimentación tiene un tiempo finito y efecto de causalidad. La retroalimentación permite potenciar una amplificación/reducción de una señal que se propaga desde la entrada hacia la salida.

Por otro lado, la *auto-catálisis*, es un término de la química que nos impulsa a prestar atención a los flujos de información y asegurar que estos flujos generen lazos cerrados. Un catalizador es una sustancia que facilita una reacción química. En auto-catálisis, un producto de una reacción sirve como catalizador para esa misma reacción. En el contexto de agentes, el resultado de las acciones del agente estimula otras acciones, y relanza eventualmente las primeras acciones. Para ese proceso se requiere de lazos de retroalimentación, en los cuales los agentes sigan observaciones de sus acciones, que los estimulen o inhiben. La retroalimentación permite cerrar los flujos de información necesarios para la emergencia. Existen clásicamente dos procesos de retroalimentación:

- *Retroalimentación Positiva.* son reglas de comportamiento simples que promueven la creación de estructuras. La característica clave de la retroalimentación positiva es que las pequeñas perturbaciones se amplifican. Cuando la retroalimentación positiva está presente, un pequeño cambio crea un efecto que provoca un cambio aún más grande, como una bola de nieve rodando por una colina. En un sistema con retroalimentación positiva, un cambio en una variable responde cambiando la variable en la misma dirección. El resultado

final de la retroalimentación positiva es amplificar, de manera que pequeñas perturbaciones pueden dar lugar a grandes cambios. Existen muchos ejemplos en las sociedades de insectos: el reclutamiento y el reforzamiento realizado en las hormigas a través del feromona, o en las abejas a través de la danza.

- *Retroalimentación Negativa.* ayuda a estabilizar un patrón colectivo (equilibra el efecto de la retroalimentación positiva), tomando formas como saturación, agotamiento o competición. En el caso de esta retroalimentación, contrario a la retroalimentación positiva, lo que se busca es la estabilización³⁵. Al proceso que subyace en esa búsqueda de equilibrio, en biología, a menudo se le denomina homeostasis. En el mundo real, los bucles de retroalimentación positiva son controlados por la Retroalimentación Negativa para limitar sus efectos. En el caso de forrajeo en las hormigas, la retroalimentación negativa proviene del número limitado de hormigas disponibles, del agotamiento de la fuente de alimento, de la competición entre las fuentes de alimento, etc. Otros ejemplos son la regulación de la temperatura corporal, o la regulación de los niveles de glucosa en la sangre. La interrupción de la retroalimentación negativa puede llevar a resultados no deseados: en el caso de los niveles de glucosa en la sangre, puede conllevar a un aumento de manera espectacular de ella, generando una diabetes.

En general, el proceso de retroalimentación es muy importante en sociedades como las de hormigas [53]. El descubrimiento de una fuente de alimento grande por una hormiga deja un rastro que después será utilizado y reforzado por las otras hormigas. Ninguna hormiga individualmente explora todo su entorno. Colectivamente, las hormigas exploran su alrededor completamente, proporcionando sus rastros un mapa completo de ese entorno. Los rastros colectivos no son simplemente la superposición de los rastros dejados independientemente por cada individuo, sino que obran recíprocamente de una manera no lineal: un rastro que lleva a una buena fuente será reforzado a través de un lazo de retroalimentación positiva, mientras que un rastro que lleva a una fuente vacía decaerá espontáneamente. Así, una variedad de contribuciones locales, individuales, son suficientes para hacer emerger un mapa global. El efecto neto es que la exploración colectiva es mucho más eficiente, desde

³⁵ En ingeniería, matemáticas, físicas y biología, los términos usados para los puntos en torno al cual se espera que se estabilice un sistema son: atractores, estados estables, puntos de equilibrio, etc.

esfuerzos pequeños, individuales, que resulten ser acertados, los cuales son amplificados a resultados grandes, colectivos, por el mecanismo de retroalimentación (en cierto modo, producidos por la retroalimentación positiva). El peligro con la retroalimentación positiva, es que puede llegar a ser demasiado fuerte, de modo que las líneas de conducta buenas, atraigan inmediatamente toda la actividad, previniendo la exploración de otras posibilidades, que pudieran producir incluso mejores soluciones. Si las hormigas eligen siempre la trayectoria con el olor más fuerte de feromona, entonces toda la colonia se concentrará inmediatamente en una sola fuente de alimento. Tardaría mucho tiempo después que la fuente de alimento ha sido agotada, para comenzar a explorar otras regiones. Para garantizar un más o menos exhaustivo recubrimiento de su entorno, las hormigas deben desviarse del rastro más fuerte con cierta probabilidad diferente a cero. El aumento de esta probabilidad lleva a una exploración más cuidadosa. En las hormigas, esta probabilidad se ha desarrollado quizás a casi su valor óptimo, debido a la selección natural [53]: las variedades de hormigas con un valor demasiado alto o bajo para ese parámetro, han perdido la competencia con las variedades de hormigas caracterizadas por un mejor valor.

Otro ejemplo, en las hormigas, de un mecanismo de retroalimentación positiva, está relacionado con la probabilidad de que un individuo se una a una mayor estructura. Por ejemplo, en las hormigas tejedoras (*Oecophylla*), la probabilidad de que una hormiga se una a un grupo se correlaciona positivamente con el tamaño del grupo [53]. Este proceso es adaptativo en una colonia, pero en general, se basa en formar un solo grupo (o pocos) de crecimiento rápido, en vez de muchos grupos en competencia y de crecimiento lento.

Si trasladamos el modelo de retroalimentación de las colonias de hormiga a la sociedad humana, podemos recordar un mecanismo, más típicamente humano, para la solución de problemas colectivos: *la discusión*. Cuando la gente en un grupo está dialogando sobre alguna opción a tomar, realiza una evaluación a partir de la discusión que se genera, sobre por qué creen que una opción particular es mejor que otra. Durante esa discusión unos pueden convencer a otros sobre una opción, o incitarlos para producir argumentos contrarios a esa opción. En el mejor de los casos, esa discusión y argumentos pueden llegar a sugerir una nueva opción que combine los mejores aspectos de las opciones bajo evaluación. Un

ejemplo interesante es el *método Delphi* de los ejercicios de prospectiva. En una sesión de Delphi, a los participantes primero se les pide indicar su acción preferida para abordar un problema dado. Entonces, los participantes evalúan cada acción en una escala del 1 al 5 y dan una discusión sobre si están de acuerdo o en desacuerdo. En la siguiente ronda se ve la distribución de las opiniones y se da una discusión adicional para cada una de las opciones. Esto se continúa haciendo por opción, hasta que las opiniones se establecen. En ese momento, el grupo puede decidir elegir la opción que ha recolectado la evaluación media más alta.

La retroalimentación positiva se considera un ingrediente clave, pero no un componente crucial, de la emergencia [15]: “La mayoría de los sistemas emergentes usan la retroalimentación positiva, pero hay ejemplos de la diversidad biológica emergente que pueden contener muy poca, o ninguna, retroalimentación positiva”³⁶. Un ejemplo de ello es el proceso de termo-regulación en las abejas melíferas (*Apis mellifera*). Las abejas se mueven entre la superficie y el núcleo del enjambre en un intento de regular su propia temperatura. En general, hay un patrón global de adaptación: el perfil deseado de temperatura de la agrupación. Los individuos activamente regulan su temperatura modificando su espaciado inter-individual. Cuando la temperatura se eleva, empujan a sus vecinos para aumentar la distancia entre-vecinos, con lo que se permite que el aire se mueva más libremente a través de ellos, y se enfríe el nido. El enfriamiento también puede ser mejorado por los individuos, abanicando sus alas para así aumentar el flujo de aire. Por el contrario, a temperaturas ambientales frías los individuos se unen con sus vecinos para reducir el flujo de aire. ¿Por qué ese caso de las abejas es emergente? Porque en ese caso en ellas emergen clases de auto-ensamblaje.

En general, un sistema con mecanismos de retroalimentación positiva y negativa será más propenso a que en él surjan/aparezcan fenómenos/procesos emergentes, que otro sistema sin esos mecanismos simultáneamente.

³⁶ La retroalimentación positiva resulta beneficiosa en ciertos casos (ejemplos son Wikipedia o Linux), pero también puede tener efectos negativos en otros casos (por ejemplo, proyectos en competencia pueden nunca llegar a tener la masa crítica necesaria para arrancar, fructíferamente, desde una perspectiva emergente. Solo las fluctuaciones aleatorias les conferirían alguna posibilidad de arrancar, ver el ejemplo de las hormigas que solo siguen rastros fuertes, que venimos de comentar).

3.5 Inteligencia Colectiva

La inteligencia colectiva, también llamado *Inteligencia de Enjambre*, es un paradigma relativamente nuevo, que se aplica en una serie de entornos compuestos de entidades distribuidas que interactúan entre sí [1, 26, 60]. Este tipo de inteligencia se refiere a un tipo de capacidad para resolver problemas, que surge desde las interacciones de unidades simples de procesamiento de información. Este paradigma imita el comportamiento de los enjambres de insectos, para tratar de reproducir los comportamientos emergentes que se dan en él. El concepto de *enjambre* sugiere multiplicidad, aleatoriedad y desorden; y el concepto de *inteligencia* sugiere que el método de resolución de problemas es de alguna manera exitosa. Así, es un campo de investigación científica, multidisciplinaria, que se interesa en los procesos distribuidos (no supervisados) de una organización, presente en un cierto número de sociedades de animales. Este innovador paradigma distribuido inteligente de resolución de problemas, originalmente de optimización, tuvo su inspiración en ejemplos biológicos de enjambres de animales [1, 60]: manadas de aves, bancos de peces, enjambres de abejas (ver tabla 3.1). También, los flujos de peatones (seres humanos) se han estudiado con mucho interés [1. 60].

La idea básica en la “inteligencia colectiva” es que de un grupo de individuos (por ejemplo; gente, insectos), puede emerger un comportamiento complejo, al parecer inteligente, de la sinergia creada por las interacciones simples entre los individuos del grupo (ellos pueden seguir reglas muy simples) [1]. Partamos de las organizaciones sociales (instituciones, equipos, etc.), para analizar qué tipo de inteligencia colectiva puede surgir. La mayoría de las organizaciones tienen una estructura jerárquica, con un individuo en la dirección superior y las actividades de los otros individuos en los niveles más bajos. Aunque ningún presidente, jefe o gerente puede supervisar o controlar todas las tareas realizadas por los individuos en una organización compleja, uno puede sospechar que en la organización se da algún tipo de inteligencia que está más allá de la inteligencia de su nivel superior jerárquico. Esto es más claro en grupos pequeños, como en un equipo de fútbol. A pesar de que hay un director técnico que posiciona, da indicaciones, etc.; los movimientos y las tácticas que emergen durante un juego de fútbol no son controladas por un solo individuo, son resultado de secuencias

complejas de interacciones. En general, las reglas que deben seguir los individuos son bastante simples, pero el resultado global es un equipo actuando inteligentemente, armónicamente. Ahora bien, las cosas son muy diferentes en el mundo de los insectos sociales, ya que no son criaturas inteligentes. Los insectos individuales tienen capacidades de tratamiento de la información extremadamente limitadas, pero con todo y ello, la colectividad (colonia de hormigas, colmena de abejas) puede hacer frente a situaciones muy complejas [102].

Los ejemplos discutidos hasta ahora en el libro, caracterizan la inteligencia colectiva como un producto que emerge desde los comportamientos de individuos, en algunos casos altamente inteligentes (equipos de fútbol), y en otros no inteligentes (sociedades de insectos). Ahora bien, la inteligencia colectiva que emerge desde una comunidad de agentes, con alta inteligencia individual, tiene ciertas dificultades (un ejemplo es un grupo de gente muy competente juntos en un cuarto, para idear un plan de acción, y se aborde el problema de alcanzar una decisión. El resultado que se conseguiría es raramente mucho mejor, que el resultado que se tendría si los diversos participantes abordan el problema separadamente). El problema es que no se logra explotar las capacidades máximas cognitivas de sus individuos. Si eso se lograra hacer de manera eficiente, es posible la aparición de la inteligencia colectiva en grupos humanos. Otro problema en los grupos humanos, es que las personas tienden a jugar *juegos de poder*. Todo el mundo quiere ser reconocido como la persona más inteligente, o más importante en el grupo, y por lo tanto está dispuesto a negar cualquier opinión diferente a la suya. Esos juegos de poder suelen terminar con la creación de una “jerarquía” en la que el que está en la parte superior puede criticar todo, mientras que el que está en la parte inferior no lo puede hacer. El resultado es que a la gente que está en la parte inferior, nunca se le presta atención. Esa competencia constante para hacer oír su voz, se ve agravada por el hecho de que en la lingüística la comunicación es secuencial (en una reunión, sólo una persona puede hablar a la vez, para que la conversación sea entendible por todos).

Eso ha hecho que la inteligencia colectiva, creada artificialmente, se haya inspirado en la mayoría de los casos, de las observaciones hechas a los insectos sociales. Sorprendentemente, y paradójicamente, estos insectos parecen utilizar reglas muy simples de interacción. Esto ha dejado perplejo a

un gran número de científicos. ¿Cómo es que “enjambres” de criaturas con poderes cerebrales relativamente bajos, y capacidades de comunicación mínimas, pueden participar, en lo que hemos llamado como propiedad emergente, inteligencia colectiva?

Para responder a lo anterior, lo mejor es concentrarse en las propiedades fundamentales de la inteligencia colectiva. Básicamente, ellas tienen que ver en cómo los enjambres de entidades deben comunicarse y modificar su comportamiento, en respuesta a la información de otras entidades y de su entorno, para que haya un comportamiento emergente visto como la “inteligencia del enjambre”. Veamos el caso de las colonias de hormigas. Ellas tienen un aparentemente simple e inteligente mecanismo de comunicación y un sistema de almacenamiento y recuperación de información, basados en sustancias químicas (feromonas) que tienen un olor que se disipa con el tiempo a través de un proceso de evaporación. El feromona que cambia su intensidad con el tiempo proporciona un mecanismo de procesamiento de información muy simple (implementa formas de retroalimentación positiva y negativa que llevan implícito mecanismos de aprendizaje). En general, esto ocurre así, ya que las hormigas se someten y responden a los feromonas. Por ejemplo, consideremos el caso de cómo las hormigas consiguen rutas; la motivación de las hormigas para resolver el problema de encontrar rutas, se deriva de sus necesidades por encontrar fuentes de alimento. La eficiencia dicta que deben encontrar fuentes más cercanas a sus colonias. Las hormigas por primera vez buscan fuentes de alimento de forma aleatoria (en ese proceso van dejando rastros de feromonas). Una vez que las hormigas encuentran una fuente de alimento, regresan a su colonia siguiendo su olor (y con ello informan a las otras hormigas de la colonia de su hallazgo). Dado que muchas hormigas buscan alimento, las hormigas que regresan primero son presumiblemente las que han encontrado la fuente de alimento más cercano a la colonia, o por lo menos, han encontrado una fuente que está más accesible. De esta manera, una colonia de hormigas puede identificar el “mejor” camino a la fuente de alimento.

La inteligencia y la sencillez de este sistema, se destaca cuando este proceso se analiza desde lo que se podría concebir como la perspectiva de las hormigas [50, 96, 108]: El camino más corto tiene el aroma más fuerte, ya que menos tiempo ha transcurrido entre el momento cuando

las hormigas inician la búsqueda de comida y el momento cuando llegan de vuelta a la colonia, por lo tanto, hay menos tiempo para que el feromona se evapore. Además, las hormigas que van por este camino fortalecen la pista de feromona, reforzando así el camino más corto a la fuente de alimento (es una forma de aprendizaje por refuerzo). Este sencillo método de retroalimentación por refuerzo (o positivo), presenta características importantes de comportamiento eficiente del grupo (por ejemplo, si el camino más corto es obstruido, entonces el camino más corto es el segundo mejor, por lo que inducirá hormigas a recorrerlo, lo que conllevará al fortalecimiento de esta ruta alternativa). De esta manera, los niveles de feromonas le confieren a la colonia robustez, redundancia y adaptabilidad (características de los sistemas emergentes). Según Surowiecki, hay tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por la inteligencia colectiva [178]:

- *Problemas Cognitivos*: Se refiere a problemas que siempre tienen una solución. Y si no existe una única solución, hay unas mejores que otras. Además, un problema cognitivo requiere mucho conocimiento que es difícil que este concentrado en un experto. En estos tipos de problemas se busca una solución que “promedia” lo pensado por las personas involucradas en su solución.
- *Problemas de Coordinación*: En estos tipos de problemas, los miembros de un grupo se ven en la necesidad de armonizar sus comportamientos entre ellos. Estos problemas suponen tomar en cuenta lo que uno piensa, y lo que piensan y hacen los demás.
- *Problemas de Cooperación*: Se refiere a como los grupos de personas pueden formar redes de confianza, sin que un sistema central controle sus comportamientos, o directamente obliguen a un acatamiento. Las personas que buscan satisfacer su propio interés, se ven en la necesidad de lidiar con los demás, para obtener una solución que sea buena para todos. Este tipo de problemas puede parecer similar a los problemas de coordinación, la diferencia fundamental es que los involucrados deben asumir una perspectiva más amplia, que el interés particular.

La inteligencia colectiva, también conocida como *sabiduría global*, requiere de ciertos principios asociados a lo que se ha denominado “Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes”, los cuales son [178]:

- *Diversidad de Opinión*: los individuos deben poseer opiniones, o conocimientos sobre un tema, lo suficientemente diversos como para poder abarcar todo el espectro de posibles opiniones. Así, la idea es tener un grupo de personas, con el mayor rango de opiniones posibles. Mientras más diversidad halla en una multitud, más robusta será la inteligencia colectiva.
- *Independencia de Opinión*: cada persona debe sentirse verdaderamente libre para expresar su opinión, tratando que esta última, no sea influenciada por los demás.
- *Descentralización*: la descentralización supone que cada quien ponga a prueba su propio punto de vista, en vez de responder a directrices que vengan desde arriba.
- *Agregación*: debe haber un mecanismo que exprese, resuma, y convierta los aportes individuales (conocimiento individual) en aportes colectivos (conocimiento de grupo).

Cuando alguna de ellas falla, la emergencia de la inteligencia colectiva también falla [60].

Utilizar eficazmente el paradigma de la inteligencia colectiva requiere de marcos teóricos para analizarla y ponerla en práctica. En [60] han propuesto tres aspectos para proporcionar ese marco teórico necesario:

- *Un conjunto de principios básicos sobre las leyes de la naturaleza, que subyacen en la inteligencia colectiva*. Las leyes de la naturaleza son las relacionadas con las teorías evolutiva y selección natural (describen eficientemente el comportamiento dinámico en las colonias de insectos sociales).
- *Un marco que describa el comportamiento adaptativo*. Ese comportamiento eficiente puede matemáticamente caracterizarse a través de la *teoría de Pareto*³⁷. Los problemas de optimización en los insectos

³⁷ Es una forma de caracterizar un conjunto de soluciones óptimas, cuando varias subfunciones objetivo se deben optimizar, y entre ellas hay contradicciones. Un óptimo de Pareto corresponde a un punto en el espacio de valores de la función objetivo, con la propiedad de que cuando se compara con cualquier otro punto factible en el espacio de la función objetivo, por lo menos un valor de la función objetivo (componente del vector) es superior al valor correspondiente de la función objetivo (componente del vector) en ese otro punto. Un óptimo de Pareto, por lo tanto, constituye un especial subconjunto de puntos en el espacio de la función objetivo, que se encuentran a lo largo de lo que se conoce como la frontera de óptimos de Pareto, y son el conjunto de los puntos que dominan (son superiores en los términos antes indicados), a todos los demás puntos en el espacio de la función objetivo.

constan de una variedad de objetivos para sobrevivir, además, algunas veces conflictivos entre sí. El desafío que se presenta es optimizar múltiples objetivos sujetos a algunas restricciones. De esta manera, la eficiencia del sistema en un sentido matemático se puede definir como de Optimalidad de Pareto.

- *Un conjunto de métodos eficaces para la determinación de los óptimos de Pareto, para mejorar la supervivencia de una especie.* En tales circunstancias, el sistema puede ser movido a lo largo de la frontera de óptimos de Pareto (por ejemplo, si en una colonia de hormigas una ruta de acceso a una fuente de alimento se congestiona, a continuación, otras rutas deben ser utilizadas. A pesar de que se desea que las distancias a las fuentes de alimentos sean las mínimas, el nivel de congestión como objetivo, a menudo está en conflicto con el primero, lo que hace eficaz sacrificar la distancia más corta para disminuir el nivel de congestión).

Para resumir, un sistema donde emerja la inteligencia colectiva, debe comportarse de una manera compatible con el óptimo de Pareto. El marco dinámico adaptativo del fenómeno de inteligencia colectiva, puede modelarse matemáticamente fielmente desde la Teoría de Pareto. Ella permite caracterizar las dos principales características de la inteligencia colectiva (la emergencia y la auto-organización), a través de la frontera de Pareto. El corazón en el diseño artificial del fenómeno de inteligencia colectiva, se convierte en: ¿Cómo puede un sistema moverse a lo largo de la frontera del óptimo de Pareto? Para ello, se puede pensar en las siguientes consideraciones matemáticas:

- *Compensaciones entre los óptimos:* Es posible que ciertos estados sean “incompatibles”. Es decir, un cierto óptimo de Pareto puede impedir otro particular óptimo de Pareto. Por lo tanto, es concebible que sólo ciertas combinaciones de los óptimos de Pareto pueden coexistir en un momento dado.
- *La aparición de patrones que describen las estructuras y los comportamientos.* Los patrones surgen para caracterizar las condiciones iniciales, la incompatibilidad de varios estados en términos de óptimos de Pareto, etc. (los patrones observados en los enjambres de insectos se explican en estos términos).
- *Métodos de solución basados en técnicas de enjambre (Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales Artificiales, Optimización por Enjambre, etc.):* se requie-

re de estrategias de cómputo paralelo que compartan una serie de características en común con la forma en que los enjambres de insectos resuelven los problemas, por ejemplo, mediante la exploración de muchos caminos diferentes al mismo tiempo. En particular, cada procesador en un sistema paralelo se inicia seleccionando al azar un espacio de decisión, que le permita encontrar un óptimo de Pareto. Con muchos procesadores, las posibilidades de encontrar múltiples óptimos de Pareto aumenta.

- *Movimiento a lo largo de la frontera de óptimos de Pareto:* Un aspecto importante de los problemas de optimización multi-objetivos, es que los vectores de variables de decisión que producen el óptimo de Pareto, pueden estar esparcidos por todo el espacio de decisión, aparentemente al azar. Para la idea de comportamiento emergente, es fundamental poder pasearse en tiempo real, por la frontera naturalmente, para poder adaptarse, ser robusto, etc.

Por otro lado, la inteligencia colectiva requiere de cuatro funciones (coordinación, cooperación, deliberación y colaboración), que se han observado emergen en las colonias de animales para organizar su comportamiento global, las cuales permiten el procesamiento de la información en la colonia, de acuerdo a dos ejes principales [60]:

- La *coordinación* y la *colaboración* forman estructuras sociales, temporales y espaciales que resultan del trabajo de la colonia. La coordinación regula la densidad espacio-temporal de los individuos, mientras que la colaboración regula la asignación de sus actividades.
- La *cooperación* y *deliberación* proveen herramientas para que la colonia pueda enfrentar los retos ambientales. La deliberación permite los mecanismos que apoyan las decisiones de la colonia, mientras que la cooperación representa los mecanismos que superan las limitaciones individuales.

Finalmente, la inteligencia colectiva, muchas veces se expresa por la emergencia de patrones, que pueden ser materiales (como la construcción de nidos) o sociales (como la división del trabajo), y conducen a la colonia a estructurar su entorno (por ejemplo, el nido) o a resolver problemas (por ejemplo, tomar decisiones colectivas) [60]. Los sistemas realizados bajo el enfoque de la inteligencia colectiva, exhiben las características que hacen a las sociedades de insectos exitosas en sus

entornos, tales como [60]: auto-organización, comportamiento emergente, robustez, control descentralizado. La tabla 3.1 muestra algunos ejemplos de este comportamiento en la naturaleza.

Tipo de Enjambre	Comportamiento
Bacterias, Moho Fangoso	Generación de patrones
Hormigas	Formación de caminos
Hormigas	Organización de nidos
Hormigas	Transporte cooperativo
Hormigas, Abejas	Selección de la fuente de alimentos
Abejas	Termo-regulación
Avispas	Asignación de tareas
Abejas, Avispas, Avispones, Termitas	Construcción de colmenas
Luciérnagas, bancos de peces, bandadas de aves	Sincronización
Arañas	Construcción de redes
Peces	Cardumen
Aves	Bandadas
Lobos	Asedio de presas

Tabla 3.1. Algunos ejemplos de enjambres en la naturaleza y sus comportamientos colectivos [29, 138].

Capítulo 4: Modelización de la emergencia

4.1 Introducción

Fenómenos emergentes aparecen en áreas como la biología, la sociología, etc. En el caso de la biología, los trabajos sobre el tema de la morfogénesis nos vinculan a la emergencia [32]. Un trabajo pionero sobre los sistemas emergentes fue el del Inglés matemático Alan Turing, quien demostró cómo un sistema de productos químicos (que él llamó morfógenos), al reaccionar juntos, podían generar patrones regulares, incluso si al inicio se distribuían al azar [187]. El modelo de reacción-difusión desarrollado por Turing mostraba un fenómeno emergente: una gran variedad de patrones biológicos emerjan espontáneamente a partir de la amplificación local de las reacciones y la inhibición a largo plazo de las mismas. Todos los patrones se adherían a un esquema general, y la diversidad de esos patrones dependía de simples cambios en los valores de ciertos parámetros, tales como el tiempo en el cual se activaba un mecanismo de amplificación o la geometría del sistema. Recientemente, una serie de modelos de generación de patrones se han propuesto, algunos de ellos derivados del trabajo de Turing. Estos modelos explican la emergencia de muchos patrones que encontramos en la naturaleza: la pigmentación de la piel en animales como las cebras, las formas de las conchas en los moluscos, e incluso los patrones de alucinación inducidos por las drogas [187]. Todos estos casos tienen en común que cada uno puede ser visto como sistemas constituidos por un conjunto de subunidades (por ejemplos células individuales), las cuales tienen un gran número de interacciones locales entre ellas. Saber cómo emergen estos patrones, y su papel funcional, son importantes para nuestra comprensión sobre el papel desempeñado por la teoría de la emergencia.

En el caso de las sociedades de insectos, y las colonias de hormiga en particular, las mismas pueden ser vistas como sistemas distribuidos, que presentan una estructurada organización social, a pesar de la simplicidad de sus individuos. Como resultado de esa organización, las sociedades de insectos pueden realizar tareas complejas que exceden las capacidades individuales de un insecto. El estudio del comporta-

miento de las sociedades de insectos³⁸ y de sus capacidades emergentes, son fundamentales para la teoría de la emergencia. En particular, comprender sobre qué sistemas de gestión y de decisión se apoyan, ya que proporcionan modelos de adaptación útiles para resolver problemas distribuidos difíciles en diferentes áreas, tales como: optimización, clasificación, control, entre otros. Esos modelos adaptativos se han venido inspirando en cómo las sociedades de insectos buscan alimentos, construyen sus nidos, dividen y regulan el trabajo de la colonia, transportan colectivamente objetos, etc. [54, 193].

También, algunos sistemas sociales muestran claramente fenómenos emergentes. En muchos sistemas sociales sus decisiones, y los patrones que surgen, son el resultado de un procesamiento de diferentes fuentes de información, que luego se amplifican a través de diferentes formas de retroalimentación positiva. La retroalimentación negativa surge a menudo “automáticamente” como consecuencia de las limitaciones del sistema (por ejemplo, capacidad de las fuentes de alimentos, número de trabajadores disponibles, etc.).

La pregunta es ¿Cómo podemos modelar provechosamente esos sistemas? [83]. Los organismos explotan sus características emergentes, capitalizándolas en varias capacidades para procesar la información, organizarse colectivamente, etc. En nuestro contexto no es la arquitectura interna lo que importa, sino las capacidades que emergen de esa estructura. En general, el problema de comprensión de un fenómeno emergente tiene que ver con la dificultad para comprender su funcionamiento. Para superar esta dificultad, una posibilidad es analizar los fenómenos con modelos y simulaciones matemáticas. Algunos ejemplos de lo que se viene haciendo al respecto, incluyen los estudios sobre los patrones de búsqueda de alimentos en las hormigas, la construcción de nidos por las termitas, la selección de alimentos en las abejas melíferas, entre otros.

Esos estudios buscan comprender aspectos, como por ejemplo, en el contexto de la formación de patrones en los panales de las abejas, las celdas, el polen y la miel se combinan para generar comportamientos emergentes del grupo. En el caso de la búsqueda de alimentos en las hormigas y abejas, aspectos como el baile de las abejas o la definición de senderos en las hormigas (y su modulación en función con la percepción que van

³⁸ Ellos han desarrollado un modo de resolución de problemas distribuido reactivo.

teniendo de la rentabilidad de una fuente en particular), son estudiados para comprender el proceso de toma de decisión colectivo adaptativo.

Estas dinámicas de comportamiento colectivo que se dan, sin ser dirigidas fuera del sistema o por miembros líderes (por ejemplo, las abejas reina), nos hablan de una “acción de las masas”, como la llamo Wilson, al afirmar que “la vida social es un fenómeno de masas que surge de patrones de mallado ... desde simples individuos” [83]. Él señaló que los componentes de un sistema necesitan solo funcionar con un grupo de “reglas simples”, y requieren solo de estímulos locales que contienen relativamente pequeñas cantidades de información. Así, el comportamiento colectivo (proceso altamente coordinado) en un sistema surge, a través de procesos de decisiones descentralizados, a partir de las capacidades de sus componentes para recopilar y procesar información sobre las necesidades del sistema, y modificar su comportamiento en consecuencia.

Los modelos matemáticos que se han venido desarrollando, permiten mostrar que en efecto se produce un fenómeno de emergencia, que refleja la funcionalidad y la adaptación del sistema. Ellos permiten ver que los sistemas emergentes presentan características de gran escala, diferentes a la de sus componentes individuales, y ofrecen pistas sobre las reglas que las generan. Con los modelos matemáticos es posible observar la amplia variedad de estructuras espacio-temporales, la gran diversidad de patrones colectivos, entre otras cosas. A continuación, algunos de los modelos matemáticos que se han venido proponiendo en la literatura.

4.2 Modelos de Insectos

La comprensión de las estructuras de las sociedades de insectos es un problema desafiador [49]. Cómo se produce un patrón y cuáles son los mecanismos implicados, es un problema abierto de investigación. Para ello, es necesario comprender el comportamiento colectivo espontáneo resultado de las múltiples interacciones entre los miembros de la sociedad, sin influencia de una dirección impuesta por una plantilla externa, un marcapaso o un líder. El mundo natural abunda en estructuras con esas cualidades, tales como las redes de rastros, la regularidad del trazado en la piel de las cebras, o los movimientos sincronizados de un banco de peces.

Las sociedades de insectos son sistemas adaptativos complejos, en los que los individuos forman una unidad muy coordinada e integrada, con poco o ningún control centralizado, tal que ellos son capaces de trabajar colectivamente, para realizar tareas que requieren de capacidades que van más allá de las que tiene cada insecto individualmente. Los individuos coordinan sus actividades a través de la estigmergia, que como dijimos en los capítulos anteriores, es una forma indirecta de comunicación, mediada por modificaciones en el medio ambiente.

La teoría sobre la emergencia³⁹ es de gran ayuda para la comprensión de las sociedades de insectos [55]. Los comportamientos emergentes de insectos sociales pueden ser explicados a través de modelos simples, basados en la comunicación estigmergia. Por ejemplo, la idea detrás de los modelos artificiales de hormigas, es utilizar una forma de estigmergia artificial, para coordinar las sociedades artificiales de agentes. Las primeras investigaciones sobre el comportamiento de las hormigas, nos indican que algunas son completamente ciegas, y la mayoría de las comunicaciones entre ellas se basan en el uso de productos químicos producido por ellas mismas (llamados feromonas). El feromona tiene diferentes usos en las colonias de insectos, por ejemplo, para marcar caminos (como las rutas a las fuentes de alimento desde el nido). Mediante la detección de rastros de feromona, las hormigas explotan las fuentes de alimentos. Esa lógica de creación y seguimiento de rastros, es la fuente inspiradora de muchos modelos artificiales de insectos, basados en el siguiente procedimiento [193]:

- *En ausencia de rastros en el medio ambiente, las hormigas realizan un paseo al azar.*
- *Cuando una hormiga descubre algo de interés para la colonia (por ejemplo, una fuente de alimento), deja un rastro (en ese ejemplo, va dejando un rastro de feromona entre el nido y la fuente de alimento). Algo importante es que los rastros se evaporan si ninguna de las hormigas deja feromonas frescos.*
- *Cuando una hormiga consigue un rastro de feromona, su instinto le indica seguir ese camino.*
- *Cuando esa hormiga llega al objetivo (por ejemplo, a la fuente de alimento), se*

³⁹ El término “emergencia”, como hemos dicho antes, se refiere a un proceso dinámico por el cual el sistema adquiere cualidades nuevas que no pueden ser caracterizadas por la adición simple de sus componentes individuales. La transición de un patrón a otro es el resultado de las interacciones no lineales de múltiples individuos.

devolverá con lo que le interesa (por ejemplo, alimentos), depositando más feromonas. De esta manera, el rastro de feromona se mantiene, e incluso se refuerza.

- *Cuando la hormiga encuentra un objetivo agotado (por ejemplo, la fuente de alimento), se inicia un ensayo aleatorio de búsqueda de nuevos rastros, y el sendero actual desaparece debido a la evaporación (la hormiga no deposita más feromona).*

Ese esquema es un mecanismo muy eficaz, y al mismo tiempo robusto, contra la incertidumbre y complejidad del medio ambiente y las problemáticas a las que se enfrentan las sociedades de insectos. El principal aspecto es que las hormigas individualmente no se exponen a la complejidad dinámica de la situación (ninguna hormiga tiene un mapa mental del medio ambiente), en cambio, el medio ambiente se incorpora a la solución. La evaporación y actualización de los rastros de feromona, permiten a las hormigas hacer frente a la dinámica del medio ambiente, sin tener información en sus cabezas ni que sincronizarse entre ellas. En particular, las sociedades de insectos explotan varios principios [193]:

- Evitan la introducción de mecanismos de coordinación, que deberían modificarse al cambiar el medio ambiente o al fallar porque la complejidad espacial del medio ambiente ha crecido.
- Tratan la inercia de la información que se acumula con el tiempo (por ejemplo, rastros de feromona que se convierten en inválidos, no se actualizan más, evaporándose con el tiempo).

Así, el mundo de los insectos sociales es una fuente rica de inspiración para el diseño de artificial de sistemas emergentes. En esta sección, presentaremos algunos modelos derivados de sociedades de insectos reales.

4.2.1 Modelos de las Colonias de Hormigas

Las hormigas son famosas por su organización llamativa y respuestas muy eficientes a los desafíos diarios [49]. Ellas proveen un modelo emergente de organización social. Las fluctuaciones en el tamaño de la colonia y los parámetros del ambiente, actúan sobre la dinámica de la colonia para generar respuestas colectivas de la sociedad. Particularmente, las hormigas tienen una capacidad de funcionar en conjunto y de tomar decisiones colectivas, sin un líder social ni información centralizada. Sin tener un sentido

del conjunto, las hormigas se comportan y solucionan colectivamente problemas diarios, tales como exploración de nuevas áreas, gestión de desechos, o cuidado de sus crías, usando patrones espacio-temporal (variables estigmérgicas). Los patrones de las hormigas pueden cambiar precipitadamente, y reorientarlas de esta manera espontáneamente.

Veamos una primera aproximación al comportamiento emergente de las Colonias de Hormigas [65]. Una gran cantidad de especies de hormigas tienen un comportamiento particular: depositan feromonas al caminar y forrajear, y siguen rastros de feromona con cierta probabilidad. Franks, Deneubourg et al. [65] mostraron en un ingenioso experimento como cambia el porcentaje de hormigas que recorren los diferentes caminos posibles en función del tiempo (ver figura 4.1). El experimento que realizaron es el siguiente: una fuente de alimentación está conectada a un nido de hormigas por dos ramas de igual largo. Al inicio del experimento, las hormigas seleccionan de forma aleatoria, con igual probabilidad, una de las ramas. Debido a las fluctuaciones estadísticas, una de las dos ramas es elegida por pocas hormigas y la otra por más, y por lo tanto, será marcada por una cantidad ligeramente mayor de feromona. La mayor cantidad de feromona en esta rama estimula más hormigas para elegirla, y así sucesivamente. Este *proceso auto-catalítico* conduce muy pronto a que la colonia de hormigas converja hacia el uso de una sola de las dos ramas.

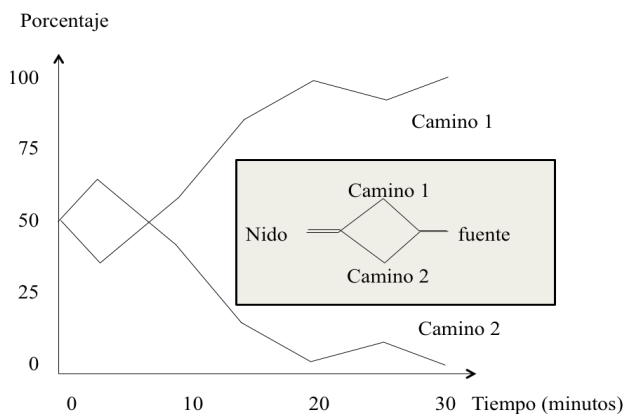


Figura 4.1. Experimento sobre el comportamiento de las Hormigas (proceso auto-catalítico) (tomado de [65]).

El experimento, también se puede ejecutar en un ambiente con dos ramas de diferente longitud. En este caso, las primeras hormigas que vuelven al nido son los que tomaron el camino más corto (ir desde el nido a la fuente y regresar al nido), por lo que más feromona es dejada en la rama corta que en la rama larga, estimulando compañeras a elegir la rama corta (ver figura 4.2). Esto se llama *efecto diferencial de longitud* [65], y explica cómo las hormigas al final hacen la elección de la rama más corta, sin utilizar ningún conocimiento global sobre su entorno. De esta manera, este experimento muestra cómo las hormigas encuentran el camino más corto, entre su hormiguero y una fuente de alimento.

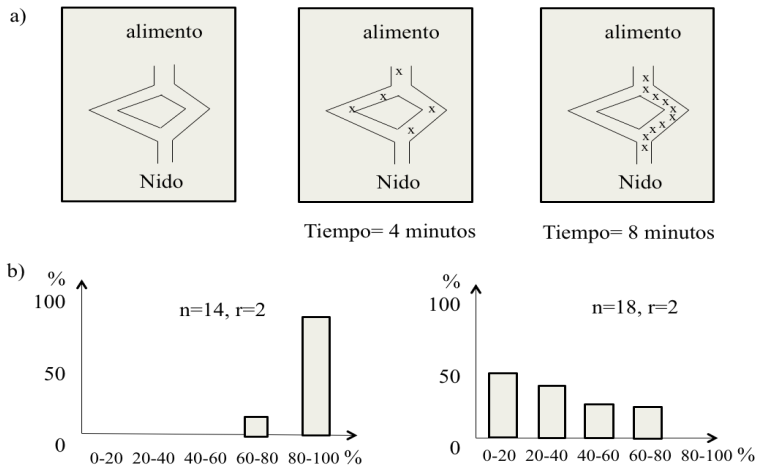


Figura 4.2. Experimento sobre el comportamiento de las Hormigas que produce el efecto diferencial de longitud. a) Experimento donde una colonia de Hormigas *Linepithema humile* selecciona la rama corta después de 8 minutos de que el puente fue colocado. (b) Porcentaje de hormigas que seleccionan la rama más corta de n experimentos. La rama más larga es r veces más larga que la rama corta. El gráfico a la derecha ($n=18$, $r=2$) es un experimento en el que la rama corta es presentada a la colonia 30 min después de la larga rama: la rama corta no es seleccionada, y la colonia queda atrapada en la rama larga (tomado de [65]).

El efecto diferencial de longitud y la auto-catálisis son elementos de base para desarrollar algoritmos de optimización inspirados en el comportamiento de las hormigas, en donde una feromona artificial, desempeña el papel de variable estigmérgica. Esos algoritmos pueden ser

extendidos, considerando que en algunas especies de hormigas, la cantidad de feromona depositada es proporcional a la calidad de la fuente de alimento que encuentran (de esta manera, los caminos que conducen a mejores fuentes de alimentos reciben una cantidad más grande de feromona).

Los comportamientos de las Colonias de Hormigas han sido modelados como sistemas no lineales, en los cuales los agentes actúan de manera estocástica, responden exclusivamente a la información local que reciben de su entorno próximo, y siguen reglas de decisión simples, vinculadas a los lazos de retroalimentación. Estos modelos generan comportamientos robustos y bien adaptados, para la solución de problemas colectivos eficientemente, partiendo de varios hechos [49]:

- Generan una gran variedad de patrones sociales con un limitado número de reglas de comportamiento y de cualidades fisiológicas⁴⁰.
- Poseen varios estados posibles (son multi-estacionarios), y los cambios cualitativos discretos emergen variando gradualmente sus parámetros (bifurcación)⁴¹.
- Usan reglas de decisión simples, junto con procesos de amplificación, para solucionar una variedad de problemas.
- Alteran sus patrones de interacción, así como su dinámica de transmisión de la información, en función del ambiente, de tal modo de hacer emerger estructuras colectivas.

Algunos aspectos interesantes del modelo no lineal presente en las hormigas son [49, 65]:

- *La idea de Bifurcación:* La bifurcación es la transición del sistema entero hacia un nuevo patrón estable cuando se cruza un umbral⁴². Algunos ejemplos de fenómenos de bifurcación en las sociedades

⁴⁰ A este respecto, es innegable la capacidad de generar nuevos patrones haciendo solamente pequeños ajustes a los parámetros del modelo: lazos de retroalimentaciones positivas y negativas, amplificación de fluctuaciones, etc.

⁴¹ Se parte del hecho de que diferencias niveles de emisión de feromona o en el umbral de respuesta ante feromonas en los individuos inducen cambios grandes en las características del grupo. Al armonizar los parámetros con las bifurcaciones a las que se enfrentan las colonias (por los multiestados), se provee a las sociedades con la capacidad de auto-organizarse para adaptarse.

⁴² Todo sistema no lineal que consiste en unidades simples que obran recíprocamente, exhibe a menudo estados múltiples.

de hormigas son: cuando se cambia de un forraje desordenado a uno basado en el feromona, o de una exploración al azar a una bien definida (ver figura 4.1, en el que se muestra la selección colectiva de un camino usando un rastro químico, el feromona).

- *El esquema básico de interacción:* Tan pronto como una hormiga tiene éxito en el descubrimiento de una fuente de alimento, vuelve a la colonia dejando un rastro químico. El rastro lo dirige de nuevo a la fuente del alimento. Cada hormiga reclutada refuerza el rastro que estimula a otras hormigas. Este refuerzo del rastro da lugar a un aumento no lineal de la población de hormigas, que puede llevar a una bifurcación que conlleva a la explotación de una sola fuente del alimento. Otro ejemplo es en la construcción de nidos, la topología de galerías subterráneas (túneles) sigue una dinámica de excavación, que es claramente no lineal, con varios momentos de bifurcación. La probabilidad para que una hormiga excave un grano de arena aumenta en los lugares en donde otra hormiga ya ha excavado previamente, llevando a la formación de nuevas bifurcaciones a lo largo de galerías, y a la selección de un sitio de excavación, entre los varios sitios que fueron previamente excavados aleatoriamente.
- *La sincronización de las actividades:* La actividad diaria en una colonia no es ni explosivamente periódica, ni constante, ni al azar. Los procesos sociales en las hormigas aparecen en contextos extensamente diversos, y pueden ser de segundos a horas, e incluso a días y semanas (un fenómeno parecido se da en las neuronas, en el ciclo molecular, etc.). El análisis de los patrones de actividad en las colonias, revelan comportamientos periódicos, con picos de actividad que ocurren a intervalos de tiempo regular. Ahora bien, dichos análisis muestran que actividades sincronizadas dentro de las colonias de hormiga, pueden emerger simplemente de la activación mutua, a través de contactos físicos directos. Las hormigas activas son eficaces en estimular a las inactivas, sin un disparador exógeno. El resultado fundamental de este proceso auto-catalítico es que los individuos actúan como grupo. Tal sincronización puede adaptarse al contexto, como cuando se requiere a varios trabajadores activos para realizar eficientemente una tarea (por ejemplo, forraje, cuidado de la cría, defensa, etc.). Los patrones temporales que aparecen, pueden ocurrir en una escala de tiempo corta o larga. Veamos un ejemplo: en las colonias de hormigas hay una *fase estática*, donde la

reina pone millares de huevos. Cuando los huevos se convierten en adultos, millares de nuevos trabajadores inducen a un aumento en el nivel de actividad general. Entonces, la colonia entra en una *fase nómada*, durante la cual comienzan a migrar algunas hormigas. La fase migratoria continúa mientras sigan habiendo muchas crías, y cuando la migración se detiene se inicia una nueva fase estática. Este comportamiento periódico del ciclo de actividades, parece ser controlado por los cambios periódicos en los estímulos de las larvas, junto con la fisiología reproductiva de la reina. La colocación de la reina de todos sus huevos, el desarrollo de las larvas, así como la aparición de trabajadores inexpertos, son responsables de la sincronización. Tal sincronización se basa enteramente en los mecanismos fisiológicos y en el comportamiento de los miembros de la colonia (todo ello es interno al sistema social). En unos casos, las larvas demandan alimentos que estimula a trabajadores a buscarlos. Cuando las larvas son viejas, la disminución resultante de la demanda de alimentos permite que la colonia entre en una fase estática. Por otra parte, la cantidad adicional de alimento está disponible para la alimentación de la reina, cuya actividad es la generación de un nuevo lote de huevos, dentro de algunos días. Vemos así que el inicio de las actividades cíclicas es endógeno, y no depende de factores externos.

- *Los patrones dinámicos no lineales (por ejemplo, las ondas)*: Cuando se perturba un patrón, es posible observar ondas espirales, tal que la formación de un nuevo patrón aparece (ondas viajeras). Esto explica los cambios espontáneos de actividades en las colonias, en diferentes escalas temporales y espaciales. Un ejemplo de ello son las ondas de alarmas, en ciertas familias de hormigas; una onda de alarma se inicia y se propaga rápidamente dentro del grupo, cuando perciben una amenaza potencial para la colonia. Eso mismo sucede en las abejas amenazadas, que emiten una señal acústica, que inicia un segundo más tarde, una respuesta acústica colectiva (el silbar). El silbido comienza en individuos cerca de la abeja afectada. Esa comunicación del riesgo a través de ondas que viajan, es rápido y beneficioso. Dichas ondas pueden generar cambios periódicos en la distribución espacial. Los procesos sociales vinculados a las ondas, conforman patrones espacio-temporal más eficiente, que los que podrían esperarse con la presencia de un líder o control centralizado.

- *La noción de criticalidad:* la avalancha es un acontecimiento derivado por disturbios. Por ejemplo, una pila de arena crece por la adición individual lenta de granos de arena, al inicio al azar, la cual comienza por ser más escarpada, hasta llegar a un valor crítico. Si se agrega más arena, es probable accionar una avalancha cuyo tamaño será dado por el número de granos que se resbalan. La energía que describe la avalancha, se considera como la criticalidad. La magnitud de la avalancha, sigue una distribución según la ley de energía, característica de los sistemas críticos. Veamos otro ejemplo, la explotación de una fuente de alimentos se puede accionar por un contacto inicial, entre una hormiga que vaga y la fuente de alimentos. El cambio en el tamaño del grupo de hormigas que sigue la fuente de alimento, sigue el modelo de avalancha, similar a la criticalidad observada en las pilas de arena.
- *Los lazos de retroalimentación:* dos tipos opuestos de interacciones positivas y negativas contribuyen a la aparición de estructuras sociales. En lo que concierne a las retroalimentaciones positivas, las formas pueden ser reducidas a menudo a la regla empírica “hacer como su vecino”. Tal retroalimentación positiva llevará, en última instancia, a la propagación y amplificación de la información y/o del comportamiento. En el caso de las hormigas, las retroalimentaciones positivas toman a menudo la forma de rastros de feromona, depositados por las hormigas que han encontrado, por ejemplo, una provechosa fuente de alimento (ver figura 4.3). Las retroalimentaciones positivas del rastro de feromona son no lineales, ya que las hormigas no reaccionan de una manera proporcional a la cantidad de feromona depositada. Los rastros fuertes tienen probabilidades desproporcionadas más altas, que hace que las hormigas nuevas las elijan y no refuercen rastros débiles. Esta retroalimentación positiva lleva eventualmente a una bifurcación selectiva de solamente un recurso. Lo anterior puede ser caracterizado por:

$$p_1 = \frac{(x_1 + \alpha)^\beta}{(x_1 + \alpha)^\beta + (x_2 + \alpha)^\beta} \quad \text{y} \quad p_2 = 1 - p_1 \quad (4.1)$$

Donde, p_i es la probabilidad de elegir el camino (rama) i , x_i es la cantidad de feromona en la rama i , α determina el nivel de atracción de una rama sin marca, y β establece la no linealidad de la función

escogida. En lo que concierne a las retroalimentaciones negativas, más allá de simplemente forzar un proceso a parar, guardan la amplificación bajo control, ponderan la dinámica de reclutamiento, y ayudan a formar un patrón particular (ver figura 4.3). Un ejemplo de retroalimentación negativa se relaciona con el tamaño limitado de la población de hormigas, disponible para participar en una actividad dada. Consecuentemente, el efecto inicial de reclutamiento conlleva a una fase de inhibición, para evitar la incorporación adicional de individuos haciendo una actividad dada.

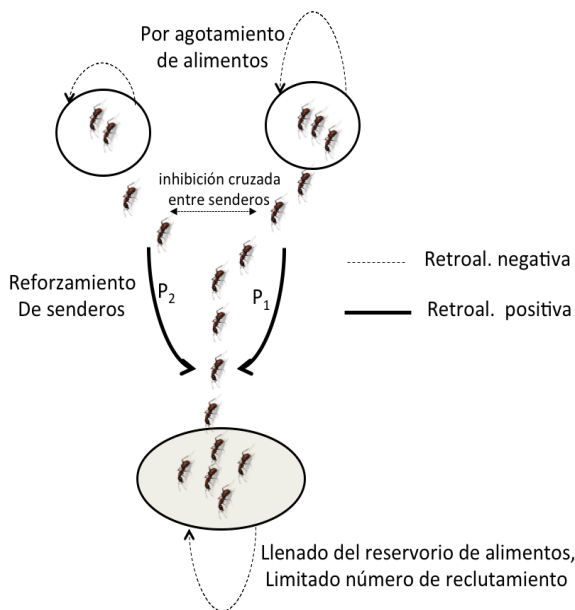


Figura 4.3. Ejemplo del efecto de las retroalimentaciones positivas y negativas en las colonias de hormigas buscando alimentos (basado en [65]).

- *Las fluctuaciones en las formaciones de patrones:* En los sistemas no lineales, las fluctuaciones a nivel de sus componentes, incluso las más pequeñas, pueden llevar a cambios profundos en el nivel global, de modo que el sistema entero alcance uno de sus múltiples estados estables. Por ejemplo, cuando varias fuentes de alimento de calidad idéntica están concurrentemente disponibles en los alrededores, las hormigas son altamente sensibles a las pequeñas fluctuaciones al azar. Cualquier desequilibrio en la distribución de los trabajadores y/o en la cantidad de rastros en las diversas trayec-

torias del forraje, pueden llevar a la colonia a seleccionar solamente un recurso. Por ejemplo, en una disposición en forma de Y, donde las hormigas tienen que elegir entre dos trayectorias, los aspectos al azar se pueden incorporar automáticamente en los diversos pasos del reclutamiento. Esto se verá reflejado, por ejemplo, en la probabilidad de que cada hormiga siga un rastro, la cual es actualizada en cada paso según la cantidad relativa de feromona depositada. Fluctuaciones en el número de hormigas siguiendo un rastro, con procesos de amplificación, permiten la selección de las fuentes del alimento. En el caso donde las hormigas tienen que elegir entre varios recursos de la misma calidad, el comportamiento del sistema sigue un modelo de múltiples estados estables. Para una gran cantidad de recursos, el sistema tiende hacia un estado homogéneo, en el cual todas las fuentes del alimento podrían ser explotadas igualmente. Dependiendo de las fluctuaciones, las colonias adoptarán aleatoriamente cualquiera forraje (una explotación selectiva de un solo recurso, de varios de ellos, etc.). Esto confirma que patrones absolutamente diversos pueden emerger, a condición de que las fluctuaciones, junto con los mecanismos de amplificación, ocurran de manera no lineal. Así, una diversidad de patrones resultan de la sensibilidad de las sociedades de hormigas a las fluctuaciones.

- *El tamaño de la población:* La aparición de patrones se relaciona íntimamente con la existencia de una densidad crítica de unidades, que obran recíprocamente. Los patrones colectivos emergen de interacciones múltiples, pero también dependen en gran medida del tamaño de la colonia, de una manera no lineal y discontinua. Un efecto principal del tamaño del grupo, es el potencial más alto para los procesos de amplificación. Por ejemplo, colonias grandes con un número elevado de individuos, que obran recíprocamente, adoptan un patrón donde un área se forrajea preferencialmente, mientras que las pequeñas colonias dispersan hormigas, sin concentrar su fuerza entera de trabajo en un sitio. Los pequeños tamaños del grupo pueden explotar uniformemente fuentes de alimento, o concentrar su actividad en un subconjunto de recursos. Esto no es así en las colonias grandes, que seleccionan una fuente. Desde una perspectiva funcional, parece óptimo que las colonias grandes concentren su esfuerzo en un número limitado de recursos. Por el contrario, las pequeñas colonias seguirán una estrategia oportunista: intensificarán su búsqueda de alimento, dispersando a

los trabajadores, y explotarán concurrentemente una gran cantidad de recursos, abandonándolos fácilmente. En las colonias de gran tamaño, se ve la transición de fase entre un comportamiento colectivo desordenado y otro determinista (basado en el feromona, ver figura 4.4). Esta carencia de transición en pequeñas colonias, es probablemente debido a la volatilidad del feromona, cuyas cantidades son demasiado bajas y se evaporan. La dificultad de las pequeñas sociedades es una consecuencia directa del pequeño número de participantes, que no pueden alcanzar el valor crítico de feromona necesario para nuclear un rastro bien definido. El tamaño de la colonia es así una cualidad de importancia, para la buena puesta en práctica de procesos de amplificación, y por lo tanto, para los patrones que emergerán en la colonia. La concentración de hormigas en una localización favorece las actividades de cooperación (por ejemplo, la defensa de la colonia, la recuperación colectiva de alimentos, etc.), que se espera sean más eficientes en colonias grandes.

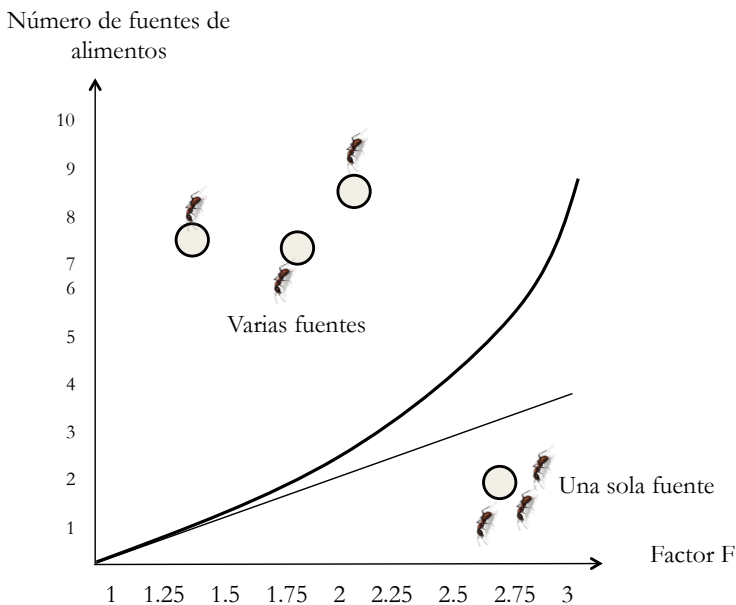


Figura 4.4. Fase de transición entre un comportamiento colectivo desordenado y otro determinista. El Factor F representa los efectos combinados del tamaño de la colonia (flujos de recolectores), intensidad de los caminos y la vida del rastro (tomado de [65]).

- *La sensibilidad al ambiente:* El ambiente puede formar estructuras inesperadas, que inducen a cambios en las interacciones entre las unidades que componen los sistemas físicos en él. Además, el ambiente puede influenciar, tanto el comportamiento de los individuos como las características de las señales que se expresan en él (por ejemplo, la temperatura ambiental influye en el nivel de actividad o la velocidad de las hormigas). De esta manera, el ambiente ayuda a determinar los patrones que emergen en el nivel colectivo (por ejemplo, algunas especies de hormiga conforman ejércitos, donde el tráfico sobre los rastros se organiza a lo largo de carriles unidireccionales: es el mejor ángulo de percepción de las hormigas, que les permiten detectar las fuentes de interés, además de evitarles conflictos en sus rutas. Ahora bien, si las condiciones ambientales limitan esos ángulos de percepción (por ejemplo, la densidad de la vegetación, etc.), el flujo unidireccional no emerge).

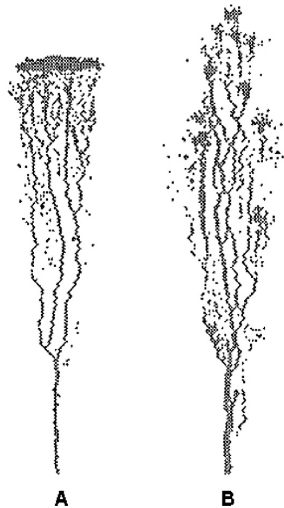


Figura 4.5. Sensibilidad al ambiente: distintos patrones de forrajeo de las hormigas resultados de simulaciones basadas en el mismo modelo con dos distribuciones de alimentos diferentes. A) cada punto tiene una probabilidad de 0,5 de contener 1 alimento; B) cada punto tiene una probabilidad de contener 400 alimentos. En el modelo de simulación, diez hormigas por paso entran al área de alimentación y si encuentran alimento, vuelven al nido dejando un rastro de feromona. En cada punto, la probabilidad de movimiento a la izquierda y derecha es dada por la ecuación 3.1 (tomado de [65]).

- *El papel del ruido:* El ruido es un componente intrínseco de cualquier sistema dinámico. En el caso de las hormigas, el “ruido” toma la forma de pérdida fortuita de trayectorias de rastros, por parte de las hormigas reclutadas (ver figura 4.6). El número de hormigas “perdidas”, puede ser considerado como una estimación del nivel de “ruido” dentro del sistema. Mientras que el ruido se considera generalmente como una desventaja en las actividades humanas, tiene un efecto positivo y negativo en las colonias de insectos. Por una parte, la pérdida del rastro disminuye obviamente el número de individuos alcanzando el alimento. Pero la “pérdida” de un individuo puede ser beneficioso para la colonia: evita configuraciones estáticas, donde algunas localidades reciben una atención desproporcionada mientras que otras no son exploradas. Las hormigas “perdidas” ayudan a encontrar soluciones óptimas a la colonia (ver figura 4.6). Esas hormigas perdidas vagan por un período de tiempo, y es probable que en ese lazo descubran un nuevo, y posiblemente más rico, recurso. Por el contrario, cuando el rastro es seguido exactamente por los trabajadores, muy pocas hormigas se pierden, lo que hace casi imposible el descubrimiento de nuevos recursos. Lo otro interesante es que no sólo las estructuras emergen a pesar del ruido, sino que las fluctuaciones son esenciales para la formación de patrones (actúan como semillas, desde las cuales decisiones colectivas emergen, descubriendo nuevas soluciones que previenen a la colonia de “ser atrapada” en patrones subóptimos). A través de la evolución, las especies de hormigas han ido optimizando el nivel de ruido adecuado. Esa optimización está basada en el equilibrio o compromiso entre, la maximización de la explotación del alimento/recurso y la posibilidad de hacer nuevos descubrimientos. Una manera simple de control en las hormigas es modificando la intensidad de las señales acumuladas (es decir, la cantidad de rastro). De esta manera, las hormigas exploradoras ayudan a reclutar al subir el gradiente de feromona, lo que reduce el porcentaje de las hormigas reclutadas perdidas, y facilita la cooperación en la explotación de un recurso o la defensa de un nido. Así, gestionando ese gradiente de señal, le permite a las exploradoras definir la distribución espacial en el espacio del forraje. Es decir, por medio de la adaptación del ruido (y por consiguiente de los patrones), según la naturaleza del alimento/recurso, le permite a la colonia ajustar su distribución espacial entre el esfuerzo de bús-

queda y/o la explotación de alimentos o recursos disponibles. Es bueno señalar, que existen varias formas a través de las cuales las sociedades de hormigas ejercen control sobre el ruido del sistema. Un aspecto final a señalar, es que el aprendizaje, individual o social reduce el impacto del ruido en la comunicación y en la formación del patrón (por ejemplo, las hormigas son capaces del aprendizaje asociativo, vinculando recompensas a los estímulos. Por otro lado, el aprendizaje social a través de un líder experimentado, puede “enseñar” a otros cómo alcanzar un blanco, por ejemplo, una nueva fuente de alimento o un nuevo nido).

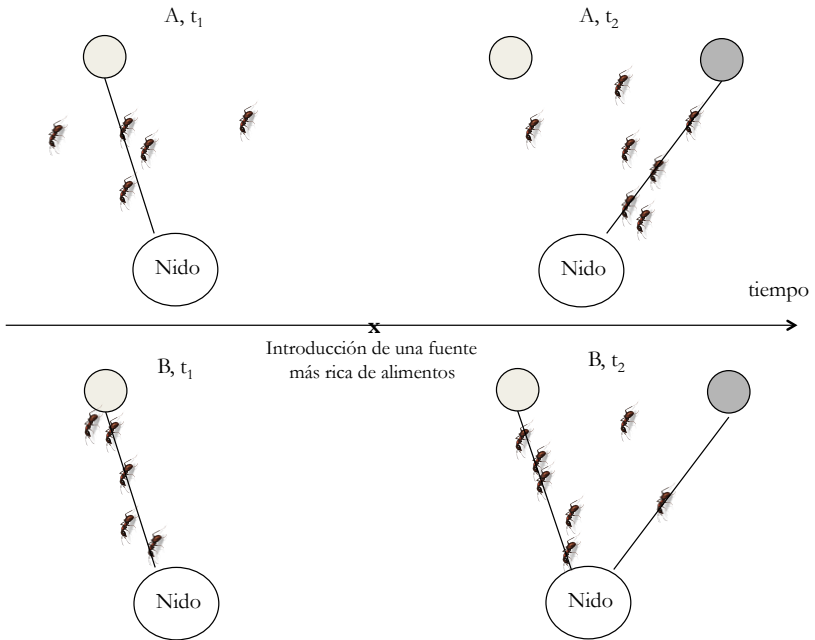


Figura 4.6. El papel del ruido en las Colonias de Hormigas: A) Para un nivel alto de ruido (pobres rastros), las hormigas se encuentran dispersas en el forraje (t_1) y, si un alimento más rico se introduce más tarde (t_2), es probable que descubran y exploten preferiblemente esa nueva fuente. B) Para un bajo nivel de ruido (rastros fuertes), todas las hormigas se centran en el primer sendero (t_1) y cuando una nueva fuente más rica es introducida (t_2), la mayoría se mantendrá “atrapada” en la primera explotada la cual es subóptima (inspirado en [65]).

- *Sus reglas simples para decisiones complejas:* Una gran variedad de patrones se pueden generar a partir de un número asombrosamente pequeño de tipos de reglas de interacción. Al respecto, los mejor informados decidirán qué hacer, y pondrán en marcha el reclutamiento, colocando un rastro químico. Puesto que es obviamente imposible que cada hormiga consiga una exhaustiva representación de su ambiente, en un tiempo razonable, los exploradores tienen que confiar en algunos criterios funcionales, basados en la información local adquirida. Estos criterios gobiernan las reglas de comportamiento (pueden ser presentadas bajo la forma “si entonces”, por ejemplo “si no puedo recuperar solo ese alimento, entonces debo dejar un rastro de reclutamiento”). Esas reglas pueden ser simples en su lógica, pero producen respuestas grupales eficientes (por ejemplo, la selección del mejor recurso, evitar áreas sin interés, etc.). Una regla de decisión simple puede aumentar la cantidad del feromona de reclutamiento, en función del valor nutritivo (tal como la concentración de azúcar⁴³). Generalmente, en las sociedades de insectos, para reducir las decisiones colectivas incorrectas, y hacer frente a la complejidad de su ambiente, usan reglas de decisión basadas en criterios “inteligentes”. Por ejemplo, un simple criterio de reclutamiento es el de *recuperabilidad de una presa*: un explorador decide reclutar tan pronto como no pueda recuperar individualmente la presa. Una presa muy grande hace dejar un rastro muy intenso, tal que un número grande de trabajadores se dirigirán a la presa. El criterio de *recuperabilidad de una presa* es altamente funcional, porque integra automáticamente la información sobre el tamaño, la forma y el peso de la presa, pero también sobre factores ambientales que pueden influir en el transporte del alimento (por ejemplo, factores sociales, como el número de hormigas que cooperan, ver figura 4.7). En el caso de fuentes líquidas de alimento, otro criterio de decisión “inteligente” es el de “*la capacidad para inferir un volumen*” [66]. Esto significa que antes de decidir reclutar, cada exploradora tiene que inferir el volumen encontrado. Esta regla del reclutamiento basado en el *modelo de umbral de respuesta* que veremos más adelante, permite a una colonia ajustar el número de hormigas a reclutar. En general, en estos ejemplos las hormigas usan reglas de decisión,

⁴³ Es un criterio válido cuando existen varias fuentes de alimento de calidad diversa, tal que la cantidad de feromona (x) en la rama que lleva a la fuente de alimento más nutritiva será más alta, y por lo tanto más probable a ser seguida. Esto permite un ajuste eficiente de la colonia al valor real del recurso disponible.

basadas en criterios que les permiten tomar decisiones rápidas en un ambiente evolutivo, en vez de mecanismos centralizados perfectamente informados, basadas en criterios que para calcularlos se desperdicia mucho tiempo. Determinando los criterios inteligentes relevantes a una estrategia de comportamiento, las especies de hormigas logran cifrar esa información, en los individuos de las próximas generaciones.

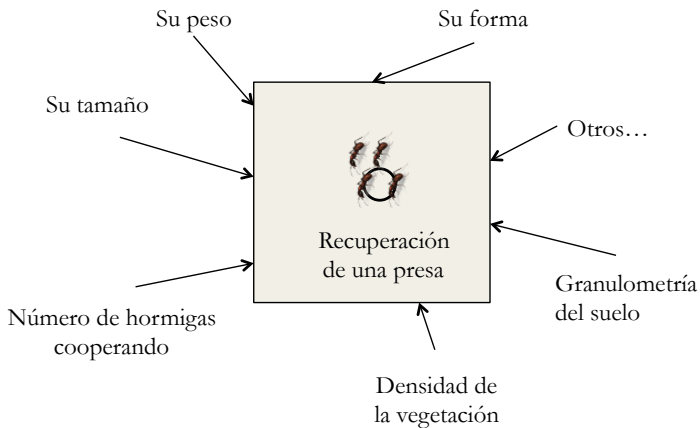


Figura 4.7. Ejemplo de un criterio inteligente. La capacidad de un insecto para recuperar una presa determina su decisión de reclutamiento colectivo, y por lo tanto el patrón de forrajeo. Varios parámetros son integrados en el criterio “recuperación de una presa” (tomado de [65]).

- Las *capacidades de estimación de las hormigas (número de individuos/recursos, etc.)*: en los sistemas fisicoquímicos, las leyes de interacción entre las unidades y el número de ellas son invariantes. La situación es absolutamente diferente en las sociedades de hormigas: por ejemplo, las exploradoras pueden modificar su comportamiento, así como su patrón de interacción, dependiendo de su opinión sobre el número de compañeras presentes en la colonia. De hecho, ellas pondrán énfasis en el rastro de reclutamiento y en una explotación colectiva del alimento, cuando viven en una colonia grande, mientras que las colonias pequeñas realizan principalmente, una recuperación individual del alimento. Las hormigas han desarrollado herramientas “estadísticas” para determinar el nivel de ocupación de

una localidad, y para definir, por consiguiente, su comportamiento y comunicación. Los contactos físicos directos con otras hormigas, son formas para determinar el tamaño del grupo, sin requerir contar. De hecho, hay una relación espacial básica entre el tamaño del grupo y las interacciones: cuando las hormigas caminan aleatoriamente, el número que se toparán, y el tiempo transcurrió entre los encuentros, dependerá de la densidad de las hormigas. Esa capacidad de las hormigas es la base de estrategias territoriales. Por ejemplo, cuando dos hormigas hostiles se encuentran, se da una batalla entre ellas. Generalmente, una se rinde y la ganadora pronto encuentra a otro opositor. La fuerza del enemigo es determinada por el índice de encuentros que ha experimentado, pero también por el tiempo de espera antes de encontrar a un nuevo opositor. Una espera larga para enfrentar a un enemigo, significa una pequeña colonia, mientras que una espera corta significa una colonia grande. No obstante, no solo formas directas son usadas por las hormigas. Por ejemplo, la concentración del rastro de feromona proporciona una señal social: cuanto más grande es la ocupación de un lugar, más alta es la cantidad de ella. La integración de una señal de densidad en el proceso de toma de decisión, es interesante para las tareas de reclutamiento, especialmente cuando es grande la fuente de alimento. De esta manera, las hormigas son sensibles, tanto a las oportunidades ambientales, como también al contexto social en el cuál viven. Así, sus comportamientos son adaptados, dependiendo de las señales directas (por ejemplo, encuentros) como indirectas, producidas por ellas mismas (por ejemplo, la intensidad del feromona). La capacidad adaptativa de la colonia basada en tales señales sociales, es enorme.

Basado en los aspectos señalados anteriormente, esenciales para los comportamientos emergentes de las hormigas, se han propuesto en la literatura varias metaheurísticas⁴⁴. A continuación describiremos algunos de esos comportamientos emergentes.

⁴⁴ Una metaheurística es algoritmo/método aplicables a un amplio conjunto de problemas. Las metaheurísticas buscan encontrar soluciones de alta calidad, más que la optima, en un tiempo de ejecución razonable.

4.2.1.1 Búsqueda de Alimento

El primer algoritmo aplicable a un problema de optimización combinatoria⁴⁵ inspirado en el comportamiento de las hormigas cuando siguen rastros, es para el caso cuando buscan alimentos, el cual fue definido por Dorigo y otros en [55, 56]. Ese algoritmo de optimización, llamada *Colonia de Hormigas Artificiales* (ACO por sus siglas en ingles), es una metaheurística en la que una colonia de hormigas artificiales coopera para encontrar buenas soluciones a problemas difíciles de optimización discreta⁴⁶. La cooperación es un componente clave en el diseño de ACO: se basa en un conjunto de agentes relativamente simples (hormigas artificiales), que se comunican indirectamente por estigmergia⁴⁷. Las buenas soluciones son una propiedad emergente de la interacción entre los agentes. Los algoritmos ACO se pueden utilizar para resolver, tanto problemas de optimización combinatoria

⁴⁵ Los problemas de optimización combinatoria son complejos para resolver, y se les denomina NP-completos o NP-difíciles, es decir, no pueden ser resueltos de manera óptima en un tiempo polinómico. Por lo tanto, para resolver grandes instancias de ellos, a menudo hay que utilizar métodos aproximados que hayan soluciones casi óptimas en un tiempo relativamente corto. El objetivo de resolver un problema de optimización es encontrar una solución factible óptima (normalmente consiste en la minimización/maximización de una función objetivo). Una estrategia de resolución sencilla sería la búsqueda exhaustiva, es decir la enumeración de todas las soluciones posibles y la elección de la mejor. Lamentablemente, en los problemas NP-completos, un enfoque como ese es inviable, porque el número de posibles soluciones crece exponencialmente con el tamaño del problema (un ejemplo de ese tipo de problema es el del viajero de comercio). En general, los problemas combinatorios se clasifican en dos clases: los que se sabe que son resolubles en tiempo polinomial, y los que no. Por otro lado, dos clases de algoritmos existen para la solución de problemas de optimización combinatoria: los algoritmos exactos y los aproximados. Los *algoritmos exactos* garantizan encontrar la solución óptima para cada instancia del problema. En el caso de los problemas NP-completos, los algoritmos exactos necesitan, en el peor de los casos, un tiempo exponencial para encontrar el óptimo. Aunque para algunos problemas específicos los algoritmos exactos se han mejorado significativamente en los últimos años, en la mayoría de los problemas NP-difíciles siguen teniendo un desempeño no satisfactorio. La garantía de encontrar óptimas soluciones puede ser sacrificada, en aras de conseguir soluciones muy buenas en tiempo polinomial. Los *algoritmos aproximados* tienen ese objetivo. Ellos pueden ser clasificados como: *constructivos* o métodos de *búsqueda local*. Los constructivos generan soluciones desde cero, adicionando componentes a la solución, hasta que la solución se haya completado. Los de búsqueda local, o iterativos, parten de una solución inicial, y tratan de mejorarla a través de cambios locales.

⁴⁶ Problemas cuyas variables de la función objetivo pueden solamente tomar valores discretos.

⁴⁷ Recuérdese que es una comunicación indirecta mediada por el medio ambiente

estáticos como dinámicos⁴⁸.

El problema elegido para las primeras experiencias con ACO fue el del Viajero de Comercio (conocido como TSP por sus siglas en ingles). En dicho problema, uno tiene que encontrar un circuito cerrado de longitud mínima de conexión entre n ciudades. Cada ciudad debe ser visitada una vez, y sólo una vez. El problema se puede definir como un grafo $G=(V, E)$, donde las ciudades son los vértices (V), y las conexiones entre las ciudades son los arcos (E). El grafo no necesita estar completamente conectado, y la matriz de distancia no tiene por qué ser simétrica (si es asimétrica, el problema correspondiente se denomina asimétrico-TSP). Además, los arcos son pesados por una variable D_{ij} , que es la distancia entre las ciudades c_i y c_j . En el algoritmo de Dorigo y otros [56], las hormigas construyen soluciones en paralelo, al visitar secuencialmente las ciudades del grafo. En cada arista (i, j) del grafo, cada hormiga k deja un rastro de feromona $\Delta\tau_{ij}^k(t)$, que es sumado al rastro en la arista $\tau_{ij}(t)$. Así, los rastros de las aristas son actualizados mediante un procedimiento de refuerzo: cada vez que una hormiga ha completado un recorrido, se adiciona en los arcos recorridos por ella, una cantidad de feromona proporcional a la calidad del recorrido (solución) que obtuvo la hormiga. Más formalmente, en la iteración t , después de completar su recorrido $T_k(t)$, la hormiga k -ésima deja una cantidad de feromona igual a:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{si arco } (i, j) \in T_k(t) \\ 0 & \text{si arco } (i, j) \notin T_k(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

Donde, Q es un parámetro ajustable y L_k es la longitud del recorrido hecho por la hormiga k (en este caso, se supone que la calidad del recorrido es determinada por la longitud del mismo).

⁴⁸ Los *problemas estáticos* son aquellos en los que las características del problema se dan una vez por todas cuando el problema es definido, y no cambian mientras el problema se resuelve (un ejemplo es el problema del viajero de comercio, en los que lugares y sus distancias relativas son parte de la definición del problema, y no cambian). En cambio, los *problemas dinámicos* se definen en función de algunas cantidades, cuyos valores son fijados por la dinámica del sistema subyacente. Los cambios instancian al problema en tiempo de ejecución, y el algoritmo de optimización debe ser capaz de adaptarse a dichos cambios en la caracterización del problema (un ejemplo son los problemas de enrutamiento en las redes de comunicación, en la que tanto los datos como la topología de la red pueden variar en el tiempo).

Los valores de $\tau_{ij}(t)$ son utilizadas por las hormigas cuando van construyendo sus recorridos, para tomar la decisión sobre que sitio seguir. De esta manera, los algoritmos ACO permiten al mismo tiempo, de forma asincrónica, construir varias soluciones de forma incremental. En general, una hormiga artificial en ACO sigue un procedimiento constructivo estocástico, que de forma incremental, construye una solución mediante la adición de componentes a la solución. Cada hormiga k se inicia con una solución parcial compuesta por un elemento (uno de los elementos de V), y agrega componentes en cada iteración b , hasta que una solución factible completa es construida, donde b es el contador de pasos. Los componentes a agregarse a la solución de la hormiga k en el paso b , son estocásticamente escogidos en una forma adecuada, desde el último componente agregado. La elección estocástica de las hormigas, se hace usando una política de decisión local, que usa la información local disponible en los posibles vértices a visitar. Así, las hormigas construyen soluciones usando una regla de transición probabilística. La probabilidad $p_{ij}^k(t)$ con la que una hormiga k en la ciudad i en la iteración t elige pasar a la ciudad j , es determinada por la función de transición siguiente:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (n_{ij})^\beta}{\sum_{l \in J_k(i)} (\tau_{il}(t))^\alpha (n_{il})^\beta} & \text{si } j \in J_k(i) \\ 0 & \text{si } j \notin J_k(i) \end{cases} \quad (4.3)$$

Donde, α y β son dos parámetros ajustables, para controlar la influencia entre la intensidad del feromona y una heurística de deseabilidad de un vértice (n_{ij}), para todos los vértices j no visitados aún por la hormiga k y son posibles de visitar desde i (tienen un arco que los conecta, determinado por $J_k(i)$). En particular, n_{ij} es una medida heurística de la conveniencia del arco i, j en la solución en construcción⁴⁹. Si $\alpha=0$, las ciudades más cercanas tienen más probabilidades de ser seleccionadas (corresponde a un clásico algoritmo estocástico con múltiples puntos de partida, ya que las hormigas son inicialmente distribuidas al azar en las ciudades). Si por el contrario, $\beta=0$, sólo el feromona trabaja, conllevando a una situación en la que todas las hormigas generan una misma solución sub-óptima. El equilibrio entre las dos parece ser necesario [55, 56].

⁴⁹ En TSP, dicha medida heurística puede ser $1/D_{ij}$, es decir, la inversa de la distancia entre las ciudades i y j .

Como dijimos antes, una vez que una hormiga ha construido una solución, agrega feromonas (información) sobre la calidad de la solución en los componentes y/o conexiones que utilizó (en algunas versiones de ACO, cuando la solución se está construyendo, la hormiga evalúa la solución parcial, y hace en ese momento la agregación en el arco que está recorriendo). Esta información de feromona va a dirigir la búsqueda de las hormigas en las iteraciones siguientes. Por último, se requiere un proceso de evaporación de feromonas (al inicio, la exploración del espacio de búsqueda es al azar, y los valores de los rastros de feromona en las fases iniciales son poco informativos. Por ello es necesario que el sistema poco a poco los olvide, para permitir a las hormigas avanzar hacia mejores soluciones). La evaporación de feromonas es el proceso por el cual el rastro de feromona automáticamente disminuye con el tiempo. En la mayoría de las aplicaciones de problemas de optimización combinatoria, las dos tareas se equilibran: la evaporación y el depósito de feromonas. Al inicio se supone una distribución homogénea de la feromona en el instante $t=0$, y a partir de allí se usa un mecanismo de actualización del feromona, el cual usa un coeficiente de evaporación ρ , donde $0 < \rho \leq 1$, de tal manera que:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (4.4)$$

Donde, $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$, y m es el número de hormigas.

El número m total de hormigas (que se supone constante a lo largo del tiempo) es un parámetro importante. Muy pocas hormigas no producen los efectos esperados de cooperación. Por el contrario, muchas hormigas resulta en un sistema computacional menos eficiente: la calidad de los resultados obtenidos, después de un número determinado de iteraciones, no mejora de manera significativa, además, se tarda más en realizar una iteración el algoritmo. Dorigo sugiere que $m=n^{50}$ proporciona un buen equilibrio [55].

En general, un algoritmo ACO tiene tres procedimientos [55, 56]:

- *Construcción de soluciones:* el grupo de hormigas de la colonia, al mismo tiempo, y de forma asincrónica, visitan estados adyacentes del problema, moviéndose a través de nodos vecinos de un grafo que describe el problema. Se mueven usando un esquema de decisión es-

⁵⁰ Donde n es la longitud del recorrido que debe hacer cada hormiga. En TSP dicho valor es igual al número de ciudades a visitar.

tocástico local, basado en los rastros de feromona y en información heurística. De esta manera, las hormigas construyen soluciones de forma incremental.

- *Actualización del feromona:* es el proceso mediante el cual los rastros de feromona se modifican. Los valores de los senderos pueden aumentar, cuando las hormigas depositan feromona en los componentes o conexiones que utilizan, o disminuir, debido a la evaporación de la feromona. Desde el punto de vista práctico, el depósito de feromona aumenta la probabilidad de que los senderos que fueron utilizados por muchas hormigas, o que fueron utilizados por lo menos por una hormiga y produjo una muy buena solución, sean utilizados de nuevo por las hormigas en el futuro. La evaporación de feromona implementa una forma útil de olvidar: evita una convergencia muy rápida del algoritmo hacia una región subóptima, por lo tanto, favorece la exploración de nuevas áreas del espacio de búsqueda. En general, para la actualización de la feromona, existen varios procedimientos en la literatura: la adición de feromona sólo en los arcos que pertenecen a las mejores soluciones, la actualización en cada iteración solo en los arcos de la mejor parcial solución hasta ahora, etc.
- Por último, un *procedimiento centralizado* se utiliza para implementar acciones que no pueden realizar las hormigas individualmente. Ejemplo de acciones son la activación de un procedimiento de optimización local, o la observación del trayecto de cada hormiga en la colonia y la selección de una de ellas (por ejemplo, aquella que construyó la mejor solución), para permitirle depositar feromona adicional sobre los senderos que utilizó.

Un macro-algoritmo del mismo se muestra a continuación [55, 56]:

Fijar numero de hormigas m en la colonia

Repetir hasta que el sistema llegue a una buena solución

Colocar las m hormigas en una posición inicial i

Para $i = 1, n$

Para $k = 1, m$

Selección del nodo j por donde pasará la hormiga k , que está en la posición i , usando Ec. (4.3)

Mover la hormiga m al nodo j (actualizar posición de la hormiga).

Actualización del feromona en cada arista usando Ec. (4.4).

El rastro de feromona es una memoria a largo plazo del proceso de búsqueda de la hormiga. Cada hormiga k de la colonia tiene las siguientes propiedades:

- Aprovecha el grafo para buscar buenas soluciones,
- Tiene una memoria que puede utilizar para almacenar información sobre el camino que siguió hasta el momento. La memoria puede ser utilizada para: 1) construir soluciones factibles, 2) calcular el valor heurístico de la función de transición, 3) evaluar la solución encontrada, y 4) devolverse.
- Tiene un estado inicial. Por lo general, ese estado se expresa como una secuencia vacía o una secuencia de un solo componente.
- Cuando no se cumple la condición de terminación (solución completa), se mueve a un nodo j en su vecindad ($j \in J_k(i)$). Si al menos una de las condiciones de terminación se cumple, entonces la hormiga se para.
- Usa una regla de decisión probabilística, la cual está basada en: 1) los rastros de feromona locales, 2) las conexiones en la zona de ubicación actual de la hormiga en el grafo, 3) la memoria privada de la hormiga donde almacena su estado actual, y 4) las restricciones del problema.
- Cuando agrega un componente j a la solución actual, puede eventualmente actualizar la feromona.
- Una vez que ha construido una solución, puede recorrer el mismo camino hacia atrás, y actualizar el rastro de feromona de los componentes utilizados.

Es importante tener en cuenta que las hormigas actúan simultáneamente, y de manera independiente, y que aunque cada hormiga es lo suficientemente compleja como para encontrar una solución (probablemente pobre), las soluciones de buena calidad sólo pueden surgir como resultado de la interacción colectiva entre las hormigas. Esto se logra a través de la comunicación indirecta mediada por las hormigas, al leer o escribir en las variables de almacenamiento de feromona. En cierto modo, este es un proceso de aprendizaje distribuido, en el que los agentes individuales (las hormigas), no son adaptables en sí mismos, sino, por el contrario, de forma adaptativa, modifican la forma como el problema es representado y percibido por todos.

Dicho algoritmo ha sido aplicado con éxito en muchos problemas de opti-

mización discreta, y en general, ACO se puede aplicar a cualquier problema de optimización combinatoria en el que una heurística constructiva pueda ser definida. El problema al usar ACO, es cómo definir una representación que pueda ser utilizada por las hormigas artificiales para construir soluciones. Esto es aun más complejo en los problemas de optimización dinámico, donde el parámetro t indica que la función objetivo y las características del problema pueden ser dependientes del tiempo (por ejemplo, en el caso del problema de enrutamiento un nodo de la red de repente puede ser inalcanzable). Entre los problemas más estudiados están el del viajero de comercio, la asignación cuadrática y el enrutamiento en redes de telecomunicaciones. En esas aplicaciones, se ha observado lo siguiente:

- Los resultados obtenidos por la aplicación de ACO son muy alentadores (son a menudo mejores que los obtenidos por otras metaheurísticas, como la computación evolutiva o el recocido simulado).
- AntNet, un algoritmo ACO para el enrutamiento de redes de conmutación de paquetes, superó en calidad a un número importante de algoritmos de enrutamiento.
- HA-SOP, un algoritmo ACO junto a una rutina de búsqueda local, ha mejorado muchos de los mejores resultados conocidos en un amplio conjunto de problemas, como los de encontrar la menor ruta de Hamilton, el de la mochila multidimensional, etc.

Según [56], las propiedades de convergencia de los algoritmos ACO garantizan encontrar una solución óptima con una probabilidad cercana a 1. Esa probabilidad tendiendo a 1 de que una hormiga consiga una solución óptima, es debido a que los rastros malos tienden a disminuir con el tiempo hacia cero, siendo su disminución lenta la que garantiza encontrar la solución óptima. Lo anterior ha sido demostrado en [56], de la siguiente forma:

Antes que nada, se debe constatar que debido a la evaporación del feromona el máximo nivel posible de feromona (τ_{\max}) está asintóticamente delimitado [56].

Proposición 4.1. Para cualquier τ_{ij} se tiene que:

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \tau_{ij}(\theta) \leq \tau_{\max} = \frac{qf(s^*)}{\rho}$$

Donde qf es una función de calidad, que debe ser de tipo no-creciente con respecto a f (función objetivo del problema bajo estudio), es decir si $f(s_1) > f(s_2)$ entonces $qf(s_1) \leq qf(s_2)$.

Para realizar la prueba de la suposición 4.1, supondremos que solo la mejor solución obtenida actualiza el feromona. Así, la proposición 4.1 es válida debido a que la máxima cantidad posible de feromona añadida a cualquier arco (i, j) , después de cualquier iteración, es $qf(s^*)$, donde s^* es la solución óptima. En la iteración 1, el máximo feromona posible es $(1 - \rho)\tau_0 + qf(s^*)$, en la iteración 2 es $(1 - \rho)^2 \tau_0 + (1 - \rho)qf(s^*) + qf(s^*)$, y así sucesivamente. Por lo tanto, debido a la evaporación de feromonas, el rastro en la iteración θ , es delimitado por:

$$\tau_{ij}^{\max}(\theta) = (1 - \rho)^{\theta} \tau_0 + \sum_{i=1}^{\theta} (1 - \rho)^{\theta-i} qf(s^*)$$

Como $0 < \rho \leq 1$, esa suma converge asintóticamente a $\tau_{\max} = \frac{qf(s^*)}{\rho}$

Proposición 4.2. Una vez que una solución óptima s^* se ha encontrado, se tiene que:

$$\forall i, j \in s^* : \lim_{\theta \rightarrow \infty} \tau_{ij}^*(\theta) = \tau_{\max} = \frac{qf(s^*)}{\rho}$$

Donde, τ_{ij}^* es el valor del rastro de feromona en la conexión $(i, j) \in s^*$.

Lo anterior quiere decir que, una vez que se ha encontrado una solución óptima, es válida la proposición 1, pero ahora solo en los arcos de la solución óptima, ya que son los únicos arcos que se actualizan con el feromona dejado por la solución optima (por consiguiente, τ_0 es sustituido por $\tau_{ij}^*(\theta^*)$, donde θ^* es la iteración donde fue encontrado por primera vez s^*). La proposición 4.2 establece que los valores de τ_{ij}^* convergen en τ_{\max} .

Proposición 4.3. Una vez que una solución óptima ha sido encontrada, para cualquier τ_{ij} , tal que $(i, j) \notin s^*$, se da que:

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} \tau_{ij}(\theta) = 0$$

La proposición 4.3 es válida, ya que τ_{ij} empezará a decrecer para $(i,j) \notin s^*$, porque esos arcos dejarán de recibir feromonas, una vez encontrada la solución óptima (solo se evapora el feromona). Eso se puede constatar de la siguiente manera, supongamos que el límite inferior del rastro de feromona en ACO es [56]:

$$\forall \theta \geq 1: \tau_{\min}(\theta) = \frac{d}{\ln(\theta + 1)}$$

Donde d es cualquier constante. Después de la iteración donde fue encontrado s^* , $\tau_{ij}(\theta^* + 1) = \max(\{\tau_{\min}(\theta), (1-\rho)\tau_{ij}(\theta^*)\})$, después de dos iteraciones será $\tau_{ij}(\theta^* + 2) = \max(\{\tau_{\min}(\theta), (1-\rho)^2\tau_{ij}(\theta^*)\})$, y así sucesivamente. Adicionalmente, $\lim_{\theta \rightarrow \infty} \frac{d}{\ln(\theta^* + \theta + 1)} = 0$ y $\lim_{\theta \rightarrow \infty} (1-\rho)^0 \tau_{ij}(\theta^* + \theta) = 0$, por consiguiente, $\lim_{\theta \rightarrow \infty} \tau_{ij}(\theta^* + \theta) = 0$

Partiendo de esas proposiciones, si $P^*(\theta)$ es la probabilidad de encontrar la solución óptima en algunas de las q iteraciones, para un valor de $\varepsilon > 0$ muy pequeño y θ muy grande, $P^*(\theta) \geq 1 - \varepsilon$, por consiguiente, podemos afirmar que:

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} P^*(\theta) = 1$$

Además, si $P(s^*, \theta, k)$ es la probabilidad que una hormiga k construya s^* en la iteración θ , tal que $\theta > \theta^*$, entonces podemos afirmar que:

$$\lim_{\theta \rightarrow \infty} P(s^*, \theta, k) = 1$$

Ver [56] para los detalles de la demostración de las dos últimas afirmaciones.

ACO es equiparable con otras metaheurísticas, como el recocido simulado, la computación evolutiva y la búsqueda tabú. Ahora bien, aun existen temas de investigación en esta área, como su óptima extensión a problemas de optimización más complejos, tales como: (1) problemas dinámicos⁵¹, (2) problemas estocásticos⁵², (3) problemas múltiojetivos⁵³, etc.

⁵¹ Como dijimos antes, un problema dinámico es tal que algunas de las características del problema cambian a través del tiempo. Pueden ser los datos de instanciación (tales que afectan los valores de la función objetivo), los parámetros de decisión, las restricciones, etc. Un ejemplo es el problema de TSP, donde las ciudades pueden ser eliminadas o añadidas con el tiempo. Usando ACO, hay varias formas de resolverlo. La primera consiste en un simple reinicio del algoritmo, tal que todos los rastros de feromona se reinician. Otra forma es aplicando un operador de reparación para las soluciones de la población, y a partir de allí regenerar la feromona según las soluciones de la reparación.

⁵² La optimización estocástica se usa en los casos en los que los problemas tienen algunas de sus variables definidas estocásticamente (los posibles valores adoptados por algunas de sus variables, el valor devuelto por la función objetivo, el valor de las restricciones, etc.). Un problema de optimización estocástico y dinámico, son las redes de enrutamiento.

⁵³ Muchos de los problemas del mundo real requieren la evaluación de múltiples objetivos, a menudo en conflicto. En este tipo de problemas, que se llaman problemas de optimización multiobjetivos (MOOPs por sus siglas en inglés), el objetivo es encontrar una solución que ofrece el mejor compromiso entre los distintos objetivos. La selección de una solución de compromiso tiene que tener en cuenta las preferencias del tomador de decisiones. Hay diferentes maneras para determinar ese compromiso. Por ejemplo, las soluciones compromiso pertenecen a lo que se ha llamado *conjunto de Pareto-óptimo*. Una solución está en dicho conjunto si no está dominada por cualquier otra solución (es decir, en al menos uno de los objetivos da la mejor solución). Por lo tanto, una posibilidad para resolver MOOPs es encontrar el conjunto óptimo de Pareto, o al menos una buena aproximación del mismo. Las soluciones del conjunto entonces se le pueden dar a quien toma las decisiones, para que elija entre ellas en función de criterios personales. Por otro lado, si el tomador de decisiones puede darle pesos o prioridades a los objetivos, antes de resolver el problema, el MOOP se puede transformar en un problema con un objetivo. Las primeras aplicaciones de ACO a la solución de problemas de optimización multiobjetivos se basan en objetivos priorizados. Pocos enfoques tratan de aproximar el conjunto de Pareto-óptimo. Doerner, Gutjahr, Hartl, Strauss, y Stummer [55] proponen un enfoque, donde para cada uno de los objetivos existe una matriz de feromonas, y una hormiga construye una solución basada en una combinación ponderada de las matrices de feromonas. Cuando las hormigas terminan la construcción de sus soluciones, las matrices de feromona para cada objetivo se actualizan, tal que las hormigas con las mejores soluciones en cada objetivo depositen feromona. Otro ejemplo es un algoritmo ACO multicolonial, en los que cada colonia se especializa en una región diferente del frente de Pareto. Para la construcción de la solución, una hormiga utiliza una combinación ponderada de las feromonas y de la información heurística, con respecto a los diferentes objetivos. Después que las hormigas de todas las colonias han completado su solución, las hormigas que hallaron el conjunto de todas las soluciones no dominadas de todas las colonias, pueden depositar feromonas.

Algunos otros algoritmos inspirados en el comportamiento de forrajeo de las colonias en búsqueda de alimentos, son los de Wagner, Lindenbaum, y Bruckstein [198], donde proponen dos algoritmos para la exploración de un grafo llamados, respectivamente, “Edge Ant Walk” y “Vertex Walk”, en el que las hormigas artificiales recorren los arcos del grafo con una idea similar a la que inspiró a ACO, pero cuya aplicación real es muy diferente. En [198] el rastro de feromona se utiliza como una memoria distribuida, que dirige las hormigas hacia áreas no exploradas del espacio de búsqueda, con el objetivo de cubrir el grafo, es decir, visitar todos los nodos [199]. Ese algoritmo fue posteriormente modificado, para ser aplicado en grafos que cambian. Una aplicación interesante de ese trabajo es en la búsqueda en Internet, para darle seguimiento a los cientos de miles de páginas que se agregan o desaparecen cada día.

Otro modelo estocástico, semejante al de ACO, es el de Deneubourg et al. [56, 65], el cual describe la dinámica de la colonia de hormigas cuando es confrontada a dos ramas. En ese modelo, n hormigas por segundo se mueven en ambas direcciones, a una velocidad constante de v cm/s, depositando una unidad de feromona en las ramas. Dada las longitudes l_s y l_l (en cm) de la rama más corta (s) y más larga (l), una hormiga que selecciona la rama más corta, la atravesará en $t_s=v/l_s$ segundos, y la más larga en $t_l=v/l_l$ (ver figura 4.2). En ese modelo, la probabilidad $p_{is}(t)$ que una hormiga llegando a una de las bifurcaciones i (ver figura 4.2) seleccione uno de los dos caminos ($a \in \{s, l\}$) en el instante t , depende de la cantidad de feromona ($\tau_{ia}(t)$), el cual es proporcional al número de hormigas que han usado ese camino. Por ejemplo, para $p_{is}(t)$ tenemos [55]:

$$p_{is}(t) = \frac{(t_s + \tau_{is}(t))^\alpha}{(t_s + \tau_{is}(t))^\alpha + (t_l + \tau_{il}(t))^\alpha} \quad (4.5)$$

Tal que $p_{is}(t) + p_{il}(t) = 1$ en cualquier instante t , y α da la forma a la ecuación (en [55] determinaron experimentalmente, que el valor ideal de α es 2).

Como dijimos antes, este modelo supone que la cantidad de feromona en una rama es proporcional al número de hormigas que utilizó el arco en el pasado, es decir, no se evapora el feromona en el modelo. Las ecuaciones que describen la evolución del sistema estocástico son [55, 56]:

$$\frac{d\tau_{is}}{dt} = n * p_{ji}(t - t_s) + n * p_{is}(t) \quad \text{para } (i = 1; j = 2 \text{ o } i = 2; j = 1)$$

$$\frac{d\tau_{il}}{dt} = n * p_{ji}(t - r * t_s) + n * p_{il}(t) \quad \text{para } (i = 1; j = 2 \text{ o } i = 2; j = 1)$$

Donde $r = l_1 / l_s$

En la figura 4.8 se muestran los resultados de dos experimentos, que consisten en 1000 simulaciones, en donde la relación (r) entre las ramas se estableció como $r=1$ y $r=2$, respectivamente. Se puede observar que cuando las dos ramas tienen la misma longitud ($r = 1$), las hormigas convergen en el uso de una u otra de las ramas con igual probabilidad. Por el contrario, cuando una rama es dos veces más corta que la otra ($r = 2$), entonces en la gran mayoría de los experimentos las hormigas eligen la rama corta. En ese modelo, la feromona es depositada por las hormigas al moverse hacia adelante y hacia atrás. Es una condición necesaria para obtener un comportamiento convergente de la colonia de hormigas hacia el camino más corto. En efecto, si consideramos un modelo en el que las hormigas depositan feromona sólo “durante su avance o retroceso”, entonces la colonia de hormigas es incapaz de elegir el camino más corto. Eso es así también en las colonias de hormigas reales [48].

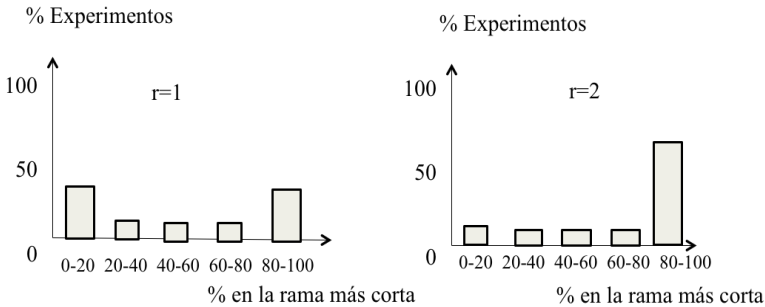


Figura 4.8. Resultado de las simulaciones con el Modelo de Deneubourg et al. [48], para $r=1$ y $r=2$.

Estos experimentos muestran claramente que las colonias de hormigas tienen la capacidad de optimización, usando un modelo probabilístico

basado en información local, para encontrar la ruta más corta entre dos puntos en su medio ambiente. En ese caso, la actualización de las dos ramas es la siguiente [56]:

$$\tau_{is}(t) = \tau_{is}(t-1) + p_{is}(t-1)m_i(t-1) + p_{js}(t-1)m_j(t-1) \quad (4.6)$$

$$\tau_{il}(t) = \tau_{il}(t-1) + p_{il}(t-1)m_i(t-1) + p_{jl}(t-r)m_j(t-r) \quad (4.7)$$

para ($i=1; j=2$, o $i=2; j=1$), donde $m_i(t)$ es el número de hormigas en el nodo i en el tiempo t ,

$$m_i(t) = p_{js}(t-1)m_j(t-1) + p_{jl}(t-r)m_j(t-r) \quad \text{para } (i=1; j=2 \text{ o } i=2; j=1)$$

Para el caso concreto de TSP, hay dos razones que explican la óptima aplicación de ACO en él. En primer lugar, el grafo de TSP puede ser directamente asignado como el grafo del algoritmo ACO. En segundo lugar, la función de transición tiene objetivos similares a los de TSP. Esto no es el caso en otros problemas de optimización combinatoria. En [9] han propuesto un algoritmo general para resolver problemas de optimización combinatoria basado en colonias de hormigas, llamado CAS por sus siglas en inglés (Combinatorial Ant Systems). En ese enfoque se deben definir:

- El grafo que describe el espacio de soluciones del problema de optimización combinatoria a resolver (llamado grafo CP). Así, el espacio de soluciones está definido por un grafo, donde los nodos representan posibles soluciones parciales al problema, y los arcos las relaciones entre dichas soluciones parciales. Ese grafo se utiliza para definir el grafo AS (grafo donde las hormigas caminarán).
- La función de transición y la fórmula de actualización de feromona de CAS, son construidas de acuerdo a la función objetivo del problema de optimización combinatoria. Cada hormiga construye una solución al caminar a través del grafo, usando una regla de transición, actualizando el feromona según fórmulas definidas de acuerdo a la función objetivo del problema de optimización combinatoria.

Los principales pasos de CAS son: (a) Generar el grafo AS, (b) Definir la función de transición y la ecuación de actualización de feromonas, (c) Ejecutar el clásico procedimiento de ACO (o alguna de sus versiones mejoradas), para el problema de optimización combinatoria en cuestión. Veamos los dos primeros pasos:

- *Construcción del grafo AS.* El primer paso es construir el grafo CP, y a continuación el grafo AS con la misma estructura del grafo CP. El grafo de AS tiene dos matrices de peso: la primera se define de acuerdo al grafo CP, y registra la relación entre los elementos del espacio de soluciones. La segunda registra el rastro de feromona acumulada en cada arco (matriz de feromona). Sus valores se calculan de acuerdo a la fórmula de actualización de feromona (ecuación (4.4)). Cuando los pesos de los arcos de la matriz de feromona que van hacia un nodo dado son altos, ese nodo tiene una alta probabilidad de ser visitado. Por otro lado, si el valor de una arista entre dos nodos de la matriz de CP es bajo, significa idealmente que si uno de estos nodos pertenece a la solución final, el otro debe pertenecer también. Si el valor del arco es igual al infinito, entonces significa que los nodos son incompatibles (no pueden estar al mismo tiempo en una solución final). Se define una estructura de datos para almacenar la solución que cada hormiga k construye. Esa estructura de datos es un vector (A_k) , con una longitud igual a la longitud de la solución (número de nodos que una hormiga debe visitar). Así, para una hormiga dada, el vector guarda cada nodo del grafo AS que ha visitado.
- *Definición de la función de transición y de la fórmula de actualización de feromona.* Ellas se construyen usando la función objetivo del problema de optimización combinatoria. La función de transición entre nodos es dada por:

$$Tf(\tau_{rs}(t), C_{r \rightarrow s}^{f^k}(z)) = \frac{\tau_{rs}(t)^\alpha}{C_{r \rightarrow s}^{f^k}(z)^\beta} \quad (4.8)$$

Donde $C_{r \rightarrow s}^{f^k}(z)$ es el costo de la solución parcial que ha construido la hormiga k , cuando cruza el arco (r, s) , si está en la posición r ; $z - 1$ es la longitud actual de la solución parcial (longitud actual de A_k); y β y α son dos parámetros ajustables, que controlan el peso relativo de

la intensidad de la traza $\tau_{rs}(t)$ y la función de costo. Cuando $\beta=0$, se aprovechan las soluciones anteriores (sólo la intensidad de la traza se utiliza), y cuando $\alpha=0$, se explora el espacio de soluciones (se comporta como un algoritmo estocástico). Un compromiso es necesario entre la calidad de las soluciones parciales y la intensidad de la traza.

Por otro lado, la probabilidad de transición de una hormiga k , situada en el nodo r , para moverse al nodo s , se calcula según la ecuación dada por:

$$p_{rs}^k(t) = \begin{cases} \frac{Tf(\tau_{rs}(t), C_{r \rightarrow s}^k(z))}{\sum_{n \in J_r^k} Tf(\tau_{rn}(t), C_{r \rightarrow n}^k(z))} & \text{si } s \in J_r^k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (4.9)$$

La regla de actualización de feromona es la misma definida por la ecuación 4.4, pero la cantidad de feromona que deja cada hormiga k en cada iteración t , en los arcos que atraviesa, se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{C_j^k(t)} & \text{si arco } (i, j) \text{ fue atravesado por la hormiga } k \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4.10)$$

Donde $C_j^k(t)$ es el valor de la función de costo (función objetivo) de la solución propuesta por la hormiga k en la iteración t . Si a esta última expresión se le retira el valor de t , la actualización del rastro sería al final de que una hormiga k haya encontrado una solución, y C_j^k sería el valor de esa solución final propuesta por ella.

El procedimiento general de este enfoque es [9]:

Generar el grafo AS.

Definir la regla de transición y la fórmula de actualización de feromona según el problema de optimización combinatoria.

Repetir hasta que el sistema llegue a una solución estable

Colocar cada una de las m hormigas en algunos de los nodos del grafo AS.

Para $i = 1, n$

Para $j = 1, m$

Seleccionar el nodo s adonde se moverá hormiga j usando la probabilidad de transición (Ec. (4.9)).

Mover la hormiga j al nodo s .

Actualizar la feromona usando ecuaciones 4.4 y 4.10.

4.2.1.2 División del trabajo

Un factor clave que contribuye al éxito impresionante ecológico de los insectos sociales es su organización social, y en particular, su división del trabajo. La división del trabajo es una importante característica en las colonias de hormigas, y en general, en los insectos sociales. La división del trabajo entre los miembros de una colonia les permite a sus miembros especializarse en ciertos roles, lo que mejora la eficiencia de la colonia, ya sea porque los trabajadores desarrollan habilidades específicas a través de la práctica, o porque los individuos se vuelven más y más espacialmente localizados, para realizar tareas específicas, lo que les posibilita reducir tiempo y consumo de energía [65]. El genotipo, la fisiología, la morfología, la edad, la experiencia, los entornos sociales, influyen en los patrones de asignación de las tareas. Considerar todos esos aspectos de manera dinámica, durante el proceso de división del trabajo, no sólo los hacen más eficientes (tal que se pueda realizar más trabajo, con un mínimo gasto de energía), sino también muy flexibles. Esto último, permite responder a perturbaciones y nuevas necesidades, ya sean internas o externas, de una manera rápida y robusta. Ahora bien, al pensarse en la especialización, se podría creer que aparece un posible costo por falta de flexibilidad, lo que podría ser importante, especialmente en entornos inestables. Para solventar eso, las colonias de insectos tienen ciertos mecanismos que estudiaremos más adelante [171].

Algunos ejemplos de división del trabajo, en las colonias de insectos, son cuando realizan la recolección y manejo de sus recursos, tales como

sus alimentos, agua y material, para construir el nido [148]. Cuando las proporciones relativas de los individuos, realizando las diferentes tareas, no son óptimas, la calidad de la información, de los procesos, no son las ideales, generando demoras, deficiencias, etc., en la colonia. Por ello, la organización del trabajo en las sociedades de insectos, requiere ajustes frecuentes en los números de individuos que realizan las diferentes tareas. Eso permite procesos adaptativos, por ejemplo en el caso de la búsqueda de alimentos, en respuesta a los cambios en la disponibilidad o en el costo de la recolección de alimentos. Un posible mecanismo adaptativo de una colonia, es que ciertos individuos recluten a otros individuos para la realización de tareas específicas, que mejoren el comportamiento de la colonia como un todo (la próxima sección estudia esto detalladamente). Otro posible mecanismo adaptativo, es cuando cada individuo introduce cambios en el ambiente, que permiten determinar el estado global de la colonia (por ejemplo, falta de alimentos), y en función de esa información que cada individuo es capaz de determinar, decide qué hacer (por ejemplo, buscar alimentos). En este último caso, es muy importante entender cómo esa adaptación se alcanza a partir de individuos que no poseen ninguna representación global de las necesidades de la colonia. Eso lo estudiaremos en lo que sigue.

En general, las sociedades tienen un tipo fundamental de división del trabajo, la división del trabajo reproductivo. Es una forma primaria de división del trabajo entre castas reproductivas y los otros individuos, que llamaremos trabajadores. Por otro lado, a menudo existe otra división del trabajo entre los trabajadores, en grupos que realizan tareas específicas (no son generalistas). Normalmente, los trabajadores se dividen en sub-castas por edad o morfología. Por ejemplo, una sub-casta por edad corresponde a individuos de la misma edad, que tienden a realizar tareas idénticas. También, en algunas especies, los trabajadores pueden tener diferentes morfologías, en esos casos los trabajadores que pertenecen a diferentes castas morfológicas tienden a realizar tareas diferentes (incluso dentro de una sub-casta, pueden darse divisiones de trabajos). En general, una especie de animales se dice que tiene propiedades sociales de división del trabajo, si tiene las siguientes características [65]:

- Divide los procesos de reproducción de sus otras tareas, tal que los individuos estériles trabajan en esas otras tareas, en favor de los que participan en la reproducción,

- Tiene un comportamiento de castas, que describe a los grupos de individuos que realizan el mismo conjunto de tareas, en un período de tiempo determinado.

La descripción y el análisis de las castas en la asignación de tareas en una colonia, son fundamentales para entender la organización de un sistema biológico complejo, cuyo funcionamiento depende de la conducta integrada, de un número potencialmente elevado de individuos. Investigaciones recientes han puesto de relieve la naturaleza dinámica, la característica auto-organizativa, de la división de tareas. La teoría de castas proporciona un marco conceptual, para examinar la capacidad adaptativa de un proceso de división del trabajo [65]. La teoría predice que el comportamiento de los individuos, se forma como parte de la evolución de la colonia [66]: Cada especie tiene su propio patrón evolutivo de división del trabajo (basado en la edad, en las características morfológicas, etc.). Dicho patrón de división del trabajo depende del número de trabajadores y reproductores, de la arquitectura del nido, del tamaño de la colonia, y de otras características de la especie. Dada la diversidad de los sistemas sociales en los insectos, es difícil definir un modelo generalizado [190].

Recordemos que en las colonias de hormigas, los individuos tienden a especializarse en ciertas tareas. Sin embargo, las hormigas pueden adaptar su comportamiento a las circunstancias [26, 27, 50, 55, 96, 108, 170, 188]: una hormiga soldado puede convertirse en recolectora, una hormiga enfermera en guardiana, y así sucesivamente. Robinson [28, 56, 108, 188] desarrolló un modelo, llamado *umbral de respuesta*, en el que los trabajadores con bajos umbrales de respuesta responden a niveles bajos de estímulos. Así, en ese modelo, los estímulos juegan el papel de variables estigmérgicas. El modelo de umbral de respuesta ha sido usado para describir la división del trabajo. En ese modelo, la ejecución de tareas reduce la intensidad de los estímulos para realizar dichas tareas. Los individuos tendrán bajos umbrales en sus tareas normales, y altos umbrales para las otras tareas. Si por cualquier razón, la intensidad de los estímulos asociados a tareas en las que ellos tienen altos umbrales aumenta, dichos individuos, en algún momento, participan en la realización de dichas tareas. Ese modelo sigue, de alguna forma, el proceso real de las colonias de insectos.

En el enfoque para asignación de tareas, basado en el modelo umbral de

respuesta [27, 108], los individuos empiezan a participar en la ejecución de tareas, cuando los niveles de estímulos asociados a las tareas (que desempeñan el papel de variables estigmérgicas) superan sus umbrales. Las diferencias en los umbrales de respuesta, reflejan diferencias reales en los individuos (por ejemplo, morfológicas). Cuando individuos especializados en una tarea determinada se retiran (tienen umbrales bajos de respuesta con respecto a los estímulos asociados a esa tarea), la demanda de trabajo asociada a la tarea aumenta (la intensidad del estímulo), hasta que finalmente, alcanza los umbrales de respuesta de los individuos restantes que no están inicialmente especializados en esa tarea, teniendo el efecto de estimular a esos individuos, a realizar dicha tarea.

Así, los individuos con diferentes umbrales, responden de manera diferente a los estímulos asociados a tareas [26, 27, 108, 188]. El modelo asume que los trabajadores son capaces de evaluar las necesidades de la colonia, a través de los estímulos, provocando la ejecución de tareas (la naturaleza de estos estímulos, y cómo se perciben, no son cuestiones definidas por el modelo). De esta manera, el modelo umbral de respuesta se refiere a la posibilidad de reaccionar a estímulos asociados a las tareas. Además, el modelo tiene un mecanismo adaptativo [27, 188]: cuando un trabajador realiza una tarea determinada, se disminuye el umbral correspondiente; mientras que cuando no realiza una tarea dada, aumenta el umbral correspondiente. Este proceso de refuerzo combinado, da lugar a la aparición de mano de obra especializada, es decir, los trabajadores son más sensibles a los estímulos asociados con una tarea en particular, partiendo de un grupo de individuos inicialmente idénticos. Un modelo de umbral de respuesta, que asume que los umbrales de los trabajadores son fijos en el tiempo, tiene varias limitaciones [27, 188]:

- Asume que los individuos son diferentes y tienen preasignados funciones;
- No consideran la posibilidad de castas por edad,
- Sólo son válidos durante escalas de tiempo cortas, donde los umbrales se pueden considerar constantes,
- No son compatibles con los modelos de sistemas reales de insectos, de asignación de tareas.

Es por esa razón que se ha extendido el modelo, para permitir que los umbrales varíen en el tiempo, tras un proceso de refuerzo combinado simple.

Pero, ¿En qué consiste el modelo umbral de respuesta? Sea s la intensidad de un estímulo asociado a una tarea particular (s puede ser una serie de encuentros, una concentración de un producto químico, o cualquier referencia cuantitativa detectada por los individuos). Un umbral de respuesta θ es una variable expresada en unidades de la intensidad del estímulo, que ayuda a determinar la tendencia de un individuo para responder a los estímulos y realizar la tarea asociada a s . A partir de la variable umbral de respuesta, se debe poder calcular la probabilidad de realizar una tarea dada (llamada función de respuesta), la cual será baja para s pequeños y alta para s grandes. Una función de respuesta $T_\theta(s)$, parametrizada con el umbral de respuesta que satisface esa exigencia, es [26, 27, 56, 188]:

$$T_\theta(s) = \frac{s^n}{s^n + \theta^n} \quad (4.11)$$

Donde $n > 1$ determina la pendiente del umbral (normalmente $n = 2$, pero similares resultados pueden obtenerse con otros valores de $n > 1$ [27, 56, 188]).

El significado es claro: para s pequeños la probabilidad de participar en la ejecución de la tarea es cerca de 0, y para s grandes la probabilidad es cercana a 1. Otra función de respuesta $T_\theta(s)$ es:

$$T_\theta(s) = 1 - e^{-s/\theta} \quad (4.12)$$

Supongamos que hay dos castas y que sólo una tarea debe ser realizada. Esta tarea se asocia con un estímulo $s(t)$, cuyo nivel aumenta si no se cumple (porque la tarea no es realizada por suficientes individuos, o no es realizada eficientemente). Un individuo de la casta i inactivo en el instante t , empieza a realizar la tarea con una probabilidad dada por [26, 27, 56, 188]:

$$T_\theta(s, t) = \frac{s(t)^2}{s(t)^2 + \theta_i(t)^2} \quad (4.13)$$

Así, la probabilidad de que un individuo lleve a cabo la tarea, depende de

la intensidad de feromona de esta tarea en el instante t , $s(t)$, y del umbral de respuesta de la casta para esa tarea en el instante t , $\theta_i(t)$ [26, 27, 56].

Por otro lado, supongamos que un individuo activo termina la ejecución de la tarea, y se desactiva con probabilidad p por unidad de tiempo (que tomamos idéntico para las dos castas), tal que p es fijo e independiente del estímulo. $1/p$ es el tiempo promedio que dura un individuo realizando la tarea, antes de abandonarla. Así, un individuo dura realizando la tarea $1/p$ unidades de tiempo, pero puede que se involucre de nuevo, inmediatamente, si el estímulo sigue siendo grande. Las variaciones en la intensidad del estímulo se deben a la ejecución de la tarea (lo que reduce la intensidad del estímulo). La ecuación de la evolución de la intensidad del estímulo es:

$$s(t+1) = s(t) + \delta - \frac{\alpha N_{act}}{N} \quad (4.14)$$

Donde N_{act} es el número de individuos activos, N es el número de potenciales individuos que pueden estar activos en la colonia, α es un factor de escala que mide la eficiencia en la realización de la tarea, δ es el aumento de la intensidad del estímulo por unidad de tiempo.

Este modelo simple con una tarea, puede fácilmente extenderse a los casos en que existan dos o más tareas a realizar. En ese caso, cada individuo i (o casta i) tiene un conjunto de umbrales θ_{ij} , cada umbral se asocia al estímulo de una tarea j específica, o de un grupo de tareas j . De esta manera, la probabilidad que el individuo i ejecute una tarea j es:

$$T_{\theta_j}(s_j) = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} \quad (4.15)$$

Ese modelo sirve para el problema de asignación de tareas, que supone que cada trabajador responde a un estímulo de una determinada tarea, cuando la intensidad del estímulo excede el umbral del trabajador para ese estímulo. Este modelo asume que los umbrales de los trabajadores no son fijos, basado en una extensión de Theraulaz et al. [26, 187, 188], que varía los umbrales en el tiempo, a partir de un simple proceso de re-

fuerzo: un umbral disminuye cuando la tarea correspondiente se realiza, y aumenta cuando la tarea correspondiente no se realiza.

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - x_{ij}\beta\Delta t + (1 - x_{ij})\gamma\Delta t \quad (4.16)$$

Donde, β es la tazas de aprendizaje, γ es la taza de olvido, x_{ij} es la fracción de individuos del tipo i realizando la tarea j (N_{ij}/n_i , tal que $N = \sum_i n_i$ y n_i es el número de individuos del tipo i). Así, la ecuación 4.16 indica que en las próximas Δt unidades de tiempo, x_{ij} fracción de individuos del tipo i hacen la tarea j , y $(1 - x_{ij})$ fracción hacen otra cosa o nada. Además, la dinámica que sigue x_{ij} es:

$$\frac{dx_{ij}}{dt} = \frac{s_j^2}{s_j^2 + \theta_{ij}^2} \left(1 - \sum_{k=1}^m x_{ik} \right) - p^* x_{ij} \quad (4.17)$$

Donde, m es el número de tipos de individuos, p es la probabilidad por unidad de tiempo que un individuo activo pase a estar inactivo ($1/p$ es el tiempo promedio gastado por un individuo en realizar la tarea, antes de dejarla de hacer; se supone igual para todos los individuos), y $(1 - \sum_{k=1}^m x_{ik})$ es la fracción de individuos del tipo i inactivos. Por otro lado, la dinámicamente que sigue la intensidad s es;

$$\frac{ds_j}{dt} = \delta_j - \alpha_j \sum_{i=1}^N x_{ij} \quad (4.18)$$

Donde α_j es el valor escalar que mide la dificultad de la tarea, y δ_j es el aumento de la intensidad del estímulo por unidad de tiempo. Ese modelo con refuerzo de umbral, ha sido aplicado por Bonabeau et al. [26] en diferentes problemas, tales como el problema de recuperación de correos.

Un modelo conexionista (red neuronal) de asignación de tareas, inspirado en la dinámica de asignación de tareas en las hormigas cosechadoras, ha sido desarrollado por Gordon et al. [78], donde las unidades corresponden a las hormigas, sus estados posibles a las tareas que pueden reali-

zar las hormigas, y los patrones de conexiones a los patrones observados en las interacciones entre los individuos (hormigas). Se modelan ocho categorías de hormigas. Una hormiga k es representada por un conjunto de tres valores binarios ($a_k = \pm 1$; $b_k = \pm 1$; $c_k = \pm 1$), de modo que todas las ocho categorías se puedan representar: patrulleros inactivos (-1, 1, 1), patrulleros activos (1,1,1), forrajeros inactivos (-1, 1, -1), forrajeros activos (1, 1, -1), trabajadores de mantenimiento del nido inactivos (-1, -1, 1), trabajadores de mantenimiento del nido activos (1, 1, 1), trabajadores recolectores de basura inactivos (-1, -1, -1), y trabajadores recolectores de basura activos (1, -1, -1). Las matrices de interacciones entre las hormigas j y k , son definidas como α_{jk} , β_{jk} y γ_{jk} , por cada a_k , b_k , y c_k , respectivamente. Ellas permiten describir la dinámica del sistema de la siguiente manera:

$$a_k(t+1) = 2 \left[\Theta \left(\sum_j \alpha_{jk} a_k(t) a_j(t) \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (4.19)$$

$$b_k(t+1) = 2 \left[\Theta \left(\sum_j \beta_{jk} b_k(t) b_j(t) \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (4.20)$$

$$c_k(t+1) = 2 \left[\Theta \left(\sum_j \gamma_{jk} c_k(t) c_j(t) \right) - \frac{1}{2} \right] \quad (4.21)$$

Donde $\Theta(x)=1$ si $x > 0$, y $\Theta(x)=0$ de lo contrario.

Este modelo es del tipo umbral de respuesta, donde la intensidad del estímulo es una suma ponderada de todos los individuos que se interconectan a un individuo dado. Cuando se excede un valor del peso (en este caso 0), los individuos cambian de tareas o pasan a estar (in) activos.

Según el patrón de interacción entre los individuos, las perturbaciones en la realización de una actividad se propagan. También, el sistema puede tener uno o varios atractores (estados estables, que representan las decisiones finales que en un momento dado toman los individuos). Así, la función de decisión de qué harán los individuos, es basada en la función de energía de las Redes Neuronales Artificiales, tal que un cambio de es-

tado del sistema (decisión) resulta en un cambio en ella. Esa función de energía es definida como:

$$E(t) = -\frac{1}{2} \left[\sum_k \sum_j \alpha_{jk} a_k(t) a_j(t) + \sum_k \sum_j \beta_{jk} b_k(t) b_j(t) + \sum_k \sum_j \gamma_{jk} c_k(t) c_j(t) \right] \quad (4.22)$$

Entonces, durante la transición hacia un atractor en una vecindad (una posible decisión), se puede observar que el valor de la función de energía, aunque momentáneamente podría aumentar, al final llega a un valor de energía mínimo en esa vecindad (el valor global mínimo de la función de energía es el atractor global).

Una importante hipótesis del modelo, es que la evaluación de las necesidades de la colonia por un individuo, se realiza a través de las interacciones con otros miembros de la colonia. La magnitud de los estímulos asociados a las tareas no se tiene en cuenta, solo el número de individuos ocupados en las diferentes tareas son usados por un individuo, para decidir la siguiente tarea a realizar.

Otro modelo general de asignación de tareas es el de Pacala et al. [27, 56]: Sea Q el número de tareas a realizar, N el número total de individuos, x_i el número de trabajadores ocupados en la tarea i , σ_i la probabilidad de que los individuos que realizan la tarea i tengan éxito, ρ_{ij} la densidad media local de los individuos que realizan la tarea j con respecto a los individuos que realizan la tarea i , ρ_{li} la densidad media local de los individuos que realizan la tarea i con respecto a los individuos inactivos, q la probabilidad por unidad de tiempo de que un individuo no exitoso quede inactivo. Así, la tasa a la que un individuo comprometido en la tarea i encuentra a un individuo haciendo la tarea j es proporcional a ρ_{ij} ; y un individuo inactivo es contratado para desempeñar la tarea i si interactúa con un exitoso individuo que realiza la tarea i (por consiguiente, la tasa de activación para realizar la tarea i es proporcional a ρ_{li}). A partir de las definiciones anteriores, la dinámica de x_i viene dada por [27, 56]:

$$\frac{dx_i}{dt} = -x_i(1 - \sigma_i)q + \sum_{j=1}^Q [x_j \sigma_j \rho_{ji}(1 - \sigma_j) - x_j \sigma_j \rho_{ji}(1 - \sigma_i)] + x_i \sigma_i \rho_{li} \quad (4.23)$$

La ecuación 4.23 es similar a la ecuación 4.17, donde la intensidad del

estímulo s_i es sustituida por σ_i , y la función de respuesta depende linealmente de σ_i y del proceso de reclutamiento. Además, Pacala et al. asumen que un individuo exitoso pasa a un estado no exitoso según una probabilidad τ^{-1} por unidad de tiempo, y que procesando una unidad de recurso en una unidad de tiempo aumenta σ_i , siendo φ_i la densidad del recurso i (por unidad de área) y k un parámetro que afecta la tasa de aumento de σ_i , la dinámica de σ_i viene dada por:

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = -\frac{\sigma_i}{\tau} + k\varphi_i(1 - \sigma_i) \quad (4.24)$$

Para evitar el hacinamiento, se complementa la ecuación 4.24 con:

$$\frac{d\sigma_i}{dt} = -\frac{\sigma_i}{\tau} + k\varphi_i(1 - \sigma_i) - \xi \frac{x_i}{\alpha_i} \sigma_i \quad (4.25)$$

Donde ξ es una constante de proporcionalidad, y α_i es el área sobre la cual la tarea i se está realizando. Además, φ_i puede cambiar con el tiempo, debido a que los recursos se agotan, por lo que su dinámica viene dada por:

$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \Gamma_i - \mu\varphi_i - k\varphi_i x_i \quad (4.26)$$

Donde Γ_i es la tasa de creación del recurso (por ejemplo semillas que caen al suelo, etc.), y μ es la tasa “natural” de desaparición del recurso (viento, otras colonias, etc.).

Por otro lado, un modelo de división del trabajo basado en la edad es propuesto en [171]. Es visto como un sistema centrífugo, donde los trabajadores jóvenes permanecen en los límites seguros del nido, y los trabajadores más viejos (que están cercanos al final de sus vidas fisiológicas) se especializan en las peligrosas tareas de búsqueda de alimentos, donde la esperanza de vida es corta debido a los encuentros con los depredadores y al ambiente peligroso. Así, los trabajadores más jóvenes, que tienen mayor vida reproductiva, y son capaces de poner sus propios huevos, permanecen cerca de la cría en el nido.

Ahora bien, los trabajadores del mismo grupo de edad, pueden llevar a

cabo una variedad de tareas, y comprometerse, incluso, con tareas que habitualmente no realizan si la colonia lo requiere. Por ejemplo, en el modelo de búsqueda de alimento, aunque la mayoría de los trabajadores jóvenes permanecen en el nido, un número significativo de ellos puede comprometerse a buscar alimentación cuando sea necesario. De esta manera, la noción de edad del trabajador, es una forma de adaptación directa que rige la división del trabajo de la sociedad, ajustándose a las necesidades de la colonia.

En algunos modelos, las hormigas no son especialistas ni generalistas. En esos casos, las formas de aprendizaje juegan un papel importante, en la división del trabajo entre estas hormigas, para explicar porque ellas no son ni especialistas ni generalistas. Esas formas de aprendizaje, vinculadas a la retroalimentación positiva, harán que algunas hormigas progresivamente se especialicen mientras que otras se queden para llenar huecos en las necesidades de la sociedad. Particularmente, Deneubourg et al. [48], han sugerido que el aprendizaje es un aspecto clave de una división temporal del trabajo, en determinadas sociedades de hormigas. Así, se pueden ampliar los modelos de umbral de respuesta para la regulación de la división del trabajo en las colonias de insectos sociales, incluyendo el aprendizaje. La expresión de ajuste del umbral 4.16, es un ejemplo de un esquema de aprendizaje.

Un posible uso del modelo de umbral de respuesta, es en el problema de asignación adaptativa de tareas [26]. En este caso, la probabilidad de que un individuo i , localizado en la zona $z(i)$, responda a la demanda s_j en la zona j , es:

$$P_{ij} = \frac{s_j^n}{s_j^n + \alpha \theta_{ij}^n + \beta d_{z(i),j}^n} \quad (4.27)$$

Donde β y α son coeficientes positivo, y $d_{z(i),j}$ es la distancia entre la zona $z(i)$ y j (o cualquier factor, como embotellamiento, etc.).

En este caso, la actualización del umbral de respuesta es:

$$\theta_{ij} = \theta_{ij} - \xi_0 \quad (4.28)$$

$$\theta_{i,n(j)} = \theta_{i,n(j)} - \xi_1 \quad \forall n(j) \quad (4.29)$$

$$\theta_{ik} = \theta_{ik} + \lambda \quad \forall k \neq j \text{ y } k \notin n(j) \quad (4.30)$$

Donde, ξ_0, ξ_1 son coeficientes de aprendizaje, λ es un coeficiente de olvido, y $n(j)$ es el conjunto de zonas alrededor de j

Otro modelo presentado en [26], asociado al comportamiento de las hormigas cuando realizan diferentes tareas, como dejar caer y recoger objetos, también usa combinaciones de umbrales de respuesta diferentes, asociados a cada tarea. En ese modelo, hay dos factores principales que influyen en las acciones locales tomadas por cada hormiga: el número de objetos en un sitio dado, y sus similitudes (incluso con el objeto hipotético cargado por la hormiga). Esos factores se combinan en las funciones de respuesta asociadas a si deben recoger o depositar un objeto, y en sus respectivas variables umbrales.

Por otro lado, la hipótesis de que las hormigas hacen un conjunto de tareas cercanas entre sí, para minimizar el tiempo y el desperdicio de energía en su movimiento, puede desempeñar un papel importante en la división del trabajo en las hormigas [56]. Muchas hormigas son fieles, tanto a zonas dentro de un nido como a un subconjunto de tareas que se producen dentro de esas zonas. Franks y Sendova han analizado la distribución de las crías en las colonias de hormigas Lepto thoracine [171]. Los huevos y microlarvas están fuertemente agrupados en el centro del área, y a cada uno se les da un espacio individual relativamente pequeño. Esos espacios aumentan hacia el exterior, para que a larvas mayores se les dé un espacio individual más grande.

En la literatura existen otros modelos de umbral de respuesta [26, 27, 108, 188]. En general, los modelos de umbral de respuesta no consideran la naturaleza de los estímulos, sino cómo se involucra un individuo en la ejecución de una tarea, teniendo en cuenta los estímulos asociados. Esos modelos emulan:

- *La Especialización.* El hecho de que algunos individuos tienen bajos umbrales en unos casos y umbrales altos en otros, significa que existen especialistas en una tarea dada. En general, se cree que la existencia

de especialistas en una colonia es un rasgo favorable, porque los especialistas pueden ser más eficientes, ya sea porque son mejores para realizar la tarea o debido a que no pierden tiempo en la conmutación entre tareas. A nivel matemático, la especialización puede ser definida como la probabilidad q_{ij} del grupo i de percibir los estímulos asociados con la tarea j :

$$q_{ij} = p_e x_{ij} + [(1 - p_e) / (m - 1)] \sum_{k=1, k \neq j}^m x_{ik} \quad (4.31)$$

Donde, p_e es la probabilidad de encontrar estímulos para realizar la tarea j al hacer la tarea j , y $(1 - p_e) / (m - 1)$ es la probabilidad de encontrar estímulos asociados con la tarea j mientras se realiza cualquier otra tarea. Se garantiza la propiedad de especialización siempre que $p_e \gg (1 - p_e) / (m - 1) > 0$.

- *El Politeísmo Temporal.* Consiste en añadir el tiempo a la especialización, mediante la definición de $g_j(t)$, donde t es la edad del individuo y $g_j(t)$ es la función que define cómo varía en el tiempo la probabilidad de encontrar estímulos asociados con la tarea j . $g_j(t)$ puede incluir aspectos como: donde es más probable encontrar estímulos asociados a la tarea, aspectos fisiológicos o de envejecimiento⁵⁴, etc. La expresión 4.31 quedaría como:

$$q_{ij}(t) = g_j(t) \{ p_e x_{ij} + [(1 - p_e) / (m - 1)] \sum_{k=1, k \neq j}^m x_{ik} \} \quad (4.32)$$

Un ejemplo de la expresión de $g_j(t)$, propuesto en [29], es:

$$g_j(t) = e^{-(t-t_j/T)^2}$$

Donde t_j es el tiempo cuando el estímulo asociado a la tarea j es más probable de ser encontrado, y T es el periodo de duración de la tarea j .

⁵⁴ Por ejemplo, podría ser fisiológicamente necesario que los individuos recién nacidos se alojen en el centro del nido por un cierto tiempo, o estimular a los trabajadores de edad a salir del nido más a menudo

- *La Diversidad Genética.* Los individuos cercanos en sus características genéticas (por ejemplo, que pertenecen a la misma línea paterna), pueden tener umbrales de respuesta similares, y por lo tanto, están predispuestos para realizar las mismas tareas. En la actualidad, existe evidencia de que existe un componente genético en la división del trabajo en las abejas y las hormigas.
- *La Poligamia:* hay una fuerte correlación negativa entre la poligamia y el polimorfismo físico entre las hormigas trabajadoras. Si la diversidad genética, debida, por ejemplo, a la presencia de trabajadores producidos por diferentes reinas, dota a la colonia de una variedad de umbrales de respuesta (y por lo tanto, de especializaciones), el polimorfismo puede no ser necesario.

La variabilidad de los umbrales se debe a dos mecanismos, el envejecimiento y el aprendizaje [146]:

- El envejecimiento, en el contexto de los umbrales de respuesta, implica la modificación de los umbrales en el tiempo (por ejemplo, un individuo joven tendrá un alto umbral con respecto a la defensa del nido, pero progresivamente lo bajara, a medida que envejece, hasta que la probabilidad de respuesta al estímulo, relacionado con la defensa, llega a ser significativo).
- Aprender implica, por ejemplo, la reducción de un umbral de respuesta, cuando la tarea se está realizando, y aumento del umbral de respuesta, cuando la tarea no se está realizando (desaprendizaje).

Algunas limitaciones inherentes al modelo son:

- No tiene en cuenta las complejas redes de interacción entre los individuos,
- Asume una sola forma de obtener información, y no aborda de manera exacta las heterogeneidades espaciales.

En todo caso, este modelo coadyuva a la comprensión de los mecanismos que permiten a los insectos sociales dividir sus tareas, paso necesario hacia la comprensión de la evolución del comportamiento social.

Por último, ese modelo es basado en el rastro de las hormigas, y asume que todos los individuos participantes contribuyen uniformemente [85]. Esto tiene solamente sentido si todos los individuos son igualmente competentes. Ahora bien, en las sociedades humanas, sin embargo, la división del trabajo considera que los individuos tienen diversas destrezas, y limitan sus contribuciones típicamente a los dominios donde son los más competentes. La especialización cognoscitiva emerge espontáneamente, a través de un mecanismo de retroalimentación positiva (individuos que son competentes resolviendo un tipo particular de problema, buscan probablemente conseguir más problemas de ese tipo, y así desarrollar más destreza en ese dominio). Formalmente, la división del trabajo en el caso de sociedades humanas, deberá considerar esos aspectos. Un trabajo interesante al respecto, es el propuesto en [96], donde proponen mapas mentales para estudiar ese problema, basado en el hecho de que en la especialización, para abordar colectivamente un problema, los diversos especialistas necesitan comunicarse. Si los mapas mentales de los especialistas son demasiado diferentes, tendrán gran dificultad para entenderse. Este es un problema clásico, en las investigaciones multidisciplinarias o interdisciplinarias. Un mecanismo para resolverlo, podría ser el usado en las organizaciones para la toma de decisiones, donde los consejos de diversos especialistas son sintetizados en una perspectiva más amplia. Esto debería hacerse colectivamente, para no caer en un enfoque jerárquico, donde un individuo hace la síntesis, enfoque que nos hemos refutado a señalar, que está enmarcado en los sistemas emergentes.

4.2.1.3 Reclutamiento (migración de nidos, etc.)

El tamaño de las colonias y los mecanismos de reclutamiento de individuos, son componentes importantes en la acción colectiva de las colonias de insectos [51, 52]. El reclutamiento genera un tipo de retroalimentación positiva, que puede amplificar comportamientos que se vayan encontrando en las dinámicas de la colonia. Por ejemplo, la capacidad de reclutamiento en una colonia determina la eficiencia de su forrajeo, el tamaño de las presas que una especie puede explotar, etc. En general, el reclutamiento permite una explotación rápida y eficiente de las fuentes grandes de alimentos [51, 52].

Algunas características de las estrategias de reclutamiento son [51, 52]:

La existencia de un líder capaz de guiar a un grupo de reclutas hacia la nueva fuente de alimento, sin prestar atención a otros senderos que lleven a otra fuente; y los trabajadores son capaces de modular la cantidad de feromona depositada, en función de la concentración de la fuente. Estos dos mecanismos actúan conjuntamente a la hora en que una nueva fuente se descubre, mientras otra ya se aprovecha, lo que le da oportunidad a la fuente recientemente descubierta de ser explotada. Si solo se usase reclutamiento masivo, la colonia al empezar a explotar una fuente, sus reclutas quedarían “atrapadas” en el camino ya establecido, hasta que se desvanece.

El siguiente modelo matemático ilustra un proceso de reclutamiento dinámico, que evita que la colonia quede atrapada en la primera fuente encontrada. El modelo es basado en reglas simples. En un tiempo t del reclutamiento en curso hacia una fuente i , N forrajeros de la colonia se pueden subdividir en tres grupos: E , el número de trabajadores que exploran la zona de forrajeo; X_i , el número de trabajadores alimentándose en la fuente i ; y $N-E-\sum_{i=1}^n X_i$, el número de trabajadores en espera en el nido. En cualquier momento, el flujo saliente del nido es una función de la tasa de reclutamiento (a_i), del número de trabajadores en el nido, y del número de trabajadores involucrados en el proceso de búsqueda de alimentos. De estos últimos trabajadores, sólo una fracción (F_i) llega a la comida. Los otros $(1-F_i)$ pierden la pista y llegan a ser exploradores. Estos exploradores pueden volver al nido después de un tiempo de búsqueda ($1/p$), o descubrir la fuente al azar (con una probabilidad c). Si el tiempo medio de residencia en la fuente es de $1/b$, tenemos que [51, 52]:

$$\frac{dX_i}{dt} = a_i X_i \left(N - E - \sum_{i=1}^n X_i \right) F_i + cE - bX_i \quad (4.33)$$

$$\frac{dE}{dt} = a_i X_i \left(N - E - \sum_{i=1}^n X_i \right) (1 - F_i) - ncE - pE \quad (4.34)$$

donde n es el número de fuentes de alimento. En el caso de reclutamiento por masa, las hormigas que reclutan refuerzan el rastro, en consecuencia, F_i puede ser representada como una función de X_i :

$$F_i = \frac{g_i + X_i^2}{b_i + X_i^2} \quad (4.35)$$

Donde las constantes g_i y h_i caracterizan la eficiencia de la pista al inicio del reclutamiento ($g_i > h_i$).

En una fuente rica de alimento, a_i y F_i son mayores que en una pobre fuente de alimento: a_i es mayor porque la tasa de reclutamiento aumenta con la calidad de los alimentos y; F_i es mayor porque se supone que las hormigas dejan más rastro, y por lo tanto, menos reclutas perderán la pista. La figura 4.9 muestra que una pequeña diferencia de a_i y F_i , lleva a la selección de la fuente más rica cuando dos fuentes de diferente calidad se ofrecen al mismo tiempo. Esto resulta de una competencia entre dos procesos auto-catalíticos con diferentes velocidades [51, 52]. En este caso, la diferencia de cantidad de feromona emitida durante la explotación es fundamental: entre las dos fuentes que se descubren al mismo tiempo, esa diferencia es suficiente para dar ventaja a la explotación de la más rica. Por el contrario, si el camino que conduce a la fuente de la más pobre ha sido reforzado, aunque sea ligeramente, esta diferencia no sería suficiente para permitir el cambio de actividad de forrajeo de la colonia hacia la fuente más rica descubierta más tarde. El modelo confirma que ningún líder se necesita para inducir cambios de actividad, una modulación de la información transmitida es suficiente. La modulación de la información en el modelo es dada por dos parámetros [51, 52]: el número de hormigas inducidas a abandonar el nido (a_i), y la eficiencia en el seguimiento de los rastro (F_i). En la realidad, las hormigas suelen utilizar diferentes señales durante el reclutamiento. El reto consiste en entender cómo algunas formas se adaptan mejor que otras, a particulares condiciones ecológicas.

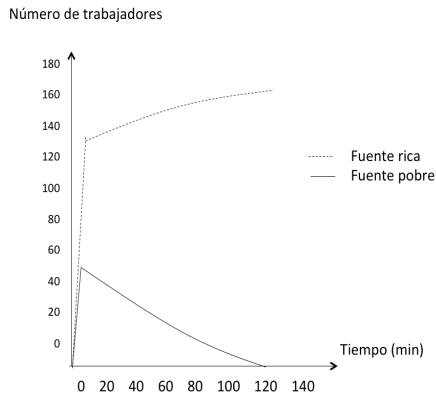


Figura 4.9. Resultados teóricos de cambio en el tiempo de la población de trabajadores cuando dos fuentes de alimentación se introducen simultáneamente.

La idea de reclutamiento también se puede usar en sentido inverso, como reguladora de la competencia por los alimentos en colonias de hormigas vecinas [52]. Esa competencia se reduce, a menudo, por una segregación espacial en el territorio. También se pueden usar mecanismos de segregación temporal a través de ciclos diferentes de actividades diarias (debido, por ejemplo, a diferentes estrategias de forrajeo que podría tener cada especie).

El reclutamiento le confiere al sistema una propiedad de amplificación, que puede desempeñar un papel crucial en la organización de la vida social [154]. Permite a las personas sacar provecho de los demás, beneficiarse de los efectos cooperativos, etc. El reclutamiento es común en los modelos de transporte cooperativos de las sociedades de insecto. En varias especies de hormigas, cuando es imposible que una sola hormiga pueda recuperar un artículo grande, compañeros del nido son reclutados para ayudarla, a través del contacto directo o una marcación química. Para ello, las hormigas se mueven alrededor del objeto que quieren llevar, lo cambian de posición y alineación, hasta que tienen éxito en la atracción del objeto por miembros del nido. Ese comportamiento de las colonias de hormigas ha inspirado a la robótica, en particular, para el diseño distribuido de algoritmos de control para grupos de robots [156]. Un algoritmo de hormigas que reproduce el comportamiento de las hormigas

reales en un grupo de robots, cuya misión es empujar una caja hacia una meta, ha sido implementado y probado por Kube y otros [106].

Otros modelos interesantes de reclutamiento en las colonias de insectos están basados en sus procesos de migración. Esos modelos reproducen, particularmente, sus habilidades para seleccionar el mejor sitio entre varios [116]. En dichas sociedades, la toma de decisiones se distribuye a través de muchos individuos, cada uno con limitada información local. Las colonias tienen en cuenta no sólo las cualidades intrínsecas de cada sitio, sino también su valor en relación con las opciones disponibles. Al elegir entre dos sitios, las hormigas individuales son capaces de visitar ambos sitios, comparar, y elegir el mejor. Sin embargo, la mayoría de las hormigas encuentran un solo sitio. Estas hormigas mal informadas, también contribuyen a la decisión de la colonia, debido a que la probabilidad de iniciar el reclutamiento para un sitio dado, depende de la calidad informada por ella, entre otras cosas.

En general, la migración es un proceso dinámico con dos métodos de reclutamiento. La migración es un proceso altamente estructurado con una serie de fases [142, 170]: el descubrimiento, la evaluación y el transporte. El proceso de migración se va mejorando colectivamente a través de las fases. Por ejemplo, las trabajadoras individuales evalúan la superficie de un potencial nuevo nido. Después de esa exploración inicial, y la toma de decisiones respectiva, las exploradoras comienzan a reclutar para ir a los mejores sitios disponibles. Las exploradoras también detectan un quórum, basadas en sus evaluaciones del número de sus compañeras de nido que ya están presentes en el potencial sitio nuevo, lo que determina cuándo deben aumentar su tasa de reclutamiento. De esta manera, las decisiones de muchos miembros de la colonia son recabadas. La reina, que es “el órgano vital de la sociedad” [170], se mueve en el medio de la migración. En este punto óptimo, la reina puede migrar rápidamente, protegida por la mitad de sus trabajadoras en el nido actual y la otra mitad en el nuevo.

Las colonias usan un mecanismo para establecer un quórum para elegir el mejor sitio disponible [142]. Para ello, cada hormiga combina su propia y limitada información directa, con las señales indirectas acerca de la experiencia de sus compañeros de nido. Así, la sociedad funciona como un lugar único de información con múltiples decisores. Se usan dos métodos

de reclutamiento [142]: inicialmente un reclutador lentamente recluta una sola hormiga para que vaya del nido viejo al nuevo. Luego, paralelamente, las hormigas reclutadas van reclutando a otras compañeras del nido viejo para ir al nido nuevo. El reclutamiento cada vez es más numeroso, y en paralelo, para terminando llevándose a la mayor parte de la colonia.

¿Por qué las hormigas utilizan dos métodos de reclutamiento? la fase inicial de conformación del tándem sirve para “el reclutamiento de los reclutadores”. Es decir, en esa fase se recluta un grupo de hormigas que más tarde provocaran la migración del resto de la colonia. La lógica detrás de la primera fase sigue siendo totalmente inexplicable, particularmente, el método utilizado por los reclutadores iniciales. En distancias muy cortas, la fase inicial muchas veces está ausente. La primera fase funciona mejor para que las reclutas aprendan la ruta, y luego pueden seguirla de forma independiente (segunda fase). La tasa de migración aumenta cuando la colonia está en la segunda fase, debido a la ampliación de la población de reclutadoras. Así, la segunda fase es más rápida en el reclutamiento de hormigas, tanto pasivas como activas. Normalmente, la colonia inicia la segunda fase, sólo cuando un número dado de hormigas está presente en el nuevo sitio [108].

Veamos un modelo matemático de lo anterior [142]. Asumamos que una colonia tiene su nido viejo ya inadecuado, y tiene M sitios de diversa calidad para elegir. La colonia tiene una población total de N miembros (incluyendo las crías). Una proporción p esta activa, y son las hormigas que encuentran, evalúan, y reclutan a los nuevos nidos. El resto de la población debe ser migrada al sitio elegido. Cada hormiga activa puede estar en uno de los siguientes tres estados:

- Buscando nuevos sitios (S),
- Evaluando un sitio i que ha descubierto o siendo reclutada por el sitio i (A_i), o
- Reclutando para un sitio i que ha terminado de evaluar (R_i).

El número de hormigas en cada clase, cambia en el tiempo según la ecuación siguiente [142]:

$$\frac{dS}{dt} = -\sum_{j=1}^M \mu_j S - \sum_{j=1}^M \lambda_j I(R_j, S) \quad (4.36)$$

$$\frac{dA_i}{dt} = \mu_i S + \lambda_i I(R_i, S) - \sum_{j \neq i} (\rho_{ji} A_j - \rho_{ij} A_i) - \kappa_i A_i \quad (4.37)$$

$$\frac{dR_i}{dt} = \kappa_i A_i + \sum_{j \neq i} (\rho_{ji} R_j - \rho_{ij} R_i) \quad (4.38)$$

Donde, μ_i es la tasa a la cual las que buscan descubren un sitio i , λ_i es la tasa de las buscadoras de ser reclutadas por las que reclutan para el sitio i , ρ_{ji} es la tasa de las reclutadoras y evaluadoras del sitio j , al encontrar un sitio i , cambiar a él, y κ_i es la tasa de las evaluadoras de convertirse en reclutadoras. Por otro lado, las hormigas activas sólo serán reclutadas al sitio i , si R_i está por debajo de un umbral T , cambiando de comportamiento al de transportar. Esta regla de conmutación es representada por la función I :

$$I(R_i, S) = \begin{cases} R_i & \text{si } R_i < T \text{ y } S > 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (4.39)$$

Esto capacita a las hormigas a comparar sitios y elegir el mejor. Por último, la población P_i de hormigas pasivas y crías en un sitio i , cambia de acuerdo a:

$$\frac{dP_i}{dt} = \phi_i J(R_i, P_i) \quad (4.40)$$

Donde ϕ es la tasa de migración, y la función J confina la migración a los sitios con al menos T reclutadoras:

$$J(R_i, P_o) = \begin{cases} 0 & \text{si } R_i < T \text{ o } P_o = 0 \\ R_i & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (4.41)$$

Donde, P_o es el número de elementos pasivos que quedan en el nido viejo.

Este proceso distribuido sufre de una debilidad importante, no puede evitar que algunas hormigas recluten algunas compañeras y crías a un sitio de inferior calidad. Posteriormente, ellas son migradas al sitio preferido, incurriendo en costos adicionales en tiempo y en riesgo. Para evitar una alta probabilidad de transporte a malos sitios, un quórum de compañeras, antes de iniciar la migración, podría ayudar (“convencer” a un número suficiente de reclutadoras, de ir a un sitio determinado).

En general, el reclutamiento es inversamente proporcional a la calidad del sitio encontrado. El número de reclutadoras, la velocidad a la que trabajan, y la cantidad de trabajo realizado por cada uno, depende de la calidad del sitio encontrado [142]. Por lo tanto, la latencia media para que una hormiga comience a reclutar, depende del sitio que ha encontrado. Esta diferencia en las latencias, causa una más fuerte retroalimentación positiva en el reclutamiento, en la hormiga que ha encontrado el mejor sitio. Cada proceso de reclutamiento se inicia tan pronto como una hormiga descubre un sitio⁵⁵. Si se descubren dos nidos simultáneamente, dos independientes procesos se ejecutan en paralelo. Debido a su mayor latencia, el mejor sitio será elegido con más frecuencia. No importa el sitio que la hormiga descubre primero, o el tiempo que separa los dos descubrimientos. Así, un ingrediente fundamental en estos casos, es la dependencia del reclutamiento de la calidad del sitio. Incluso, al retrasarse el reclutamiento en malos sitios, las hormigas ganan tiempo para descubrir alternativas. Esto es posible porque la retroalimentación positiva amplifica las pequeñas diferencias.

Por otro lado, el proceso de toma de decisiones de la colonia requiere de las decisiones independientes de muchas hormigas, que de alguna manera deben ser integradas. Esta integración se logra, en parte, a través de

⁵⁵ En general, algunos autores han modelado el inicio del reclutamiento como un proceso de Poisson [99].

comparaciones directas de los trabajadores que visitan más de un sitio y comparan. Sin embargo, un trabajador se mueve de manera limitada. Para que la colonia tenga éxito, requiere que cada trabajador dé su escaso conocimiento coordinadamente. Algunos trabajos han sugerido que las hormigas logran eso mediante dos fuentes de información [56, 142]:

- Su propia e independiente evaluación de un sitio que ha inspeccionado,
- Su atención a una señal de la población, que indirectamente les informa de las evaluaciones de sus compañeros de nido.

El corazón de la estrategia de decisión de un trabajador, es su aceptación incremental de un potencial sitio. Él primero se concentra en una serie de características, incluyendo el área, tamaño de la entrada, espesor de la cavidad, nivel de luz, etc. Eso le da una probabilidad inicial de empezar a reclutar. Cuanto mejor sea el nido, mayor es la probabilidad para que el reclutamiento comience. En ese momento, la hormiga se limita a convocar a otras hormigas (comportamiento en tándem). La aceptación completa sólo ocurre cuando se logra el quórum para iniciar la segunda fase, que acelera el reclutamiento, y los cambios en los objetivos del resto de compañeros. Este proceso en dos etapas, ofrece varias ventajas para una migración eficiente y precisa. La más obvia, el quórum garantiza reclutadores suficientes para un transporte eficiente del resto de la colonia. Más interesante aún, el requisito de quórum permite a cada hormiga comprobar su aceptación inicial, versus las posibles decisiones independientes de sus compañeros de nido. Debido a que varias variables deben ser integradas, la evaluación del sitio puede estar propensa a errores. Si tales errores llevan a una hormiga a reclutar antes de tiempo hacia un relativamente pobre sitio, es probable que sus seguidores vean el error al juzgar el sitio con más dureza de lo que ella lo hizo, lo que retrasa el reclutamiento durante un tiempo, posponiéndose la segunda fase. El requisito de quórum en un sitio para comenzar la segunda fase, reduce la posibilidad de dividir la colonia, mediante la creación de un concurso entre los sitios. No se sabe si otros insectos sociales cuentan, de manera similar, con un quórum de los trabajadores, para llegar a una decisión colectiva.

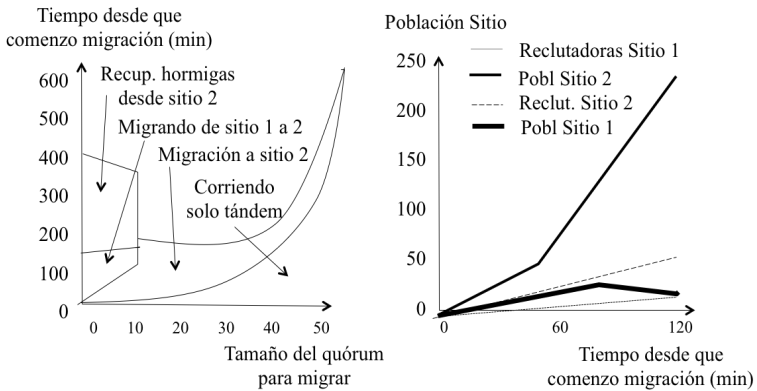


Figura 4.10. Resultados del modelo presentado en las ecuaciones 4.36 a 4.41: efecto del quórum en el tamaño de la población en cada nido (dos sitios con sitio 2 mejor que el sitio 1 (tomado de [142])).

Por otro lado, en este fenómeno, existe una correlación entre el tamaño del quórum y de la población de la colonia. Esto le permite a la colonia saber cuándo iniciar la segunda fase. En el caso de las grandes colonias evita una decisión prematura, y en las pequeñas colonias una tarde.

Otros casos de integración de la información limitada directa, con señales de compañeras, se presentan en otras colonias de insectos. Las abejas, por ejemplo, deciden reclutar para explotar una fuente de alimento, basadas en la evaluación independiente de la calidad de la misma, que modulan con el retraso que experimenta una abeja reina para recibir su néctar [158, 159, 161, 165]. Este comportamiento capacita a la colonia, para elegir la mejor de dos fuentes de alimentación, en ausencia de una comparación directa de abejas individuales. Muchas especies de hormigas similarmente, combinan evaluaciones independientes de fuentes de alimento, con la comunicación indirecta a través de senderos/olores. También, estudios recientes en inmunología, muestran cómo las decisiones de las células T contra un determinado antígeno, surgen de la combinación de sus informaciones locales, con la que recogen de sus interacciones con los miles de receptores de la superficie celular.

En resumen, durante el proceso de reclutamiento, las colonias hacen uso de un mecanismo distribuido de procesamiento de la información, el cual

aprovecha la información de sus individuos para la toma de decisiones [116]. La decisión colectiva no es una mera suma de decisiones tomadas por los insectos individuales. Por el contrario, una decisión global emerge de las interacciones de los individuos, cada uno en posesión de información local limitada. La decisión de la colonia surge de la combinación de dos procesos distribuidos: comparaciones directas de los individuos que han visitado uno o varios sitios, con las opiniones de los individuos que han visitado sólo un sitio. Al hacer su elección, la colonia integra varios aspectos del nido (superficie, altura de la cavidad, tamaño de la entrada, etc.), de tal manera de no depender de una característica única. Sin embargo, el equilibrio entre la acción individual y colectiva, y las formas en que estas interactúan, siguen siendo preguntas abiertas.

4.2.1.4 Organización del ambiente (construcción de nidos, etc.)

Los nidos de los insectos sociales, se encuentran entre los más complejos y sofisticados de todos los artefactos animales. El comportamiento en la construcción de nidos, en los insectos sociales, es un ejemplo clásico de la formación de patrones biológicos. La dinámica general de construcción es guiada, entre otras cosas, por la relación entre el tamaño de la colonia y el tamaño del nido. Los trabajadores individuales usan un grupo de reglas sencillas de oro, para generar el patrón, en el proceso de construcción del nido. En general, en la construcción de nidos ocurren dos aspectos particulares [64]:

- Comportamientos individuales de los trabajadores en la construcción y
- Surgimiento de propiedades colectivas (temporales y espaciales) en las estructuras que crean.

Las hormigas construyen ladrillo por ladrillo, esto facilita la estimación experimental individual de los trabajadores, de las probabilidades de recogida y depósito de materiales de construcción, en respuesta a diferentes estímulos. En esa dinámica se da un proceso de auto-organización, en la que patrones y procesos emergen, a través de las interacciones locales entre los componentes del sistema. En ese proceso es clave, el comportamiento de los trabajadores individuales, y sus capacidades para estimar sus probabilidades de recoger y depositar bloques. En ese caso, la estig-

mergia juega un papel fundamental en el proceso de construcción de nidos (en las dinámicas de distribución, colaboración y agrupación de trabajadores/material, que aparecen en dicho proceso) [147].

De esta manera, las hormigas son capaces de construir nidos con el tamaño correcto (cada nido no es ni muy grande ni muy pequeño). Existe una división del trabajo, con trabajadores que abandonan el nido para buscar material de construcción (trabajadores externos), y trabajadores que permanecen en el sitio nuevo del nido acondicionándolo (trabajadores internos). El proceso de construcción tiene una serie de etapas [64]:

- Los trabajadores externos se apartan del grupo, para recoger granos del material de construcción, que suele ser tan grande como su cabeza.
- Los trabajadores caminan de nuevo hacia el nido, con dicho material.
- Los trabajadores cargados, tienden a liberar el grano, después que entran en contacto directo con un grupo de sus compañeros, o de otros granos, que han sido previamente depositados. Este último estímulo crece en importancia, a medida que más y más granos se depositan.
- Así, otra forma de retroalimentación positiva existe, basada en la acumulación de granos (además a las asociadas con las señales de feromonas). En específico, los granos atraen otros granos (esa es una importante fuente de retroalimentación positiva, en el proceso de construcción).
- Los trabajadores que recuperan materiales de construcción, rara vez, o nunca, recogen un grano que ha caído en el interior del nido.
- Las hormigas que permanecen en el nido, en particular, las que están con las crías (no forman parte del grupo de trabajo), recogen los granos que están cerca de ellas, y las sacan fuera del nido de nuevo.
- Los granos en la misma región, tienen la misma posibilidad de ser recogidos. Ahora bien, la ubicación de un grano en particular, es importante en términos de probabilidades. Por ejemplo, entre más hormigas pasen por un grano (más expuesto esta al tráfico de hormigas), más probable es que sea recogido.
- El grupo de crías, cuidadosamente ordenadas, sirven como plantilla para determinar dónde la pared del nido debe ser construida. El conjunto de trabajadores internos y de crías en el nuevo nido, producen señales de feromonas, que ayudan a determinar dónde deben ser

depositados los materiales de construcción. Eso forma una especie de plantilla, que ofrece a cada trabajador, el conocimiento genérico relativo a la estructura que ayudan a construir. La plantilla sólo proporciona información local (es como una zona restringida, donde la construcción es más probable que ocurra).

- Por otro lado, las hormigas marcan su nido en el medio ambiente, que afecta los movimientos de los miembros de la colonia. Particularmente, un gradiente circular de marcas se crea, con densidades que disminuyen a medida que la distancia desde el centro del nido hacia afuera es mayor.
- Finalmente, los trabajadores internos y sus crías, producen señales químicas que ayudan a otras hormigas a orientarse dentro de los nidos.

Los mecanismos de retroalimentación, son estrategias adaptativas de las colonias de hormigas (por ejemplo, si por cualquier razón un grupo de material desaparece, el feromona tiende a evaporarse en ese lugar).

Basado en ese comportamiento real de las colonias de hormigas, se han venido desarrollando modelos. En esos modelos, algunas otras características se han incorporado, como el uso de umbrales de respuesta, para caracterizar la intensidad de los estímulos asociados a las tareas a las que reaccionan las hormigas, discutido en la sección anterior. En ese sentido, probabilidades espaciales de transición bioinspiradas se incorporan a los modelos, evitando al azar los movimientos de los agentes, generando, de esa forma, algoritmos distribuidos que exploran/explotan eficientemente regiones.

Dado que estos tipos de probabilidades de transición, dependen de la distribución espacial del feromona en el medio ambiente, el *comportamiento es estigmérgico*. La distribución de feromona representa la memoria histórica reciente del enjambre, en el sentido que contiene la información, que las hormigas individuales son incapaces de mantener o transmitir. No hay comunicación directa entre ellas, sino un tipo de comunicación indirecta, a través del campo de feromonas. De hecho, las hormigas no tienen ninguna memoria, y el conocimiento espacial del individuo es restringido a la información local, acerca de la densidad de feromona que le rodea.

Un modelo simple, basado en lo anterior, se propuso en [6], el cual consiste en que el estado de una hormiga individual, puede ser expresado por su posición r y orientación θ . Por lo tanto, basta con especificar una probabilidad de transición, desde un lugar y una orientación dada (r, θ) a otra (r^*, θ^*) , en un instante dado. Dicha probabilidad de transición de un sitio k a un sitio i , es función de la densidad del feromona (σ) [147]:

$$P_{ik} = \frac{W(\sigma_i)w(\Delta_i)}{\sum_{j/k} W(\sigma_j)w(\Delta_j)} \tag{4.42}$$

Donde, $W(\sigma) = (1 + \frac{\sigma}{1 + \delta\sigma})^\beta$ es la función de peso del feromona⁵⁶, $1/\delta$ es la capacidad sensorial de la hormiga, β es una especie de gradiente instantáneo del feromona, $w(\Delta\theta)$ es un factor de ponderación, $\Delta\theta$ es el cambio en la dirección en cada paso, j/k denota la suma de todos los sitios de j que son vecinos de k .

Ahora bien, la mayoría de los modelos de construcción de nidos, se basan en el comportamiento de recoger y dejar granos, bajo mecanismos de amplificación, basados en plantillas y feromona. Las hormigas cargadas o vacías muestran, respectivamente, una probabilidad de dejar o recoger un grano, relacionada con la distancia al nido. Estas funciones de abandono o recolección muestran, respectivamente, un máximo o un mínimo, en función con la densidad de los estímulos derivados de la presencia física de crías, hormigas adultas, etc. y de las señales químicas que éstos generan. Un modelo propuesto, inspirado en lo anterior, ha sido hecho en [64]: Una hormiga vacía (U) se encuentra un grano (S), y lo puede recoger y convertirse en una hormiga cargada (L). La tasa a la que una hormiga vacía, puede recoger un grano, y se convierte en una hormiga cargada en una determinada zona (r), es:

$$P(r)US \tag{4.43}$$

Donde, $P(r)$ es la velocidad con la que aparecen estos eventos en una zona en particular r . La tasa a la que cualquier hormiga puede dejar su carga es

$$D(r)L(1-S/K) \tag{4.44}$$

⁵⁶ Mide la probabilidad de moverse a un sitio r con densidad de feromona $\sigma(r)$.

Donde, $(1-S/K)$ es porque en una zona r , en cualquier momento, lo máximo que puede haber son K granos, S es la cantidad de granos en la zona, $D(r)$ es la tendencia a dejar caer materiales en la zona r , L es el número de hormigas cargadas (es decir, los que están disponibles para depositar material en la zona), y U es el número de hormigas sin carga (es decir, disponibles para recoger material en la zona).

Ese modelo asume que las hormigas se mueven al azar en la zona de construcción, y que sólo la plantilla afecta el comportamiento de los constructores. Si tenemos en cuenta la construcción en sólo un área pequeña, la siguiente ecuación describe la dinámica de la población de granos en esa zona:

$$\frac{dS}{dt} = D(r)L\left(1 - \frac{S}{K}\right) - P(r)US \quad (4.45)$$

La primera versión del modelo, no tomaba en cuenta los cambios en la probabilidad de recoger o dejar caer los granos, en función de la presencia de otros granos. Para tener en cuenta eso, se sustituye $D(r)$ por $D(r)G(S)$, tal que:

$$D(r)G(S)L(1-S/K) \quad (4.46)$$

Donde, $G(S)$ crece linealmente con S , y expresa la constatación de que la colisión con un obstáculo determina la caída del grano.

Del mismo modo, la tasa de recogida de granos es:

$$P(r)F(S)US \quad (4.47)$$

Donde, $F(S)$ disminuye con S , lo que significa que cuando S aumenta, la probabilidad de recoger un grano disminuye.

D y P se relacionan con la influencia de la plantilla. Por lo tanto, si las hormigas están en un área en la que la construcción es “autorizada” por la plantilla, D es grande y P es pequeño, mientras que si las hormigas se encuentran en una zona que no está autorizada para la construcción, D es pequeña y P es grande. Las hormigas también actúan como una “presión”: si el perímetro de la pared es pequeño y el número de trabajadores

en el interior es grande, la presión es grande y la U es grande. Si la pared está construida más lejos, para la misma población, U será más pequeño. Para las hormigas cargadas, la situación es la inversa.

Vemos así, que las probabilidades de dejar/recoger material están bajo la influencia de señales físicas y químicas, generadas por las crías y hormigas adultas, disminuyendo dichas señales desde el centro hacia la periferia de la colonia. Una modificación de la composición de la colonia, conduce a una modificación de la distribución espacial de tales señales, que conlleva a su vez, a una modificación de las probabilidades de dejar y recoger material.

También, se puede añadir un comportamiento asociado a los obstáculos que consigue una hormiga durante la construcción. Cuando las hormigas salen del nido para alimentarse y vuelven, hay un tráfico considerable en y fuera del nido. Las hormigas que buscan granos, tratan de evitar estos obstáculos y buscan otros caminos, asociado al siguiente comportamiento de búsqueda: una hormiga que ha recogido un grano, y que consigue otros granos en su camino, trata de empujarlos fuera de su camino. Teniendo en cuenta ese tráfico, y el comportamiento anterior, la ecuación 4.46 pasa a ser:

$$\frac{dS}{dt} = D(r)G(S)L\left(1 - \frac{S}{K}\right) - P(r)F(S)UST(r) \quad (4.48)$$

Donde, T(r) es la fracción del tráfico en la zona focal, y tiene que ver con la proporción de obstáculos en esa zona, en comparación con otras áreas. Si la cantidad de granos es, respectivamente, grande o pequeña, en la zona central, en comparación con la cantidad en las otras áreas, la proporción del tráfico será, respectivamente, pequeña o grande. Una forma muy simple para describir eso es:

$$T(r) = A/(A + A^*) \quad (4.49)$$

Donde A y A * son, respectivamente, una medida de lo “atractivo” de la zona central, y del resto de las zonas combinadas. A* es proporcional a la facilidad con que las hormigas pueden cruzar las otras zonas. A* es pequeño o grande, cuando los obstáculos son, respectivamente, numerosas o raros.

Como dijimos antes, los trabajadores se comportan con poco, o ningún, conocimiento de la estructura que están ayudando a crear. Las estructuras de nido que resultan, sin embargo, son bastante sofisticadas, no sólo como entidades estáticas, sino en su dinámica espacio-temporal. Los aspectos claves en la construcción de nidos en las hormigas son:

- El papel de la plantilla, proporcionada por el grupo de crías y hormigas adultas,
- La retroalimentación positiva (bola de nieve), por el efecto de los granos, en el comportamiento de las hormigas para depositar otros granos, y
- La retroalimentación negativa, derivada por la acumulación local de granos que inhiben, literalmente, la eliminación de otros.

La plantilla es dinámica, en parte, por lo siguiente: en invierno, por dos motivos muy relacionados, la actividad general en las colonias disminuye. En primer lugar, ya que el metabolismo, tanto de las hormigas adultas como de sus crías, caen al disminuir la temperatura, y en segundo lugar, como consecuencia de una menor demanda de alimentación por parte de las crías, la actividad de las hormigas adultas cae aún más. Por lo tanto, el tamaño efectivo de la plantilla es reducido. Como resultado, se producen cambios en las probabilidades que determinan las posiciones de las paredes. De esta manera, las hormigas en otoño tienden a reconstruir sus nidos, para que sean más pequeños. En verano se redefine la plantilla por las razones inversas antes señaladas (más actividad en la colonia), de esa manera, la plantilla se va adaptando a cada época del año.

Por último, hemos dicho que la reubicación al interior de los nidos de bloques de construcción, es hecha por los trabajadores que permanecen en el nido. La tasa de traslado/reubicación, se ve influida por la densidad, la distribución, y los patrones de movimiento de la población de trabajadores dentro del nido.

4.2.1.5 Agregación (cementeros, clasificación de crías)

La agregación es un fenómeno común, tanto en las especies invertebradas como vertebradas. La agregación es uno de los fenómenos sociales más básicos (muchas actividades de los insectos sociales están

vinculadas a la misma). En los insectos sociales, la agregación juega un papel esencial en la organización de su comportamiento social (por ejemplo, la organización espacial de la población es derivada de ampliaciones, basadas en la densidad local de los individuos de la colonia, algo fundamental en la defensa de sus panales en las abejas, búsqueda de alimentos en las hormigas, etc.). La agregación también actúa como reguladora de las actividades colectivas (por ejemplo, en las excavaciones para construir nidos).

En general, los procesos de agregación tienen un papel relevante en la aparición de procesos de cooperación y asignación de tareas en las colonias. El fenómeno de agregación es de particular interés, porque es un requisito previo para el desarrollo de otras formas de cooperación en una sociedad de insectos. Las decisiones colectivas son un subproducto de los mecanismos involucrados en la agregación.

Los patrones de agregación son muy diversos. Uno podría preguntarse ¿Cómo estos patrones surgen?. Por ejemplo, las hormigas inician la formación de dichos patrones mediante la modulación de la emisión de una señal de atracción. También, dan lugar a patrones, los cambios cuantitativos en la duración de la interacción entre los animales, una vez que han alcanzado un sitio de encuentro.

El fenómeno de agregación es muy sensible a muchos factores ambientales o sociales, como la disponibilidad del espacio, la densidad de insectos, etc. En dicho fenómeno, dos dinámicas se distinguen [53]:

- En primer lugar, los animales se agrupan, a pesar de la heterogeneidad del medio ambiente.
- En segundo lugar, el grupo de animales regula sus actividades, a través de las inter-atracciones sociales.

Muchas feromonas de agregación se han identificado [53]. Un ejemplo clásico es la tendencia de las hormigas, abejas, etc., de agregar los huevos y larvas en montones separados. En general, las colonias de hormiga muestran:

- Un alto nivel de agregación, que permite la aparición de grupos,
- Que a mayor número de hormigas dentro de un grupo, mayor es el

tiempo que permanecerá la hormiga en ese grupo, y

- Que la densidad de la población, sólo tiene una influencia débil en el proceso de agregación.

Un ejemplo interesante, es la organización del cementerio en ciertas familias de hormigas (por ejemplo, las hormigas *Lasius*, *Pheidole pallidula*, etc.) [65]. El fenómeno que se observa, es la agregación de los cadáveres de los trabajadores. Sus cuerpos muertos, o más precisamente, los elementos que pertenecen a los organismos muertos, son agrupados. Si hay heterogeneidad espacial, los grupos se forman a lo largo de dicha heterogeneidad. La formación de cementerios en las colonias de hormigas, depende de un mecanismo basado en el comportamiento individual de los trabajadores, que conduce a la formación de patrones, el cual se ve afectado por características como, la densidad de los cadáveres, el espacio que ocupa el cementerio, etc. Este es un fuerte indicio, de que la formación de los cementerios en las hormigas es un ejemplo de morfogénesis.

En general, lo que sucede es que los trabajadores ordenan los cadáveres – literalmente, organizan un cementerio- para limpiar sus nidos [146]. Si hay cadáveres, o más precisamente, partes de cuerpos, lo suficientemente grandes, distribuidas al azar en el espacio, los trabajadores forman grupos. El mecanismo fundamental de este fenómeno de agregación, es una atracción entre los elementos muertos mediada por los trabajadores. Es esta retroalimentación positiva y auto-catalítica, que conduce a la formación de grandes grupos. En este caso, la distribución de los grupos en el entorno, juega el papel de variable estigmérgica. Denebourg et al. [48] han propuesto dos modelos, de ese fenómeno de agrupamiento y clasificación de cadáveres en las hormigas. La idea general es que los elementos aislados, deben ser recogidos y dejados en un lugar donde varios de los elementos de ese tipo estén presentes. Ellos suponen que sólo hay un tipo de elemento en el medio ambiente. La probabilidad de que un movimiento al azar de un trabajador sin carga, encuentre un objeto para recoger en un punto, viene dado por [26, 65, 146]:

$$P_r = \left(\frac{k_1}{k_1 + f} \right)^2 \quad (4.50)$$

Donde f es la fracción percibida de elementos en la vecindad del trabajador⁵⁷, y k_1 es un umbral (constante). Cuando $f \ll k_1$, P_r es cercano a 1, es decir, la probabilidad de recoger un elemento es alta cuando no hay muchos elementos en la zona. P_r es cercana a 0 cuando $f \gg k_1$, es decir, es poco probable eliminar elementos de grupos densos. Por otro lado, la probabilidad de un trabajador con carga de depositar un objeto es:

$$P_d = \left(\frac{f}{k_2 + f} \right)^2 \quad (4.51)$$

Donde k_2 es otro umbral (constante). Para $f \ll k_2$, P_d es cercano a 0, mientras que para $f \gg k_2$, P_d es cercano a 1 (es decir, la probabilidad de depositar un elemento es alta cuando hay muchos elementos en la zona). Como era de esperarse, la recogida o depósito de objetos obedece a normas opuestas. Algunos ejemplos de los resultados de simulaciones con ese modelo, pueden ser vistas en la siguiente figura, donde se observa como son reagrupados los objetos (grupos pequeños uniformemente espaciados emergen, en un tiempo relativamente corto, fundiéndose después, en grupos más grandes).

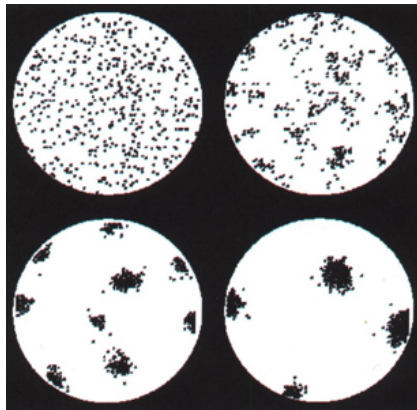


Figura 4.11. Resultados de simulaciones con el modelo de recolección y depósito de objetos (tomado de [26]).

⁵⁷ Deneubourg et al. [17, 48, 64], teniendo en mente una aplicación en robótica, se alejan de la realidad y suponen que f se calcula utilizando una memoria a corto plazo que cada hormiga posee, así f es calculado como el número de objetos durante las últimas T unidades de tiempo, dividido por el número de objetos máximo que se pueden encontrar durante ese lapso de tiempo.

Lumer y Faieta han generalizado el modelo de Denebourg et al. [26, 48], para aplicarlo al análisis de datos. La idea es definir una distancia o diferencia d entre los objetos, en el espacio de los atributos de los objetos. Ellos proyectan el espacio de los atributos en un espacio de menor dimensión, por lo general de dimensión 2, a fin de que las agrupaciones aparezcan si: las distancias intra-grupo (es decir, distancia entre los atributos de los objetos dentro de los grupos) son más pequeñas, con respecto a las distancias inter-grupos (es decir, distancia entre los atributos de los objetos que pertenecen a diferentes grupos). En este caso, la probabilidad de recolección y depósito es:

$$P_r(o_i) = \left(\frac{k_1}{k_1 + f(o_i)} \right)^2 \quad P_d(o_i) = \begin{cases} 2f(o_i) & \text{si } f(o_i) < k_2 \\ 1 & \text{si } f(o_i) \geq k_2 \end{cases} \quad (4.52)$$

Donde, $f(o_i)$ es la similaridad promedio del objeto o_i , con otros objetos o_j presentes en la vecindad de o_i (densidad local):

$$f(o_i) = \begin{cases} \frac{1}{s^2} \sum_{o_j \in V_{\text{vecino}}(r)} \left(1 - \frac{d(o_i, o_j)}{\alpha} \right) & \text{si } f(o_i) > 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (4.53)$$

Donde, $d(o_i, o_j)$ es la distancia entre los objetos o_i y o_j , α^{58} es un factor de disimilaridad, r es el sitio donde está el individuo y s^2 es el área alrededor de r .

Lumer y Faieta han añadido tres características a su modelo, ellas son [26]:

- Diferentes velocidades de movimiento de las hormigas. La velocidad v influye en la tendencia de una hormiga a recoger o depositar un objeto, para ello se sustituye en la ecuación 4.53 α por $\alpha(1 + ((v-1)/v_{\text{max}}))$,

⁵⁸ Es importante, ya que determina cuando dos elementos deben o no estar ubicados juntos. Si α es demasiado grande, no hay discriminación suficiente entre los distintos elementos, lo que lleva a la formación de grupos con componentes que no pertenecen a la misma categoría. Si α es demasiado pequeño, las distancias entre los elementos son amplificadas, hasta el punto que elementos relativamente cercanos no son agrupados juntos, porque la discriminación es demasiado alta.

donde v es el número de celdas por unidad de tiempo caminadas por una hormiga y v_{\max} su valor máximo. Las hormigas de movimiento rápido, no son tan eficientes como las hormigas lentas, en sus estimaciones de la similitud promedio de un objeto con sus vecinos. La diversidad de velocidad en las hormigas, permite formar grupos diversos simultáneamente: las hormigas rápidas forman grupos muy genéricos, mientras que las hormigas lentas generan grupos más precisos.

- Una memoria a corto plazo. Las hormigas pueden recordar los m elementos pasados. Cada vez que un artículo se recoge, la hormiga compara las propiedades del elemento con las de los m elementos memorizados y se dirige hacia la ubicación de los más similares, en lugar de moverse al azar. Este comportamiento conduce a una reducción en el número de grupos equivalentes.
- La posibilidad de que agentes puedan iniciar la destrucción de grupos, si no se han vuelto a realizar ningún depósito, o anular las recolecciones en un determinado intervalo de tiempo. Este procedimiento permite un escape de un local no óptimo.

El modelo anterior, puede ser fácilmente extendido al caso en el que hay más de un tipo de elementos (lo cual nos permite considerar la tarea de clasificación). Consideremos, por ejemplo, el caso de dos tipos A y B de elementos en el medio ambiente. El principio es el mismo que antes, pero ahora f se sustituye por f_a y f_b , las fracciones respectivas de los artículos de los tipos A y B, encontradas durante las T últimas unidades de tiempo. En este caso de reagrupamiento de dos tipos de elementos, la fórmula propuesta en [5, 26] es:

$$P_r(A) = \left(\frac{k_1}{k_1 + f_A} \right)^2 \quad P_r(B) = \left(\frac{k_1}{k_1 + f_B} \right)^2 \quad (4.54)$$

$$P_d(A) = \left(\frac{f_A}{k_2 + f_A} \right)^2 \quad P_d(B) = \left(\frac{f_B}{k_2 + f_B} \right)^2 \quad (4.55)$$

Y los resultados obtenidos con ese modelo, son mostrados en la figura 4.12.

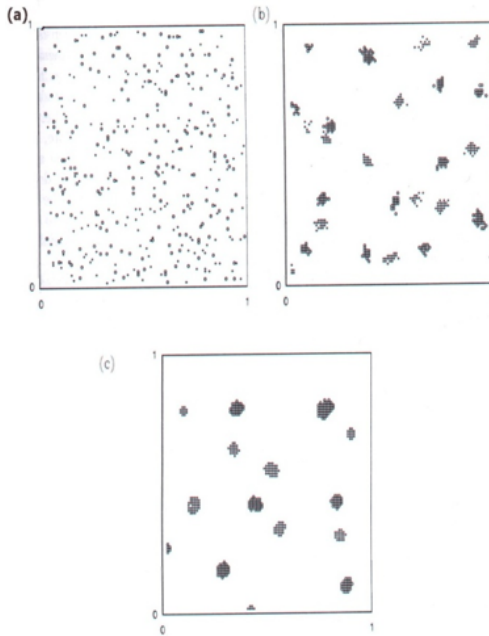


Figura 4.12. Resultados de simulaciones con el modelo de recolección y depósito de dos tipos de objetos planteado en [26], en diferentes momentos de la simulación: a) inicial, b) intermedia y c) hacia el final (tomado de [26]).

En general, las simulaciones muestran cómo pequeños grupos surgen dentro de un tiempo relativamente corto, y luego se fusionan lentamente en un número menor de grandes grupos, lo que origina una distribución espacial de objetos, muy similar a las encontradas en la naturaleza.

Otro modelo de este fenómeno, propuesto en [187], pero en este caso para la recolección de cadáveres, es basado en dos variables, la densidad de hormigas transportando cadáveres $a(x, t)$, y la densidad de los cadáveres $c(x, t)$, donde x y t representan el espacio y el tiempo:

$$\Omega(c, a) = v \left[k_a a + \frac{\alpha_1 a \phi_c}{\alpha_2 + \phi_c} - \frac{\alpha_3 \rho c}{\alpha_4 + \phi_c} \right] \quad (4.56)$$

$\Omega(c, a)$ describe el comportamiento de las hormigas, v es la velocidad lineal de las hormigas, ρ es la densidad de las hormigas sin carga, $k_d a$ representa el depósito espontáneo (k_d es la tasa de depósito espontáneo de las hormigas con carga), y los otros dos componentes representan la densidad de depositar o recoger, respectivamente. Los dos primeros componentes son proporcionales a la densidad de las hormigas llevando cadáveres (a), y el último término es proporcional a las hormigas sin carga (ρ), $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, son constantes empíricas, y ϕ_c es un término que representa la interacción entre las hormigas y los cadáveres:

$$\phi_c = \frac{1}{2\Delta} \int_{x-\Delta}^{x+\Delta} c(z) dz \quad (4.57)$$

Donde, Δ es el radio de percepción dentro del cual las hormigas pueden detectar cadáveres (normalmente entre 0,5cm y 1,0cm). La tasa de depósito de las hormigas cargadas aumenta con ϕ_c , llegando al valor asintótico de $v\alpha_1$. La tasa de recogida de las hormigas no cargadas depende de la presencia de hormigas sin carga y cadáveres disponibles, disminuyendo cuando ϕ_c aumenta. Por lo tanto, el tamaño del clúster actúa como una retroalimentación negativa para la tasa de recolección (ϕ_c es un indicador local del tamaño de clúster). El segundo y tercer término de la ecuación 4.56 forman el grupo, y su crecimiento inhibe el crecimiento de otros grupos.

Otro modelo interesante de organización del ambiente, es el inspirado por la clasificación de las crías en las sociedades de insectos [55]. La clasificación de crías es una actividad, que puede ser observada en muchas especies de hormigas (por ejemplo, en las *Leptothorax unifasciatus*), en las que forman compactos grupos de sus huevos, colocando los más pequeños en el centro del nido y la más grandes en la periferia (las larvas). Basada en esa idea, Deneubourg et al. [17, 48] propusieron un modelo de este fenómeno, en la que una hormiga recoge y deposita un artículo según el número de elementos similares que lo rodean (por ejemplo, si una hormiga lleva un huevo pequeño, habrá una alta probabilidad de dejar el huevo pequeño en una región poblada por pequeños huevos. Por el contrario, si la hormiga encuentra una larva grande rodeada de huevos pequeños, habrá una alta probabilidad de recoger la larva). En todas las demás situaciones, la proba-

bilidad de que una hormiga recoja o deposite un elemento tiene un valor pequeño. Lumer y Faieta y Kuntz, Snyers y Layzell, han aplicado ese modelo para el problema de agrupación siguiente: supongamos un conjunto de puntos en un espacio n dimensional, y una métrica d que mide la distancia entre los pares de puntos. Los puntos deben ser proyectados en el plano, de tal manera que si dos puntos proyectados en el plano son vecinos, sus puntos correspondientes en el espacio n -dimensional son vecinos según la métrica d . La dispersión inicial de los objetos es al azar, y las hormigas artificiales realizan caminatas aleatorias en el espacio, para recoger o dejar objetos usando las reglas del modelo de Deneubourg et al. [26, 55]. Los resultados obtenidos son prometedores: son cualitativamente equivalentes a los obtenidos por técnicas clásicas, como la descomposición espectral, pero a un menor costo computacional.

Ese modelo puede reproducir el comportamiento de las colonias de hormigas *Leptothorax* para reordenar sus crías [66]. Las crías están dispuestas en anillos concéntricos en torno a los huevos. Sucesivamente, las larvas más grandes se disponen en bandas progresivas lejos del centro. Sin embargo, las mayores y más antiguas crías se colocan en una posición intermedia entre las larvas más grandes (la mayoría en la periferia) y las larvas de tamaño medio. Cuando las colonias migran a nuevos nidos, rápidamente vuelven a crear estos patrones característicos. La cría de los *Leptothoracines* es inmóvil, es decir, la cría cambia sólo de ubicación como consecuencia de ser llevada por los trabajadores. Además, los nidos son casi totalmente uniformes, la única falta de uniformidad, es que hay una sola entrada del nido en una de las paredes.

Otra característica clave de los insectos sociales es la “atracción” que ejercen los adultos. Esto a menudo conlleva a una división del trabajo, donde ellas traen alimentos a los trabajadores, que a su vez alimentan y cuidan las crías. Esta división del trabajo implica que hay individuos (crías) dispuestos y capaces de recibir alimentos. La eficiencia de todo el proceso puede potenciarse, si esas diferentes tareas ocurren previsiblemente en diferentes lugares. Así, las hormigas crean predecible patrones espaciales en sus nidos, mediante la clasificación de sus crías. Esto no sólo es de interés directo en términos de espacio, organización y ergonomía, tiene un efecto directo sobre la demografía de la colonia. No todas las crías probablemente sobrevivan. La comida puede ser un factor limitante, para que algunas larvas mueran de hambre. Al ordenar las crías, unas podrán recibir más atención

que otras. De esta manera, las crías se distribuyen dentro de cada colonia con el mismo patrón: grupos de anillos concéntricos, cada uno con un tipo diferente de cría. Este patrón generalmente es consistente, a pesar de que las colonias puedan tener diferentes tamaños de población de trabajadores, número de crías, composición, etc. En general, las crías tienden a ser agrupadas dentro de una parte del espacio disponible del nido, lejos de la entrada del nido (ver figura 4.13). El modelo estándar es: los huevos y micro-larvas en el centro, y las larvas grandes más lejos del centro.

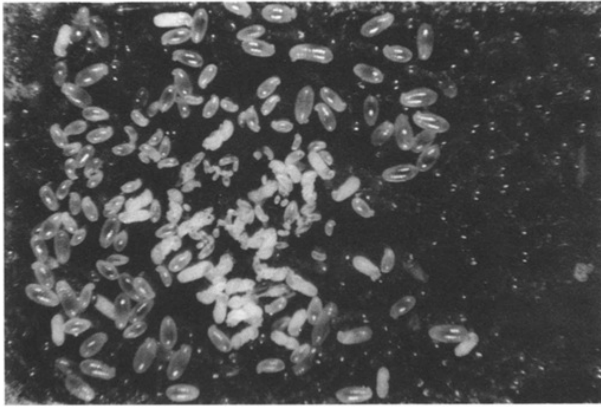


Figura 4.13. Crías completamente ordenadas de una colonia. Las crías están agrupadas a la izquierda del nido, lejos de la única entrada, en el medio de la pared del nido en el lado derecho (no se muestra). El nido fue fotografiado sobre un fondo negro, para resaltar las crías de blanco; las obreras oscuras, y las reinas apenas visibles (tomado de [65]).

Durante la migración, inicialmente las crías se colocan al azar en el nuevo nido, pero los elementos transportados en la migración, más tarde tienden a ser colocados cerca de objetos del mismo tipo que ya están en el nuevo nido. Incluso, los que ya están dentro del nuevo nido, pueden ser recogidos y trasladados, a menudo más cerca de grandes grupos de elementos del mismo tipo. De esta manera, los grupos se forman de nuevo, hasta alcanzar el modelo estándar (clúster de elementos parecidos en concéntricos anillos).

Pareciera que estos patrones de cría tienen algún significado adaptativo, lo que se confirma por la alta prioridad que dan las hormigas rápida-

mente a volver a crear estos patrones, cuando migran a un nuevo nido. Los patrones de cría favorecen y promueven la distribución del trabajo dentro del nido (por ejemplo, permiten a los trabajadores especializarse en el cuidado de ciertos tipos de crías, que se encuentran en un lugar determinado dentro del nido), que a su vez, puede promover la supervivencia de la cría y su desarrollo (por ejemplo, la posición intermedia de las maduras, puede estar asociada con los elementos de cría que no requieran preparar alimentos).

El mecanismo que las hormigas utilizan para volver a crear estos patrones de cría, cuando se trasladan a un nuevo nido, no es conocido. Parte del mecanismo, puede implicar probabilidades condicionales de tomar o poner un elemento con sus vecinos. Un artículo puede ser más propenso a ser trasladado, si está aislado, o en un grupo de elementos disímiles, y puede tener más probabilidades de permanecer donde está, si tiene un gran grupo de artículos similares. Recientemente, Deneubourg et al. demostraron que tales reglas simples, son suficientes para colonias de hormigas, y como hemos visto, producen soluciones a problemas específicos. Los mecanismos que establecen la distancia entre puntos/artículos se desconocen. Pueden estar basados en las feromonas de las crías, o simplemente, ser producto de los desechos, que dan una indicación directa de la actividad metabólica.

Un último modelo que veremos, es el de autoensamblaje [47]. El autoensamblaje de las hormigas del género *Oecophylla*, se caracteriza por su capacidad para colgarse una en la otra para formar cadenas. La decisión individual se basa en la densidad local de los compañeros del nido, y puede ser activada por cualquier configuración favorable. Esto permite construir puentes en espacios vacíos (por ejemplo, entre dos ramas). Así, esas estructuras de auto-ensamblaje son un tipo particular de agregación.

Este modelo muestra cómo un parámetro (en este caso, el tiempo de descanso), puede producir diferentes patrones de agregación, independiente de cualquier señalización de los animales. En las hormigas *Oecophylla*, estos mecanismos regulan la ubicación de la cadena, y evita la formación de numerosas e ineficientes cadenas. Por otra parte, la colonia puede ajustar el número de cadenas [47]: una pequeña colonia no

forma más de un cadena, pero una gran colonia será capaz de producir varias cadenas funcionales.

En el contexto de la emergencia, la agregación y su resultante efecto de aumento de densidad, es un requisito previo para la aparición de formas superiores de cooperación. La densidad está involucrada, y conduce el proceso de diferenciación social: en una colonia muy grande, mayor será la especialización.

Por otro lado, en función del lugar de los grupos, los individuos que los constituyen tendrán una probabilidad dada de estar involucrados en una u otra tarea. Por ejemplo, un grupo situado cerca de la entrada del nido, tendrá una mayor probabilidad de participar en el forraje. Por el contrario, un grupo situado cerca de las reservas de alimentos, se estimula a realizar las tareas de clasificación y gestión. Así, la asignación de tareas y la especialización individual, pueden ser determinadas por la dinámica de agregación. La agregación podría ser una de las claves para entender la transición entre las diferentes formas de cooperación, y por lo tanto, los diferentes grados de sociabilidad.

La idea de agregación, podría ser extendida a la proximidad genética: la agrupación de individuos que tienen un genotipo similar, debería ser fácil, y la sinergia entre la amplificación y la proximidad genética, debería facilitar la aparición de la cooperación a lo interno de esos grupos.

4.2.1.6 Transporte de Objetos

En varias especies de insectos, los trabajadores cooperen para recuperar y trasladar grandes presas y/o objetos [106]. Particularmente, hormigas de varias especies, son capaces de recuperar colectivamente grandes objetos, que son imposibles de transportar una sola. Usualmente, una hormiga encuentra un objeto (por ejemplo, una hoja), e intenta moverlo sola. Cuando lo logra lo lleva al nido, pero cuando no es exitosa, la hormiga trata de reclutar a otras a través de trazas o por un contacto directo. Si después de cierto tiempo, el grupo de hormigas aun no puede moverlo, especializadas hormigas (con mandíbulas especiales) pueden ser reclutadas para esa tarea (eso ocurre así en algunas especies [106]).

A pesar de que el escenario se ve simple, los mecanismos para el pro-

ceso de transporte cooperativo aun no están claros (cuando y como un grupo de hormigas mueve un objeto grande). En general, debido a la gran variedad de objetos que puede llevar una hormiga, el método usado es determinado por la forma y la masa del objeto a transportar. Por ejemplo, algunas especies descomponen el objeto a transportar (como el alimento), y transportan individualmente cada pedazo. En esas especies, las hormigas cortadoras cortan en partes las hojas y frutos, en pedazos que puedan ser llevados por una sola hormiga. En otros casos, se prefiere el transporte en grupo. En el transporte en grupo, se usa un método que consiste en [106]: realineamiento y reposicionamiento. Según eso, una hormiga intenta mover un objeto, y si se resiste el objeto, realinea la posición de su cuerpo y vuelve a intentarlo (modificando la posición de aplicación de la fuerza puede ser suficiente). Si el realineamiento no es suficiente, intenta otra posición. Si varios reposicionamientos no son suficientes, entonces la hormiga recluta a otras.

En [26, 106] se plantean las siguientes preguntas, sobre el fenómeno de transporte cooperativo:

- ¿Hay alguna ventaja del transporte en grupo, con respecto a hacerlo en solitario?
- ¿Cómo son reclutadas las hormigas?
- ¿Cómo varias hormigas coordinan sus acciones, para realizar el transporte?
- ¿Cómo el grupo maneja los conflictos, situaciones de abrazos mortales por fuerzas antagónicas, etc.?

Algunos aspectos derivados de esas preguntas sobre el transporte cooperativo, se han estudiado, tales como el mecanismo de reclutamiento, el número óptimo de reclutas, la composición de los grupos, la coordinación y disposición de los transportistas, entre otras.

En general, la posición de las hormigas para hacer contacto con el alimento no es aleatoria, sino que tiene que ver a la posición del alimento con respecto al nido [106]. Al respecto, algunas especies de hormigas que transportan alimentos, lo prefieren hacer tomándolos en las esquinas. Hay varias razones para explicar esa preferencia de las hormigas, para tomarlos por las esquinas. Algunas de ellas son: las esquinas son fácilmente detectables, o el transporte por las esquinas es más eficiente, o girar un

alimento por una esquina es más fácil que por un lado.

En cuanto al reclutamiento, puede ser de dos tipos: en el primer caso, se deja una traza en el aire de la zona cercana al objeto a transportar, de tal manera que las hormigas vecinas a la zona sean atraídas rápidamente. Si no es suficiente el número de reclutas, las hormigas dejan un feromona desde donde está el objeto hasta el nido (las hormigas son estimuladas, para dejar el nido y seguir el feromona). Los grupos de reclutas dependen de la dificultad encontrada en los primeros intentos para transportar el objeto. Según algunos autores, esa dificultad en los primeros intentos, provee una estimación del peso del objeto a las hormigas. Por otro lado, el reclutamiento cesa, cuando el grupo puede transportar el objeto en una dirección bien definida.

La coordinación en el grupo de reclutas se requiere, para producir los cambios orientacionales y posicionales respectivos en el grupo. Aun ese proceso no ha sido claramente entendido a nivel biológico, pero se cree que a través de la modificación de los estímulos percibidos (estigmergia), se da este proceso. Ahora bien, cuando hay un bloqueo porque las fuerzas de las hormigas se hacen en sentidos contrarios, porque el grupo encontró un obstáculo, etc., se sigue el mismo procedimiento que inicialmente realizó la hormiga que encontró el objeto: intentos de realineamiento y de reposicionamiento se realizan, y si no son exitosos, se pasa a reclutar.

Un modelo básico, aplicado en robótica, sin comunicación directa, es el siguiente [106]: se cuenta con

- Sensores
- Actuadores
- Comportamientos de los agentes basado en:
 - Perseguir un objetivo
 - Evitar colisiones
 - Seguir a otro agente
 - Reducir velocidad
 - Buscar

La más baja prioridad entre los comportamientos la tiene “Buscar”, después “Seguir”, “Reducir”, “Perseguir un objetivo”, y finalmente, “Evitar”. “Seguir” y “Perseguir un objetivo” permiten un movimiento coordi-

nado, mientras que “Evitar colisiones” y “Buscar” generan dispersión. El comportamiento “Seguir” le permite a un agente, cambiar sus objetivos por los de otro agente. Esos comportamientos le permiten al grupo de agentes, hacer la tarea de transporte de manera cooperativa, sin comunicación directa.

4.2.2 Modelos de las Abejas

La teoría de la selección multinivel, muestra que los grupos de organismos pueden evolucionar a un alto nivel de organización funcional, cuando entre y dentro de los grupos prevalece la selección [158, 159, 162]. La más fuerte evidencia empírica que la selección natural ha dado origen a unidades adaptativas a nivel de grupos, proviene de las sociedades de insectos. En las sociedades de insectos nos encontramos con ejemplos notables de grupos (colonias), funcionando como totalidades coherentes, en la que sus miembros contribuyen armónicamente con el objetivo de mantener la colonia. Los miembros de estas colonias poseen comportamientos morfológicos, fisiológicos y especializados, que sirven al funcionamiento eficiente de la colonia a la que pertenecen.

Las colonias de abejas son un excelente ejemplo de cómo un grupo se comporta como una entidad supra-organizacional (enjambre de abejas). Las colonias de abejas han sido a menudo llamadas “super-organismos”, en analogía a un organismo complejo superior, que se compone de numerosas células individuales. Aunque muchas de las principales características también se pueden encontrar en otros animales socialmente organizados, como las manadas de lobos, el comportamiento de las colonias de abejas se asemeja más a los organismos multicelulares más primitivos [158, 162].

Así, la organización de las colonias de abejas revela numerosas analogías con organismos multicelulares, que lo identifican como un superorganismo [151]. Las trabajadoras cumplen el papel de las células somáticas de los organismos, con interacciones complejas. Estas interacciones están bajo el control parcial de señales (feromonas), que se utilizan principalmente para mediar la información en la colonia. La mayoría de las actividades en la colonia, son reguladas a través de tomas de decisiones locales, y por medio de procesos auto-organizados

que dependen de las respuestas de las trabajadoras según sus umbrales. En general, en las sociedades de abejas, el comportamiento de cada individuo está muy integrado, y de esa integración depende la supervivencia y la reproducción de la colonia. El grupo social es una instancia vital para la colonia, y el comportamiento de cada miembro es nulo si se les priva del contexto social. En el contexto colonial, las abejas son muy eficientes, particularmente, pueden regular el medio intracolonia, de tal manera, de sobreponerse a fluctuaciones en las condiciones ambientales (por ejemplo, sobrevivir a temperaturas ambientales bajas de $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). La capacidad de control térmico intracolonia, la capacidad de almacenar néctar y polen, entre otras cosas, les permite mantener largos períodos de tiempo de escasez y frío. Como consecuencia de esta habilidad homeostática, las abejas *Apis mellifera* han sido capaces de colonizar la mayoría de los diversos hábitats existentes en la tierra, que van desde el norte de Europa hasta Sudáfrica [56].

En general, la organización funcional de las colonias de abejas, es un excelente ejemplo de un sistema emergente [158, 160]. Dicha organización de la colonia de abejas, puede ser comparada con los organismos multicelulares en muchos aspectos, tales como: la composición en subunidades dependientes, la asignación de las funciones sexuales a una minoría, etc. Ahora bien, las abejas han alcanzado un alto nivel de complejidad, donde los individuos son parte integral de la colonia, y todo opera en el nivel colonial. Veamos con más detalle, algunas de las características que la asemejan a una entidad supraorganizacional [158, 159, 160]:

- *Analogías en la estructura de base.* La primera analogía fundamental entre un organismo y una colonia de abejas, es que ambas se componen de unidades individuales, las células y las abejas, respectivamente, y que dependen del funcionamiento de ellas para su supervivencia. Las células individuales tienen ciclos de vida dentro del organismo, y las células aisladas, por lo general, no pueden desarrollarse fuera de su medio ambiente orgánico. En principio, el desarrollo de las abejas individuales, no difiere mucho de cualquier otro insecto, sin embargo, hay específicas diferencias que rigen el desarrollo de una abeja. La más evidente, es que el desarrollo de los huevos a adulto, sólo puede ocurrir en presencia de grandes números de otras abejas. Una gran cantidad de trabajadoras es fundamental: proporcionan los panales donde la

reina deposita los huevos, alimentan y cuidan las larvas, mantienen la temperatura correcta para el desarrollo de las crías, etc.

- *Analogía en la diferenciación de sus miembros.* Durante el desarrollo de un organismo, las células son extremadamente versátiles, y se especializan en una variedad asombrosa de tareas diferentes. Aunque algo similar se observa en muchas familias de hormigas, en el caso de las colonias de abejas, la única diferenciación es entre las trabajadoras y las reproductoras. Sin embargo, esto no implica que no hay especialización en las abejas trabajadoras. Una colonia de abejas requiere de una variedad de tareas a realizar, pero la especialización de las trabajadoras, no es resuelta a través de castas fenotípicas, sino a través de sus respuestas diferenciadas a umbrales.
- *Analogía estructural entre las trabajadoras en una colonia y las células somáticas en un organismo.* Ambas sacrifican su aptitud física directa en apoyo a otras entidades: las capacidades de reproducción en el caso de las abejas, y el aspecto orgánismico en el caso de las células.
- *Analogía en los mecanismos evolutivos.* En las últimas décadas, el concepto de evolución ha sido objeto de intensas discusiones por los biólogos evolutivos. Se han refutado las ideas de Darwin de selección, algunos han establecido los genes como unidades primarias de selección, etc. Eso ha permitido una reevaluación de la importancia de los distintos organismos en la evolución. Por ejemplo, en [56] se señala que los cuellos de botella genéticos en la transmisión de genes, de generación en generación, son una condición necesaria para la evolución. En las colonias de abejas se cumple esa condición, ya que los genes se transmiten a través del cuello de botella de una reina y de unos pocos zánganos⁵⁹. Otros trabajos sobre la evolución, lo definen como un proceso de selección orgánica de dos niveles [56]: a nivel de las células y a nivel del organismo (para controlar las tendencias egoístas de sus células). Esto es muy similar a lo identificado en las sociedades de abejas.
- *Analogías en los principios organizacionales.* La organización en los organismos multicelulares, se caracteriza por la cooperación de miles de subunidades, en el cumplimiento de una multitud de funciones diferentes, fundamentales para el bienestar del organismo. Ahora bien, dos principios de organización se pueden observar: una de ellas es la coordinación de las funciones celulares, la otra es la especialización de grupos celulares con diferentes propósitos. Esto muestra

⁵⁹ Abeja macho

similitudes sorprendentes, con los principios de organización que se encuentran en las abejas. Además, la coordinación entre células y entre abejas trabajadoras, siguen patrones generales, sorprendentemente similares, que implican auto-organización, decisiones locales, bucles de retroalimentación, interacciones no lineales, etc., pero difieren en la contribución relativa de sus componentes. Por ejemplo, la especialización en las abejas trabajadoras, es alcanzada por castas temporales que consideran la variación genética.

- *Analogía en la coordinación basada en la auto-organización y en decisiones locales.* Las células en los organismos responden a condiciones locales, sin “saber” sobre la condición del organismo. En las colonias, las decisiones son basadas en estímulos locales, resultado del famoso lenguaje de la danza (por ejemplo, una recolectora recluta a otras trabajadoras a nivel local, para visitar la misma fuente de alimento, bailando). En general, existen varios comportamientos similares en las colonias de abejas (en la reina, en el uso del polen y néctar, etc.). En todos ellos, usando reglas muy simples, patrones complejos emergen, que dan lugar a una cooperación, al parecer “inteligente”.
- *Analogía en la coordinación basada en bucles/lazos de retroalimentación e interacciones no lineales.* La capacidad homeostática de las sociedades de abejas, no exige ningún tipo de control central. Bucle de retroalimentación simples, pueden emerger como una característica de las estructuras auto-organizadas (por ejemplo, la producción de calor individual de las abejas, en la superficie de un clúster de abejas) [32, 33, 34]. Uno de los mecanismos para explicar la no linealidad de las interacciones, son los bucles recurrentes, que determinan, como el funcionamiento de un individuo afecta a los demás. El mecanismo subyacente como respuesta a una alarma, nos puede dar un simple ejemplo de ello. En un ataque, las abejas liberan un feromona de alarma que atrae a otras abejas, y reducen sus umbrales de respuesta a los ataques (esto genera los consiguientes riesgos, de una masa inmensa de abejas contra-atacando, como el caso de las abejas africanas en los trópicos). Si el estímulo desaparece, se vuelve a los niveles normales de umbral. Otros ejemplos basados en bucles de retroalimentación abundan. Por ejemplo, las trabajadoras se dedican a una actividad específica, y al hacerlo, modifican las condiciones locales del estímulo, que posibilita que otras trabajadoras superen su umbral de respuesta (retroalimentación positiva). También lo contrario puede ser posible: la actividad de una trabajadora reduce el estímulo por debajo del umbral de respuesta de

otras trabajadoras, lo que hace que no participen en esa tarea. Así, un complejo sistema de división del trabajo, aparentemente inteligente, emerge, a través de variables y dinámicos umbrales de respuesta de las trabajadoras individuales.

- *Analogía en el papel de las estructuras jerárquicas de control en la coordinación.* Los organismos superiores se caracterizan, por la capacidad de liberar jerárquicamente señales globales controladas, que regulan la actividad celular. Por ejemplo, hormonas son liberadas para provocar reacciones específicas en ciertos órganos, el control neuronal es un mecanismo de decisión jerárquica. En general, las señales globales modifican los patrones existentes creados por la auto-organización y las decisiones locales. En comparación con ese control central de muchos organismos superiores, esto es poco desarrollado en las sociedades de abejas. Un ejemplo de tales señales jerárquicas en las abejas es la reina, cuyo feromona generado por su mandíbula glandular, le señala a los miembros de la colonia su presencia, y genera una variedad de reacciones específicas en las trabajadoras.
- *Analogía en la diferenciación y especialización en la división del trabajo.* Una característica común de los organismos superiores es que sus células se diferencian en varios tipos, con fines diferentes. Por el contrario, la falta de aparentes diferencias entre las trabajadoras que componen las colonias de abejas, es bastante sorprendente. No es el caso de las sociedades de hormigas, que tienen una enorme plasticidad fenotípica, con una gran variabilidad de castas diferentes⁶⁰. Ahora bien, la diversidad en los umbrales de respuesta a los estímulos, en las colonias de abejas, estabiliza la colonia, evitando catástrofes. En general, en el caso de las colonias de insectos, dos mecanismos principales para la tarea de especialización se conocen [32, 33, 34]: en primer lugar, la división del trabajo es controlado a través del politeísmo temporal, que proporciona un sistema extremadamente flexible de asignación de trabajos. En segundo lugar, la división de tareas está sujeta a la variabilidad genética y/o del fenotipo. En el caso concreto de las abejas, la variabilidad del umbral, no se logra a través de una amplia gama fenotípica de las castas (como en las hormigas), sino a través de politeísmo temporal, en combinación con la diversificación genotípica.

⁶⁰ La presencia de muchas clases discretas en los sistemas complejos, mejora la facilidad de formación de patrones, y evita las reacciones caóticas del sistema.

Pasemos a estudiar algunos comportamientos interesantes de las colonias de abejas.

4.2.2.1 Escogencia del sitio para construir el Nido

Las abejas son un ejemplo, de cómo una colonia se comporta como un supra-organismo (enjambre de abejas) al decidir su futura casa. Los miembros del enjambre trabajan en conjunto para: descubrir cavidades posibles de anidación, evaluar cada una de ellas, elegir entre ellas y, finalmente, trasladarse en masa al sitio elegido [32, 33, 34]. Sin embargo, la forma cómo funciona la toma de decisiones colectivas en el enjambre de abejas, sigue siendo desconocida. Algunos investigadores han señalado, que la elección del sitio que hace un enjambre, es similar al problema de toma de decisiones al que se enfrenta un ser humano al elegir entre varias versiones de un artículo de consumo. Este problema de los “consumidores-elección” es similar, pero no idéntico (de hecho, los enjambres han sido descrito como “entes cognoscitivos de orden superior”, o “Cerebro Colectivo”) [32, 33, 34].

Este fenómeno ocurre al final de la primavera y principios del verano, cuando una colonia deja atrás su colmena y procede a dividirse por sí misma. La reina madre, y la mitad de las abejas obreras, salen de la colmena para establecer una nueva colonia, mientras que una hija de la reina, y el resto de trabajadoras, se quedan para perpetuar la antigua colonia. El enjambre de abejas deja el sitio actual en masa, de forma rápida, para ir a un sitio intermedio (generalmente, una rama de un árbol cercano), desde donde deben elegir su lugar de residencia futuro. El proceso de selección del sitio de anidación, se inicia con varios cientos de abejas exploradoras.

Estudios previos del proceso de selección de los sitios del nido en las abejas melíferas, indican que parecería que emplean la regla de decisión “mejor de N” [32, 33, 34]: el enjambre toma la muestra de un número (N) de sitios alternativos, y luego trata de seleccionar el mejor para su futuro hogar. Hasta ahora, esta regla de decisión no ha sido rigurosamente probada, que se sigue en los enjambres. Lo que sí se observó, es que los enjambres tienden a encontrar todos los sitios de anidación disponibles, y que su orden de descubrimiento no determina la elección de un enjambre.

En todo caso, el proceso que se lleva a cabo es de una gran complejidad, notoria por el gran número de señales a las cuales las trabajadoras son sensibles en el interior de una colmena, y sus impresionantes capacidades para integrar dicha información al momento de decidir cómo comportarse [162]. Consideremos, por ejemplo, las acciones de una abeja obrera cuando está explorando y ha descubierto un árbol prometedor para hacer un nido [162]. Primero, pasa 20-40 minutos inspeccionando el sitio, adquiere información sobre el volumen de la cavidad, el tamaño de su entrada, su altura desde el suelo, su exposición al sol y al viento, y otras variables más. En resumen, hace una *evaluación multifactorial*. A continuación, integra la información que ha adquirido del sitio, para determinar su conveniencia general como un lugar de residencia en el futuro. Después, regresa al enjambre, donde realiza una danza para presentar su sitio a las demás abejas exploradoras. Adopta una forma especial de danza, que produce un coleteo con menos dispersión direccional (que indica la dirección del sitio con precisión), de lo que haría si desea indicar una amplia revisión de flores [161]. Particularmente, hábilmente ajusta tanto la duración como el ritmo de su baile con la conveniencia de su sitio [163], lo que determina el número de exploradoras a reclutar. Todos esos comportamientos refinados de danza, son importantes para el proceso de consenso, por el cual las exploradoras de un enjambre colectivamente eligen su nuevo hogar. Una vez que el domicilio del enjambre ha sido elegido, las exploradoras dejan de bailar, y comienzan a producir una señal diferente. Esta señal estimula a las no exploradoras en el enjambre, para calentarse a una temperatura dada (35 °C), para prepararse para el despertar [166]. Por último, una vez que todas las abejas en el enjambre están convenientemente calentadas, las exploradoras detienen esa señal e inician una tercera señal, la cual provoca la disolución de la agrupación para migrar al nuevo sitio.

Así, una abeja trabajadora es una sofisticada máquina biológica, que es exquisitamente sensible a su entorno, y ajusta su comportamiento para adaptarse al siempre cambiante estado de su entorno. La complejidad del comportamiento de las abejas exploradoras, no es más que una pequeña fracción de la complejidad de su comportamiento en toda su vida (ellas también funcionan como abejas limpiadoras, abejas almacenadoras de alimentos, abejas recolectoras, etc.).

En este proceso, miles de abejas de un enjambre toman una decisión colectiva de un sitio, de entre muchos descubiertos. Al parecer, las opcio-

nes se discuten con poca o sin una directa comparación, a través de dos mecanismos [34]: la retroalimentación positiva a través del reclutamiento, que lleva a un crecimiento en el número de exploradoras visitando buenos sitios para anidar, y la reducción de esa actividad de reclutamiento (danza) para los sitios no elegidos. En general, las abejas exploradoras vuelan por todos los alrededores, en búsqueda de nuevas cavidades de nido. Cuando una exploradora vuelve a la multitud, después de la inspección de una cavidad de alta calidad, realiza bailes que codifican la distancia y dirección del sitio. Las exploradoras varían considerablemente la intensidad de la danza, según la calidad del sitio. Además, la intensidad de las danzas es casi el doble que cuando consiguen néctar y polen. Así, en un enjambre, las exploradoras visitan muchos potenciales sitios para anidar, por lo que las danzas de varios sitios se pueden realizar simultáneamente en el enjambre. Sin embargo, en el tiempo, las abejas llegan a un consenso, y los bailes de un sólo sitio se mantienen. Cuando la unanimidad se alcanza, las abejas reconocen que la decisión ha sido tomada, rompen el enjambre, y vuelan hacia al lugar elegido.

Esto es un ejemplo notable de la negociación colectiva para la toma de decisiones. La elección entre sitios de anidación, no se basa en la comparación directa de los nidos, sino en los procesos inherentes a la retroalimentación positiva y al desgaste de las bailarinas por deserción. Las abejas exploradoras evalúan muchas propiedades de las cavidades, como el volumen, la exposición, el tamaño y la altura desde el suelo de la entrada, y muestran coherentes preferencias en estas propiedades. Las abejas exploradoras, a menudo, son las abejas que habían sido cazadoras-recolectoras de néctar, antes en la colonia. Así, las exploradoras son mayores, en promedio, que las no exploradoras (cazadoras-recolectoras).

Lindauer resume el proceso de toma de decisión según la siguiente hipótesis [158, 159, 160]: “si son mejores las cualidades de un potencial lugar de anidación, será más viva y larga la danza de las exploradoras después de la inspección del sitio. De este modo, nuevas exploradoras son reclutadas en el enjambre para ese lugar, y luego ellas también reclutan, a través de sus bailes animados. Si las abejas exploradoras, que en un principio habían visitado sitios de calidad inferior, se consiguen con bailes más vivo de sus colegas, debido a que consiguieron sitios mejores, ellas se inhiben de bailar, ya que se encuentran en el camino de un acuerdo” (veremos más adelante, que ese mismo autor plantea otra forma de toma de decisiones).

Esa hipótesis tiene dos componentes: en primer lugar, el reclutamiento de las exploradoras de otras, cuando consiguen buenos sitios, que a su vez reclutan más, lo que da lugar a un aumento exponencial del número de exploradoras. En segundo lugar, no hay una comparación entre sitios alternativos individualmente por parte de las exploradoras, sino que la intensidad de los bailes, hace que algunas dejen de bailar, si consiguen uno más intenso. Así, el número de diferentes sitios anunciados por las danzas en el enjambre disminuye, hasta que todos referencian al mismo sitio. Algún tiempo después que esto ocurre, las abejas detectan que han tomado la decisión, y algunas exploradoras empiezan a generar un zumbido en el enjambre, para que todas las exploradoras vuelvan al enjambre [32, 34, 158, 159]. Es una suerte de mecanismo que informa a las exploradoras, que la decisión ha sido alcanzada.

Como no son todas las abejas las que participan en el proceso de toma de decisiones, ellas necesitan activar toda la colonia al tomar una decisión. Para eso, hacen otro zumbido (una señal crítica), que hace que el enjambre se rompa y las abejas vuelen. La claridad de cómo funciona ese mecanismo es aun objeto de discusión, en principio, lo que venimos de narrar, es una suposición. Lo cierto es que el enjambre volando, consiste de una gran parte de las abejas que nunca han estado en el lugar del nuevo nido, y la mayoría probablemente no ha visto las danzas que indican el sitio. La hipótesis de [158], es que una vez en el aire el enjambre, se dirige hacia el lugar del nido elegido por las exploradoras, a través de una nube en el aire que indica la dirección. En [160] sugieren feromonas, que son utilizados por las abejas exploradoras, para dirigir el enjambre. Sin embargo, ambas siguen siendo suposiciones.

En [34] han estudiado el fenómeno de la danza en un enjambre de abejas, para conseguir un nuevo nido en un bosque. La figura 4.14 muestra el proceso de toma de decisiones de un enjambre, a partir de un gran número de sitios posibles de nidificación. Vemos que al inicio las abejas exploradoras informan de muchos posibles sitios de anidación. Ningún sitio (baile) domina, pero la distancia empieza a ser inferida por la danza en la primera parte del proceso de selección (ver figura 4.15). Eso hará que uno de los sitios, poco a poco, comience a ser anunciado mucho más que los otros. En efecto, al final, el sitio que se convirtió en el favorito, es objeto de todas las danzas (la unanimidad entre las abejas se alcanza).

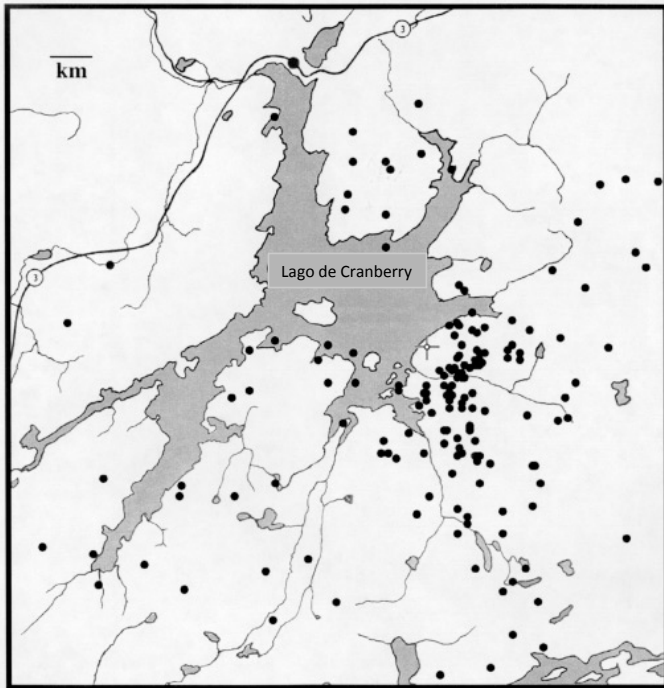


Figura 4.14. El mapa representa la región boscosa alrededor del lago Cranberry, en Estados Unidos. Los puntos representan las ubicaciones de los nidos inferidas por las danzas de las exploradores del enjambre, la ubicación del enjambre es señalado por una cruz cerca de la orilla sureste del lago (tomado de [34]).

Específicamente, la figura 4.15 muestra la distribución de la información de la distancia en la danza, durante la primera parte de la selección de los sitios de anidación.

Proporción de danzas

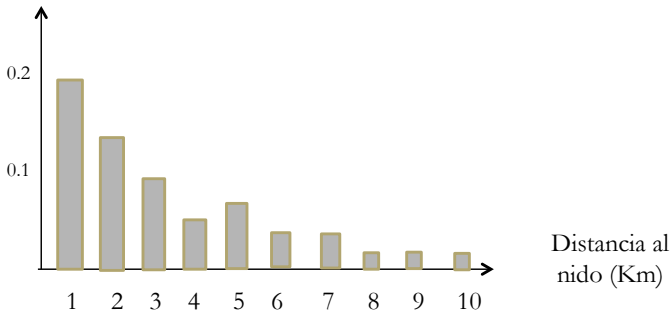


Figura 4.15. Distancia inferida por las danzas del enjambre, en el lago Cranberry

Lo interesante del proceso anterior, es que un enjambre de abejas es un centro de información, en el que las observaciones de las exploradoras se anuncian en un lugar central. Ese proceso se ve en la figura 4.16 (ubicación de los bailes en la superficie de un enjambre durante tres momentos sucesivos del proceso de selección). Los patrones de las danzas en el enjambre, están inicialmente concentrados en una “pista de baile” restringida (Fig. 4.16A, en el cuadrante inferior izquierdo), pero esa concentración disminuye más tarde, tal que las danzas se reparten en gran parte de la región (Fig. 4.16C). Vemos así que la única cosa que llevan las exploradoras al enjambre (centro de información) es información, la cual es fundamental para que el enjambre haga una adecuada decisión colectiva, de enormes consecuencias para la supervivencia de la colonia.

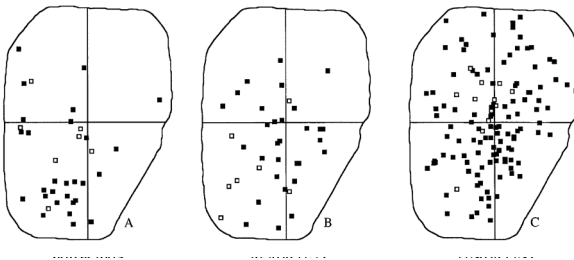


Figura 4.16. Lugares de baile en el proceso de buscar un nido en tres momentos distintos: A) al inicio, B) un momento posterior C) hacia el final del proceso de selección (tomado de [34]).

Este proceso es diferente, y más complejo, que el de selección de fuentes con néctar o polen, para la alimentación del enjambre. La diferencia más importante es que sólo un sitio puede ser seleccionado como casa (en el otro caso, muchos sitios pueden ser utilizados simultáneamente, no hay necesidad de encontrar el mejor sitio). Además, se requiere de mecanismos para alcanzar la unanimidad, así como también de mecanismos para saber que una decisión unánime se ha alcanzado (no ocurre nada de esto en la búsqueda de alimentos). Por último, una vez que las abejas saben que se ha tomado una decisión, debe haber una señal que provoque la migración (de nuevo, esto no ocurre en la búsqueda de alimentos).

El proceso de alimentación (búsqueda y recolección) es más individual, guiado por información compartida, que veremos en detalle más adelante. En contraste, el movimiento de un enjambre a un nuevo hogar, es una actividad de todo el grupo, de los más espectaculares vistos en las sociedades de animales. La información es compartida en el nido, y los individuos (exploradoras) no tienen otra empresa, que recopilar y comunicar información.

La escala espacial de este proceso es impresionante, en la búsqueda de sitios de anidación, un enjambre de abejas revisa áreas de más de un centenar de kilómetros cuadrados (formando un círculo). Dentro de esa zona, se desconoce por completo cómo es la búsqueda de las abejas. La escala temporal del proceso de descubrimiento y trasladado es muy rápida, a veces en el mismo día, y por lo general, en el plazo de 2 días.

El proceso para llegar a una decisión unánime requiere de tres aspectos [34].

- Debe existir la comunicación de hallazgos, para que la información sobre los sitios se familiarice.
- Debe haber algún mecanismo, por el cual el reclutamiento y las visitas a los sitios no-elegido cese.
- Debe haber reconocimiento, de que el proceso se ha completado.

Los patrones espaciales y temporales permiten responder a esos aspectos (la agrupación de danzas al inicio del proceso, para hacer más efectivo el intercambio de información, la propagación de los sitios de intercambio de información (difusión de las danzas), más ampliamente sobre el en-

jambre, una vez se ha logrado un consenso, etc., son ejemplos de ellos). Por otro lado, como vimos antes, para alcanzar la unanimidad, dos cosas tienen que suceder [34].

- Debe haber una forma de reclutamiento para los sitios, donde el número de exploradoras que los visitan y bailan por ellos, aumente.
- Debe haber formas de desgaste de sitios (dejar de promocionar sitios).

Particularmente, Seeley propone varias versiones de cómo ese desgaste ocurre [161, 162]. Una es: “Las abejas exploradoras, que en un principio habían anunciado lugares de calidad inferior de anidación son conquistadas por las danzas más vivas de sus competidoras, y como resultado, terminan inspeccionando ese sitio— por lo que pueden comparar los dos sitios— entonces, es natural elegir el mejor”. Otra propuesta de Seeley es que algunas exploradoras abandonan el proceso de reclutamiento, y aprueban la decisión de las otras exploradoras [163, 164]: “no se quedan obstinada en su primera decisión, después de un tiempo, se quedan en silencio, y dejan la decisión a las exploradoras que consiguieron un mejor sitio (que lo sabe, por la intensidad de sus danzas)”.

Se trata de dos formas muy diferentes de toma de decisión: En la primera, las abejas hacen una comparación individual y cambian su decisión a una mejor, es decir, las abejas cambian sus mentes. En la segunda, las abejas simplemente abandonan su tarea, después de realizar una cantidad inicial de reclutamiento. En particular, la segunda versión es un proceso continuo, no basado en la comparación, sino en un modelo alternativo: retroalimentación positiva y deserción escolar. Ahora bien, ambas versiones se basan en el aumento exponencial del reclutamiento en los sitios alternativos, tal que uno de ellos saca la delantera de forma rápida, y empieza automáticamente a dominar, porque existen mecanismos de desgaste de sitios.

Por otro lado, hay varias fuentes de diferenciación de sitios, que permite el reclutamiento diferenciado dinámico entre dos sitios:

- Una tiene que ver con la calidad de los sitios, que determina la intensidad de la danza. La diferenciación por la calidad que hacen las abejas al bailar, depende de la percepción de la calidad de los

sitios que ellas determinan⁶¹. Seeley menciona, que esa diferenciación se plasma en la duración y vigor del baile.

- Otra tiene que ver con el momento del descubrimiento. Un sitio que se descubrió antes, puede tener varios ciclos de selección, para el momento en que otro sitio de la misma calidad se descubre, lo que le permite constituir una mayoría, antes de que el segundo sitio pueda atraer suficientes reclutas para competir.

Vemos así como los mecanismos de toma de decisiones en grupo, que subyacen en el proceso de selección de nidos in situ en las abejas melíferas, es un proceso emergente [158, 162]. Hay tres requisitos, que un enjambre de abejas debe cumplir, para tener éxito en esa difícil tarea de elegir una casa [158, 159, 160].

- *Debe alcanzar una decisión correcta.* El éxito de una colonia depende fundamentalmente de ocupar una cavidad, lo suficientemente amplia, para contener los panales que la colonia necesita, para criar y almacenar miel. Al mismo tiempo, la cavidad debe ser lo suficientemente cohesionada, para proporcionar una buena protección de los depredadores, los ladrones, y las duras condiciones meteorológicas.
- *Debe lograr una decisión rápida.* Cada hora adicional que un enjambre pasa como un grupo expuesto (por ejemplo, colgado de una rama de árbol), baja sus reservas de energía, y aumenta sus posibilidades de ser afectada por la lluvia, depredadores, etc.
- *Es preciso llegar a una decisión única.* Una decisión dividida conduciría a la fragmentación del enjambre, lo que sería desastroso en la mayoría de los casos, dado que, por lo general, un enjambre tiene una sola reina.

Como hemos dicho, una pequeña minoría de las abejas del enjambre - las abejas exploradoras - participan activamente en el proceso de toma de decisiones. La gran mayoría de los miembros del enjambre permanecen en reposo, hasta que una decisión haya sido hecha, y sea hora de volar al lugar elegido. Las características genéricas del proceso de decisión incluyen [158, 159, 160]:

⁶¹ Por ejemplo, una exploradora invierte mucho tiempo en caminar por las superficies internas de la cavidad, y su percepción del volumen de la cavidad, está vinculado de alguna manera a caminar sobre ella.

- Las abejas exploradoras localizan posibles sitios para anidar en todas las direcciones, y a distancias de hasta varios kilómetros del enjambre,
- Las abejas exploradoras anuncian una docena, o más, de potenciales sitios de anidación, pero con el tiempo anuncian un solo sitio,
- Al rato de aparecer la unanimidad entre ellas, el enjambre despegala al nuevo sitio.

Algo interesante, es que la mayoría de las abejas que danzan para indicar un sitio, dejan de hacerlo después de unas horas, dejando que la siguiente “generación” de bailarines realice las deliberaciones. Así, la elección del enjambre del futuro hogar, está ampliamente distribuida entre las abejas exploradoras, sin líderes del grupo en el proceso de toma de decisiones, como una competencia amistosa entre los diferentes grupos de bailarines, que representan diferentes potenciales sitios de anidación. Los grupos compiten adicionando bailarines; tarde o temprano, un grupo de bailarines crece mucho más que los otros. El sitio cuyos bailarines prevalece es el ganador, y se convierte en el nuevo hogar del enjambre.

Las abejas exploradoras pueden descubrir varios sitios mediocres, antes de que encuentren un buen sitio, a veces pasando varias horas reclutando a otras abejas para esos sitios mediocres. Sin embargo, tan pronto como un excelente sitio es descubierto, las abejas de ese sitio reclutan con mucha fuerza, tal que a las pocas horas el número de abejas exploradoras en el excelente sitio, supera con creces, el número de cualquiera de los sitios mediocres.

Para la construcción del consenso del mejor sitio, en el proceso de selección se da una competencia amistosa entre las exploradoras “comprometidas” con los distintos sitios potenciales de anidamiento. Cada coalición de exploradoras comprometidas con un sitio en particular, compite con otras coaliciones para anexar exploradoras no comprometidas. Este proceso de toma de decisiones, puede ser conceptualizado por el par de ecuaciones propuestas por Winsor, en su *teoría de la competencia ecológica* [160, 162]:

$$dN_1/dt = r_1N_1U - a_1N_1 \quad (4.58)$$

$$dN_2/dt = r_2N_2U - a_2N_2 \quad (4.59)$$

Donde, N_i es el número de exploradoras comprometidas con el sitio i , U es el número de exploradoras no comprometidas (el recurso que se disputan), r_i es la tasa de reclutamiento de las exploradoras del sitio i , y a_i es la tasa de abandono (“desistimiento”) de las exploradoras comprometidas con el sitio i . La integración de las dos ecuaciones, eliminando U , nos da

$$\frac{N_1^{r_2}}{N_2^{r_1}} = C e^{(r_1 a_2 - r_2 a_1)t} \quad (4.60)$$

Así, si las exploradoras se comportan con una mayor tasa de reclutamiento para el sitio 1 que para el sitio 2, y una mayor tasa de abandono para el sitio 2 que para el sitio 1, $r_1 a_2 - r_2 a_1$ tiene un valor positivo, por lo que la relación aumenta. Esto implica la eliminación gradual de exploradoras comprometidas con el sitio 2.

Las ecuaciones de competencia (4.58 y 4.59), se refieren a la competencia por explotar la piscina de abejas exploradoras no comprometidas, por parte de las abejas comprometidas. En este modelo, la competencia es por un solo recurso – las abejas exploradoras no comprometidas. Estas ecuaciones muestran cómo las diferencias en las tasas de reclutamiento y abandono de los diferentes sitios potenciales de anidación, son suficientes para producir un claro ganador, en la competencia entre las coaliciones de abejas exploradoras. Las exploradoras modifican su comportamiento en relación con la calidad del sitio, de modo que el mejor sitio tiene la mayor tasa de reclutamiento (r_i) y la menor de abandono (a_i). Las exploradoras informan los mejores sitios, bailando con mayor intensidad (que se traduce en una mayor tasa de reclutamiento).

En concreto, cada abeja exploradora ajusta la intensidad (fuerza) de su baile, ajustando el número de oscilaciones (meneos). Ese número de oscilaciones/danza (W), se ajusta cambiando tanto la duración (D) como la tasa de producción de oscilaciones (meneos): $W = D \times R$.

En cuanto al proceso de cómo las abejas exploradoras abandonan un sitio (es decir, dejan de bailar y hacer visitas al sitio, y así ponen fin a su compromiso con el sitio), una de las características más curiosas

del proceso de toma de decisiones del enjambre de abejas, se han definido dos clases de hipótesis⁶² [165]:

Hipótesis 1, un estímulo interno causa el abandono de un sitio,

Hipótesis 2, un estímulo externo causa el abandono de un sitio

La hipótesis 1 se basa en la observación de que las exploradoras que visitan sitios de anidación, más rápidamente pierden el interés en sus sitios. Si lo asociamos a la danza, la mayoría de las exploradoras muestran una reducción significativa de su intensidad, varias horas después de haber iniciado la danza. Incluso, cuando se ha visitado al mejor sitio inicialmente, dejando de realizar bailes y de hacer visitas a ese sitio. Esto sugiere que la pérdida de interés de las exploradoras, es el resultado de un proceso interno programado.

La hipótesis 2 se basa en las observaciones de abejas exploradoras, que dejan de visitar un sitio y comienzan a hacer visitas a un segundo sitio. Estas observaciones sugieren que las exploradoras abandonan un sitio, sólo después de haber seguido las danzas para inspeccionar un sitio superior. La información sobre un sitio mejor (un estímulo externo), es lo que causa que una exploradora abandone un sitio. Ahora bien, es posible que las exploradoras, en general, pierdan el interés en un sitio, incluso antes de aprender acerca de un segundo mejor. Si es así, entonces no se cumple la hipótesis 2, ya que el estímulo externo sobre un mejor sitio, no sería necesario, para que una exploradora lo abandone.

Una evidencia que apoya la hipótesis 1, es la constatación de que la intensidad del baile de cada abeja para su sitio inicial, se reduce cuando el sitio no es el mejor [162]. Ese patrón de disminución del baile es sorprendentemente lineal. Esta linealidad sugiere, que el patrón surge de un proceso interno, neurofisiológico, que automáticamente conduce a la disminución de las danzas durante las visitas repetidas al sitio. Las abejas bailando, en el contexto de búsqueda de alimentos (néctares), no muestran una disminución en el baile al repetirse las visitas a una fuente de alimentos. También, las abejas exploradoras ajustan sus tasas de abandono en relación a la calidad del sitio. Esto se ve, porque en promedio las exploradoras que consiguen el nido elegido comienzan

⁶² Se sabe que el 6% de las exploradoras mueren en el transcurso del proceso de toma de decisión [160, 162, 163, 164, 165].

a bailar más fuerte, y duran más tiempo publicando (bailando) sus sitios, que las exploradoras de un sitio no elegido. En consecuencia, las exploradoras que consiguen el mejor sitio tendrá una más alta tasa de reclutamiento (r_j) y menor tasa de abandono (a_j) (lo abandonan más lentamente). Eso es suficiente para explicar, cómo un consenso entre las abejas es producido.

Ahora bien, hemos visto que puede ocurrir que una exploradora cambie su compromiso de un sitio de inferior calidad a uno de superior calidad. Una exploradora en esta situación, podría contribuir al proceso de toma de decisiones, por la inhibición de danzas que reclutan a su antiguo sitio de inferior calidad (esto aun no se ha podido constatar, y es un tema de investigaciones, serian señales de parada dirigidas a bailarinas que publicitan sitios de inferior calidad).

Otra explicación de la hipótesis 1 viene dada por la mortalidad de las abejas exploradoras [162]. Si la tasa de mortalidad de las bailarinas de los sitios no elegidos es superior a su tasa de natalidad, entonces ese grupo de bailarinas desaparece en el tiempo [160, 165]. Sin embargo, normalmente, la tasa de mortalidad de las abejas exploradoras es baja. Esto implica que los bailes en los sitios no-elegidos se desvanecen porque las abejas deciden dejar de bailar por completo, o cambian a danzar para el sitio elegido. Vemos así, que los patrones de comportamiento en las abejas exploradoras son:

- Existe una alta tasa de deserción entre las bailarinas, y
- Algunas abejas cambian su lealtad de un sitio a otro

Por otro lado, mientras que las exploradoras están ocupadas en la elección de un adecuado sitio, el otro 95% de las abejas permanece en reposo para conservar la energía del enjambre. Ahora bien, el despegue del enjambre, es un deslumbrante ejemplo de coordinación del grupo. Todas las abejas del enjambre forman una nube, y comienzan a moverse, con las exploradoras de alguna manera orientando a todas las otras a su nueva morada. Ese despegue es coordinado por un grupo de mecanismos. Uno de ellos, es una señal que ayuda a activar las abejas en reposo en un enjambre, conocida como *señal de agitación*. Sin embargo, debido a que dicha señal de agitación se produce justo antes del despegue, parece que dicha señal de agitación no es la señal que informa

a las abejas en un enjambre, que es tiempo de calentamiento para su despegue. *La señal principal del calentamiento* es una señal de zumbido de sus alas, que las exploradoras utilizan para estimular a sus compañeras del enjambre para calentarse, y se produce durante la última hora antes de la salida.

Algo interesante es que el despegue ocurre solo cuando hay un consenso entre las bailarinas, y ese consenso se alcanza, porque existe un fuerte proceso de retroalimentación positiva, derivado por la danza vigorosa para el sitio elegido, que atrae a más y más a bailar para ese sitio. El tamaño de quórum ha sido puesto a punto por la selección natural, para ser lo suficientemente alto, de manera de asegurarse, que un consenso en la danza de las exploradoras es producido para un sitio bueno, poco después de llegar al quórum para ese sitio.

Para finalizar, no olvidemos que la información utilizada en la toma de decisiones es incompleta (al menos al principio), a veces inexacta, y constantemente cambiante. Tal desorden de información hace que sea difícil aplicar el clásico enfoque de toma de decisiones: (i) Determinar las alternativas, (ii) evaluar esas opciones y (iii) elegir la que dé un valor más alto. Una de las razones del éxito de los enjambres, entre otras, tiene que ver con el uso de decenas, si no de cientos, de abejas exploradoras, que de forma independiente, amplía y en paralelo, exploran en busca de nidos potenciales. Estas exploradoras traen de vuelta al enjambre información heterogénea: conocimiento de sitios excelentes, mediocres, y malos - que lo comparten con las otras exploradoras por medio de danzas. Así, el enjambre se aprovecha de su naturaleza colectiva, para ensamblar con bastante rapidez, a menudo, en unas pocas horas (ver figura 4.17), un gran conjunto de alternativas. Cuanto mayor sea este conjunto, es más probable conseguir un sitio excelente (no se tienen estudios al respecto, ni de cómo determinar el número ideal de exploradoras).

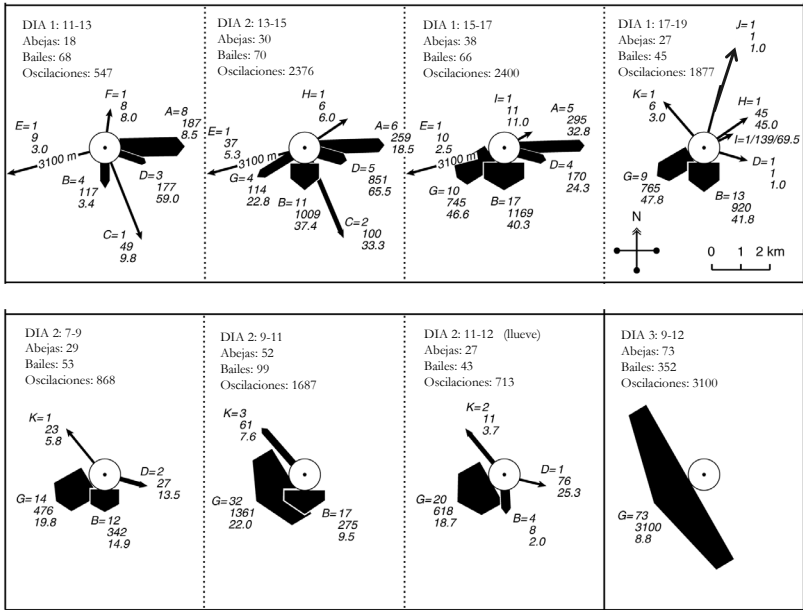


Figura 4.17. Historia de toma de decisiones en un enjambre, desde el momento en que el primer sitio potencial fue anunciado al enjambre (Día 1: 11 horas), hasta cuando tomaron la decisión de su nueva casa (Día 3: 12). El círculo representa la ubicación del enjambre; cada flecha que apunta hacia fuera indica la distancia y la dirección de un sitio dado; la anchura de cada flecha indica el número de abejas que bailó para ese sitio en ese período de tiempo. El conjunto de números en cada flecha indican tres cosas: el número superior las abejas que bailan para el sitio, el del medio las oscilaciones realizadas para el sitio, y el de abajo el promedio de oscilaciones por danza para el sitio. Los números después de las palabras “abejas”, “baile”, y “oscilaciones”, indican el número total de cada uno de ellos, para ese período de tiempo (tomado de [162]).

En conclusión, hemos visto como las exploradoras, que resuelven el problema de encontrar la mejor alternativa, lo realizan a través de un proceso de competencia amistosa, entre coaliciones de exploradoras de diferentes sitios, que compiten por atraer exploradoras no comprometidas. Los miembros de cada coalición atraen a más miembros, mediante la realización de bailes que se clasifican en relación con la calidad del sitio, de manera que cuanto mayor sea la calidad del sitio, más fuerte es la danza y mayor el flujo de los recién llegados a la misma. Por otra parte, al parecer,

endógicamente es programado el abandono de los sitios, lo que ayuda a agudizar las diferencias en el reclutamiento.

Estas consideraciones, ilustran cómo las abejas contienen valiosas lecciones sobre el proceso de toma de decisiones en grupos. No hay necesidad de que un individuo posea una visión global de las alternativas, ni mecanismos para llevar la cuenta y comparar los “votos”. La “inteligencia” de un enjambre se deriva de una combinación de muchos individuos, que trabajan en paralelo (cada uno realiza evaluaciones sofisticadas, de propiedades de los nidos in situ), y de un proceso de reclutamiento, modulado por la calidad de esas evaluaciones, y amplificado por una tasa de deterioro (abandono) específica. Eso conduce a un enjambre, a una precisa, rápida y unificada decisión.

Uno de los beneficios del comportamiento por refinamiento de sus bailes, en las abejas exploradoras, según la calidad del sitio, es que asegura la acumulación lenta de exploradoras en los sitios que son mediocres [163]. Este patrón de reclutamiento lento en un sitio mediocre, es altamente deseable (permite la adaptabilidad). En primer lugar, permite a un enjambre mantener su conexión a un sitio mediocre, que será ventajoso si ese sitio resulta ser el mejor disponible. En segundo lugar, el reclutamiento lento a un sitio mediocre, ayuda a un enjambre a evitar tomar decisiones demasiado rápido, lo que será ventajoso si un buen sitio es finalmente localizado. Así, las abejas continúan la búsqueda por un mejor sitio, sin perder el contacto con los sitios moderadamente deseables ya encontrados. Ahora bien, afinar los bailes para informar la calidad del sitio, no se limita a las abejas exploradoras, también las abejas dedicadas a búsqueda de néctares, ajustan la duración en relación a la rentabilidad de las fuentes de néctares (ese caso lo estudiaremos más adelante).

Tal vez, la pregunta fundamental sobre los mecanismos de toma de decisiones de un enjambre, es si en la construcción de un consenso entre las abejas, el baile es la esencia del proceso de toma de decisiones. Como dijimos antes, en general, la toma de decisiones es un proceso mediante el cual se elige un curso de acción a partir de un número de alternativas. Este proceso implica la generación de un conjunto de alternativas, evaluarlas, y seleccionar una de ellas. En la literatura se presentan muchas maneras para evaluar y elegir entre varias alternativas (algunas individualmente, otras en grupo):

- Una de ellas es evaluar las alternativas de forma secuencial, y elegir la primera que excede un umbral de aceptación.
- Otra es utilizar una estrategia de eliminación por aspectos (determinar el atributo más importante, establecer un umbral de aceptación para él, evaluar cada alternativa para ese atributo, y rechazar todas las alternativas que caen por debajo del umbral de aceptación para ese atributo, repetir con las alternativas que restan el proceso, pero ahora con el segundo más importante atributo, y así sucesivamente).
- Otra es utilizar una estrategia de adición ponderada (evaluar cada alternativa considerando los atributos relevantes, con un peso para cada atributo de acuerdo a su importancia; esa evaluación consiste en la suma ponderada de los atributos para cada alternativa, y elegir la alternativa cuya valoración total es más alta).

De las diversas estrategias de toma de decisiones, la estrategia de adición ponderada es la más exacta, pero es también la más exigente, ya que requiere un procesamiento de toda la información pertinente a un problema. Esta es precisamente la forma de toma de decisiones que usa un enjambre de abejas. Un enjambre evalúa cada alternativa con respecto a por lo menos seis atributos distintos (volumen de la cavidad, altura de la entrada, zona de entrada, dirección de la entrada, posición de la entrada en relación con la cavidad, y presencia de panales de una colonia anterior). Para ello, hemos visto que las abejas exploradoras realizan danzas típicas que caracterizan sus evaluaciones de cada uno de los sitios de anidación posibles, por lo tanto, la labor de evaluación de los sitios alternativos se reparten entre las abejas exploradoras. Además, hemos visto que no hay una abeja que recoge todas las evaluaciones y selecciona el mejor sitio. En cambio, es un proceso de competencia amistosa entre las abejas exploradoras, lo que identifica el mejor sitio. El proceso cognitivo de cada abeja exploradora es evidentemente muy pequeño, en relación con el tratamiento de información realizada por el enjambre entero. Ahora bien, el enjambre de abejas es capaz de utilizar la estrategia de adición ponderada de toma de decisiones, distribuyendo entre muchas abejas la tarea de evaluar numerosos sitios potenciales, y la tarea de seleccionar un sitio para su nuevo hogar.

Por otro lado, los métodos aproximados (heurísticos) para resolver problemas de toma de decisiones, generalmente se basan en la reducción de la amplitud de las alternativas (por ejemplo, fijando un umbral de acep-

tación y de finalización de la búsqueda), o de la profundidad de las alternativas (por ejemplo, basando la decisión en una sola propiedad importante, en lugar de una compleja combinación de propiedades), o ambas. La toma de decisiones de los enjambres de abejas es digna de mencionar, porque a pesar de que les falta un completo conocimiento de los sitios de anidación disponibles, hacen selecciones sin reducir ni la amplitud ni la profundidad de las alternativas. Un enjambre normalmente toma sus decisiones únicamente después, de que varios cientos de abejas exploradoras, trabajando juntos, han examinó una docena de sitios alternativos de anidación, y han evaluado cada uno, con respecto a por lo menos seis propiedades diferentes [160, 162, 163, 164, 165]. Sin duda, es esa minuciosa recopilación y procesamiento de información, donde subyace el éxito de los enjambres en la aplicación de sus reglas de decisión.

4.2.2.2 *División del trabajo*

Todas las organizaciones que poseen una división del trabajo, se enfrentan al problema de mantener una asignación adecuada de los distintos trabajos entre los miembros de la organización [161]. Lo ideal sería que para cada tarea, la oferta de mano de obra se mantenga en equilibrio con la demanda laboral. La manera como se resuelve este problema en las colonias de insectos sociales, ha atraído cada vez más la atención de los biólogos e ingenieros en los últimos años [165]. Las colonias de insectos sociales resuelven el problema de asignación de mano de obra, sin una supervisión central. En su lugar, cada insecto social trabajador independiente, adquiere información sobre las necesidades de trabajo de la colonia, y decide sobre la tarea que debe realizar. A menudo, esto da lugar a la conmutación de tareas en un trabajador. Para entender completamente cómo el problema de asignación de mano de obra es resuelto dentro de una colonia de insectos sociales, lo que necesitamos saber es cómo los trabajadores adquieren información sobre las necesidades de trabajo en la colonia. Un excelente ejemplo de lo anterior ocurre en las colonias de abejas, donde uno de esos indicadores parece ser la danza [160, 165].

Algunos autores indican que el éxito ecológico de los insectos sociales se debe, en parte, a las ventajas ergonómicas asociadas a la división del trabajo [165]. Partes de estas ventajas se reflejan en las capacidades de la colonia para asignar grandes números de indivi-

duos a una tarea clave para la colonia, o realizar múltiples tareas simultáneamente, o partir grandes tareas en varias más pequeñas. En general, en la mayoría de especies de insectos sociales avanzadas, los trabajadores muestran un politeísmo temporal⁶³, lo que les permite realizar diferentes conjuntos de tareas en diferentes momentos. Así, la división del trabajo en las colonias de insectos se basa en el polimorfismo, a partir de un politeísmo temporal. También, en ciertas colonias de insecto, los individuos jóvenes suelen trabajar cerca del centro del nido, y los individuos de mediana edad, trabajan en la periferia y fuera del nido. De esta manera, la edad, es otra forma de división del trabajo en las colonias de insectos.

Las colonias responden de forma adaptativa a los cambios en la demografía de la edad, a los cambios durante sus ciclos de vida, a las alteraciones y cambios en la disponibilidad de recursos, entre otras cosas. Esa capacidad de una colonia de insectos de alterar rápidamente su asignación de trabajo, en respuesta a cambios internos o en su entorno, le proporciona un alto nivel de adaptabilidad.

Por otro lado, los trabajadores altamente especializados, ejercen una profunda influencia en la organización de la colonia, en diversas especies de insectos sociales, lo que les permite una mayor eficiencia ergonómica, que se refleja en:

- Las preferencias espaciales, mediante las cuales, los especialistas centran sus actividad en partes de la colmena, donde es probable que encuentren estímulos relacionados con las tareas,
- La ejecución de tareas relativas, que requieren similares estímulos sensoriales y habilidades,
- El aprendizaje, para perfeccionar y mejorar su rendimiento.

⁶³ Es cuando un individuo se especializa en varias labores durante su vida, y permuta en la realización de ellas a medida que envejece. Es un mecanismo de asignación de tareas común en las colonias de insectos. Las tareas se reparten entre los trabajadores, en función de su edad. Trabajadores recién nacidos realizan tareas en el nido, y a medida que envejecen realizan tareas fuera del nido. En las abejas, los trabajadores más jóvenes limpian las celdas, después pasan a ser tareas relacionadas con el cuidado de las crías y el mantenimiento del nido, después pasan a ser tareas de recepción y almacenamiento de alimentos, para después pasar a ser forrajeo. Como vimos antes, muchas especies de hormigas también tienen ese patrón.

La especialización se logra, si un individuo elige una tarea estocásticamente, y luego se mantiene en esa tarea, siempre y cuando el comportamiento es exitoso y los estímulos son apropiados. Resultados de investigaciones sugieren que la retroalimentación positiva es poco probable que cuente en la especialización; por ejemplo, la eliminación de cadáveres se realiza de forma esporádica, y se ve interrumpida por episodios de realización de otras tareas, sin que el estímulo este localmente presente.

En general, en las colonias de insecto, raras tareas pueden ser realizadas por "trabajadores que realizan todos los comportamientos con mucha frecuencia", es más común insectos que tienen niveles (umbrales) normales para realizar las tareas más comunes, y se especializan en ciertas tareas. Eso hace que pasen gran parte de tiempo inactivos, en ausencia de estímulos asociados con sus tareas, y entran en acción sólo cuando señales críticas se presentan. Esto es la base del modelo basado en umbrales de respuesta, que consiste en determinar el nivel de estímulo necesario para realizar una tarea en particular.

Particularmente, la variabilidad del comportamiento de los individuos, es bien conocida en las abejas. Hay variación en las tareas en que se especializan los individuos, según la edad. Por ejemplo, algunas de las tareas realizadas por las abejas de mediana edad son las de almacenar alimentos, las de proteger la entrada del nido, y las de eliminar las abejas muertas del nido [192]. El nivel de actividad de las abejas es similar en los grupos de abejas, según las necesidades de realizar una tarea dada: ni hiperactivos ni en reposo. Esa flexibilidad de comportamiento de las abejas, permite el éxito de la colonia. Por ejemplo, la recolección óptima de cadáveres es un componente del comportamiento higiénico en las colonias de abejas, que sirve para disminuir la probabilidad de propagación de enfermedades. Las abejas tipo pompas fúnebres (que recolectan cadáveres), y las que vigilan, tienen un comportamiento más avanzado, en comparación con las otras abejas. Por ejemplo, las abejas trabajadoras del tipo pompas fúnebres, exponen una distribución espacial dentro de la colmena, para garantizar la eliminación eficiente de los cadáveres. Su especialización les permite varios comportamientos: eliminar y manipular abejas muertas, remover escombros, etc. Otros comportamientos no vinculados a esa tarea los reducen, sin eliminarlos totalmente. Eso es coherente con la idea, de la no especialización extrema, en las abejas. Por otro lado, las que vigilan, difieren de otras abejas de la misma edad, de dos maneras: tienen

preferencia para ubicarse en las secciones inferiores de la colmena, y son de desarrollo avanzado (inician su alimentación a edades más tempranas que las otras abejas).

Otro ejemplo interesante es la manera cómo las abejas dividen el trabajo, entre recolectar y procesar néctar. Es un proceso que se basa en danzas, una forma de comunicación, mediante la cual, una colonia de abejas es capaz de coordinar sus tareas, a pesar de las grandes variaciones en la disponibilidad de néctar [160, 166]. La danza de las abejas, induce a las trabajadoras a cambiar de tareas, en respuesta a estímulos de que no se ha hecho un trabajo, en respuesta a especiales señales de las compañeras de nido, entre otras cosas. En otras palabras, es posible que las trabajadoras puedan ser “empujadas” a cambiar de tareas. El uso de señales para “sacar” a las trabajadoras de una tarea a otra, parece particularmente adecuado, cuando trabajadoras adicionales, se requieren con urgencia, en un lugar diferente de donde se está trabajando actualmente, ya que sin estas señales, las trabajadoras no serían conscientes de que una emergencia ha surgido en otras partes del nido.

Pasemos a describir algunos procesos de especialización de tareas, como parte de la división del trabajo, en las colonias de abejas.

4.2.2.3 Búsqueda de Néctar

En las colonias de abejas, la danza tiene un papel comunicador clave para la organización social [167]. Por ejemplo, la danza es una señal producida por una colonia de recolectoras de néctar, cuando la demanda de recolección de néctar es alta. Esta situación surge, cuando se encuentra abundante néctar en el medio ambiente, en ese caso, la colonia se moviliza para explotar la nueva fuente abundante de alimentos. Ahora bien, puede suceder que la tasa de recolección de néctar (realizada por las abejas recolectoras) supere la tasa de procesamiento de néctar (realizado por las abejas receptoras), cuando esto sucede, se experimentan largas demoras para descargar el néctar. Eso implica la necesidad de un proceso de auto-regulación en la colonia.

En general, cada danza de las abejas, normalmente dura alrededor de media hora. Las abejas recolectoras de néctar, inician esas danzas, después de cada viaje. Ahora, existe una fuerte correlación entre las necesidades

de las receptoras de néctar y la producción de bailes. Esta señal indica la escasez, o no, de abejas receptoras de néctar, y estimula adicionales abejas para funcionar como receptoras. Esto muestra que una colonia de abeja, puede modificar rápidamente su asignación de mano de obra, para adaptarse a los cambios ambientales. Así, la danza activa a receptoras adicionales de néctar. En general, las danzas se caracterizan por [160, 167]:

- *Se producen a lo largo de la colmena, no sólo en la zona de descarga.* Esta distribución espacial parece muy apropiada, como señal para activar adicionales abejas receptoras, ya que de esta manera, permite estimular a abejas fuera de la zona de descarga, para moverse a la zona de descarga y comenzar a trabajar allí.
- *Se producen en un contexto, donde una señal de comunicación especializada es necesaria.* De todas las abejas en una colonia, sólo las dedicadas a recibir o recoger néctar, saben automáticamente cuando la recolección de néctar supera la capacidad de recepción de néctar, por lo tanto, cuando hay necesidad de más abejas receptoras. Las receptoras y recolectoras de néctar, son informadas de esta necesidad a través de señales especiales, detectables en el curso de sus trabajos. Por el contrario, los miembros de una colonia que no participan en el manejo de néctar, no saben cuándo su colonia necesita más abejas receptoras, por su incapacidad para detectar esas señales, en el curso de sus trabajos. Esas señales de comunicación especial son las danzas, las cuales anuncian esa necesidad.
- *Las producen las abejas recolectoras de néctar, no las receptoras de néctar.* Esto tiene sentido en términos del funcionamiento de la colonia, porque a pesar de que ambas recolectoras-receptoras saben cuando se requieren más receptoras, es en el suministro (tarea de las abejas recolectoras de néctar) cuando la alarma debe sonar, por lo que deben ser estas abejas quienes dejen temporalmente su misión, para hacer sonar la alarma (es decir, producir los bailes).

La danza también tiene un papel inhibitorio, además del de excitación que acabamos de discutir. Ella permite detener el reclutamiento de abejas recolectoras, en una colonia de abejas. Así pues, la danza ayuda a una colonia a restaurar un equilibrio entre el néctar recogido y el procesado, no sólo mediante la estimulación del incremento en la tasa de procesamiento, sino también mediante la inhibición del aumento en la tasa de recogida.

Por otro lado, una colonia aumenta el número de abejas dedicadas a una tarea concreta, a través del reclutamiento de trabajadoras para esa tarea, pero también, reduciendo el abandono de trabajadoras que hacen esa tarea. La tasa neta de cambio en el tamaño del grupo que hace una tarea dada, en principio, es determinada, conjuntamente, por las tasas a las que las abejas ingresan o dejan el grupo. El ajuste del tamaño de los grupos de abejas asignados a las diferentes tareas, forma parte del mecanismo adaptativo de la colonia. Un modelo de reclutamiento auto-catalítico, que describe el ajuste dinámico de los grupos de abejas, que salen fuera del nido para hacer algunas de las tareas que requiere la colonia (buscar alimentos, buscar nuevos sitios para hacer su nido), es descrito por las expresiones siguientes [25]:

$$\frac{dX_1}{dt} = a_1 X_1 f_1 (N - X - E) - b X_1 + c E \quad (4.61)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = a_2 X_2 f_2 (N - X - E) - b X_2 + c E \quad (4.62)$$

$$\frac{dE}{dt} = \left[\frac{a_1 + a_2}{2} \right] [X_1(1 - f_1) + X_2(1 - f_2)](N - X - E) - pE - 2cE \quad (4.63)$$

Donde, N es el número de trabajadoras en la colonia, E la fracción de trabajadoras que pierden las pistas que conllevan a hacer algunas de las tareas, y por consiguiente, se mantiene explorando, X_i el número de trabajadoras asociadas a la tarea i ($X = \sum_i X_i$), a_i la tasa de reclutamiento de la tarea i , f_i es la fracción de trabajadoras que realmente logran realizar la tarea i , $1/p$ es el número de trabajadoras perdidas que regresan al nido, $1/c$ es el número de trabajadoras perdidas que logran de nuevo descubrir la pista para realizar alguna de las tareas, y $1/b$ es el tiempo promedio que duran las trabajadoras en realizar la tarea antes de volver al nido.

En un reclutamiento masivo basado en pistas (rastros), la fidelidad de reclutamiento aumenta a medida que mas trabajadoras siguen una pista (se refuerza). Esto puede ser representado, haciendo que f_i sea una función creciente del número de trabajadoras X_i ya realizando la tarea.

No está claro de dónde vienen las abejas adicionales (qué estaban haciendo, antes de cambiar de función). Hay dos posibilidades [160, 167]: o estaban activas en otras tareas, o estaban inactivas. Numerosos estudios han demostrado, que en cualquier momento, el 50% o más de las trabajadoras de una colonia de abejas están simplemente caminando, aseándose a sí mismas, o quietas [25]. Parece, por lo tanto, que una colonia de abejas posee muchas abejas desempleadas, que se pueden activar para diversas tareas, cuando sea necesario, por lo que parece enteramente plausible, que muchas de las abejas nuevas trabajadoras, antes se encontraban inactivas.

Otro modelo interesante en las colonias de abejas, tiene que ver con sus habilidades para elegir una fuente de néctar [162]. Explotan a la más rentable, la cual establecen, modulando sus tasas de reclutamiento y abandono de fuentes de néctar, de acuerdo con la rentabilidad de cada fuente. Una recolectora modula su comportamiento, en relación con la rentabilidad del néctar [162]: si la rentabilidad es buena, el ritmo de traída de alimentos y de la intensidad del baile aumentan, lo que conlleva, a que la probabilidad de abandono de la fuente disminuya. Una recolectora evalúa la rentabilidad de su fuente de néctar, sin hacer comparaciones entre los diferentes néctares fuentes, basada en variables como la distancia a la colmena, la abundancia y calidad del néctar, etc. Así, cada recolectora conoce sólo su fuente de néctar, y de forma independiente, calcula la rentabilidad absoluta de su fuente. Esto es un proceso de selección natural entre las diferentes fuentes de néctar, donde las más rentables tienen más posibilidades de “sobrevivir” (seguirse visitando) y “reproducirse” (mas recolectoras reclutadas para esa fuente), que las fuentes menos rentables. Es una forma de toma de decisiones descentralizada.

Como dijimos antes, la mayoría del néctar viene de fuentes rentables, esta explotación selectiva, surge a partir de precisas modulaciones de las tasas de reclutamiento y de abandono en cada fuente de néctar, basada en sus rentabilidades (modulación multidimensional). La figura 4.18 muestra el patrón de explotación selectiva de fuentes de néctar. Cuando a una colonia se le da para seleccionar entre dos fuentes de alimentos con rentabilidades diferentes, de forma consistente, concentra sus esfuerzos de recolección en la más rentable.

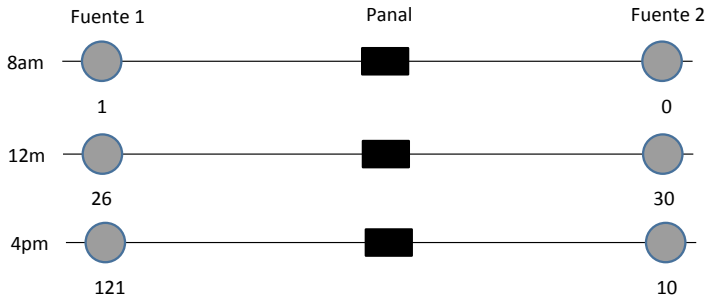


Figura 4.18. Patrón de explotación selectiva de fuentes de néctar. El número debajo de cada fuente, denota el número del grupo de abejas que han visitado a cada fuente de alimentos, media hora antes a la hora que se muestra a la izquierda. Las fuentes se encuentran a 400 metros de la colmena, y son idénticas, excepto por la concentración de azúcar (inspirado en [162]).

Por otro lado, el proceso de ajuste de las tasas de reclutamiento y de abandono, permite modificar el tamaño del grupo dinámicamente (adiciona o sustrae individuos del grupo, respectivamente, ver figura 4.19). Así, las colonias ajustan las tasas de reclutamiento y de abandono para cada fuente de néctar, según su rentabilidad, lo que, a su vez, modula la explotación selectiva de una fuente de néctar superior.

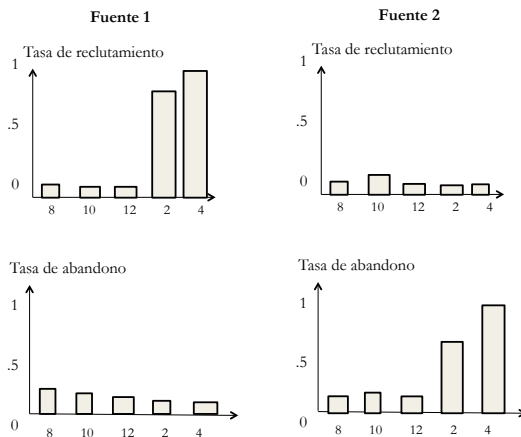


Figura 4.19. Proceso de ajuste de las tasas de reclutamiento y de abandono (basado en [162]).

Basado en lo anterior, en [162] formulan un modelo matemático del proceso de toma de decisiones colectivas, de la selección de las fuentes de néctar, en las colonias de abejas. Supongamos un grupo de recolectoras, que todavía no están comprometidas con ninguna de las fuentes de néctar disponibles. Cada una de ellas localiza una fuente de néctar, siguiendo las danzas de reclutamiento de compañeras que ya se han comprometido. Así, en una región de la colmena, las abejas están bailando para, por ejemplo, dos fuentes de néctar (A y B). Una abeja que sigue una bailarina de una fuente de néctar es reclutada para esa fuente. Va a la fuente, reúne una carga de néctar, y regresa a la colmena. Después de descargar su néctar, tiene tres opciones:

- Abandonar la fuente de néctar, y regresar al grupo de las abejas no comprometidas
- Continuar con su fuente de néctar, y reclutar a otras con su baile, antes de regresar a las flores,
- Volver a las flores directamente, sin tratar de reclutar compañeras.

Como dijimos antes, muchas variables de las fuentes de néctar (incluyendo la dulzura del néctar, su abundancia, su accesibilidad, la distancia a la colmena, etc.) influyen a la hora de decidir por alguna de esas opciones. Las características esenciales de ese proceso biológico, son incorporadas en el modelo matemático de una colonia, para elegir entre dos fuentes de néctar, propuesto en [163]. El modelo supone que en cualquier momento, cada recolectora debe estar en uno de los siete estados que se indican a continuación:

- H_A : descargando néctar de la fuente de néctar A
- H_B : descargando néctar de la fuente de néctar B
- D_A : bailando para la fuente de néctar A
- D_B : bailando para la fuente de néctar B
- A: recolectando desde la fuente de néctar A
- B: recolectando desde la fuente de néctar B
- F: siguiendo una bailarina

La fracción de las abejas que dejan una zona (fuente A, etc.), en un intervalo de tiempo dado Δ , se denota por la tasa constante p_i (por ejemplo, la tasa constante de abejas que dejan la zona A es p_A , y la fracción de abejas que salen de la fuente de néctar A es Δp_A). Además, para simplificar los

cálculos con el modelo, se hacen tres suposiciones: 1) el número total de recolectoras es fijo, 2) todas las abejas comienzan a recolectar al mismo tiempo, y 3) todas las recolectoras pueden ir a cualquiera de las dos fuentes de néctar.

Ahora vamos a considerar los diferentes aspectos, que determinan las probabilidades de los diferentes comportamientos. La primera decisión se produce después que una abeja ha descargado su néctar en la colmena (H_N). En este punto, se puede abandonar la fuente de néctar y volver a la pista de baile para seguir a otra bailarina. La probabilidad que una abeja lo haga se denota por la función f_x , que se llama función de abandono. En general, el valor f_x depende de la rentabilidad de cada fuente de néctar; por lo tanto, f_x^a denota la probabilidad de que una abeja que viene de H_A abandone la fuente de néctar A, y se convierta en una seguidora de abeja (F). El abandono disminuye el número de abejas comprometidas con una fuente de néctar, y proporciona un conjunto de abejas sin compromisos, que pueden seguir bailarinas de otras fuentes.

La segunda decisión es cuando las abejas deciden no abandonar su fuente de néctar. Eso afecta la proporción de abejas que bailarían por esa fuente de néctar. La probabilidad de que una abeja se convierte en una bailarina de su fuente de néctar, se denota con la función f_d , llamada función de baile y, al igual que la función de abandono, su valor depende de la rentabilidad de la fuente de néctar (por ejemplo, f_d^A indica la probabilidad de que una abeja recolectora de la fuente de néctar A, baile para ella).

La tercera decisión se produce cuando las abejas siguen bailarinas de una u otra fuente de néctar. La probabilidad de que una abeja seguidora de bailes, siga el baile para la fuente de néctar A o B, se denota por las funciones f_i^A o f_i^B , respectivamente, las cuales se llaman funciones de seguimiento. Un estudio reciente ha mostrado que las abejas seguidoras, siguen la primera bailarina que encuentran, y que los encuentros se producen al azar. Por lo tanto, en el caso de dos fuentes de néctar, A y B, la probabilidad de encontrar y seguir una bailarina de la fuente de néctar A (f_i^A) en un momento determinado, puede calcularse aproximadamente por $D_A/(D_A + D_B)$.

La función de abandono (f_x), y la función de danza (f_d), incluyen muchas variables como la rentabilidad de la fuente de néctar, la necesidad de néctar de la colonia, y las condiciones del tiempo, por lo tanto es difícil dar una descripción general de estas funciones. Sin embargo, los valores de esas funciones han sido medidos para un conjunto de situaciones reales [161, 162, 163, 164, 165, 166].

Particularmente, las colonias avanzadas de insectos sociales, expresan una clara yuxtaposición de dos niveles de adaptación, la colonia y el organismo (insecto), sin embargo, rara vez es evidente, cómo las propiedades de una colonia surgen de las actividades colectivas de sus constituyentes (insectos). Por ejemplo, las colonias, de forma selectiva, explotan fuentes de alimentos ricas, rápidamente, y pueden cambiar de recolección entre fuentes de alimentos, como consecuencia de variaciones en la calidad de los alimentos. Los patrones de explotación mostrados en las figuras 4.17 y 4.18, permiten vislumbrarlo. Lo complejo es explicar esos patrones de recolección de las colonias, en términos de los comportamientos individuales de las abejas. Afortunadamente, estos dos niveles de descripción están vinculados, por el hecho de que los patrones del nivel de las colonias (número de recolectoras asignadas a cada fuente de alimento), son un resultado directo de dos procesos (reclutamiento y abandono de las fuentes de alimentos), que son bastante fáciles de entender en términos de patrones de comportamiento, a nivel de las abejas (e insectos en general). Los comportamientos que las abejas varían son: la fuerza de las danzas, el ritmo de visitas a las fuentes de alimentos, y la probabilidad de volver a una fuente de alimentos. La relación entre los dos niveles, en el proceso de selección de la fuente de néctar, se da en el proceso de modulación de las tasas de reclutamiento y de abandono de las diferentes fuentes de néctar, de acuerdo con sus niveles de rentabilidad. En términos generales, fuentes de alimentos rentables aumentan la duración de la danza y el ritmo de recolección de alimentos de esa fuente, lo que disminuye la probabilidad de abandono de esa fuente.

Específicamente, cada recolectora ajusta su comportamiento, en función de la rentabilidad de su fuente de néctar o, al ser reclutada por una nueva fuente de néctar, sigue a una bailarina elegida al azar de entre las que bailan. Como se dijo antes, esto puede ser considerado como una especie de selección natural, entre fuentes de néctar alternativas. El resultado neto es que el porcentaje de la población de una colonia, asociado a una fuente de néctar,

automáticamente se incrementa si su rentabilidad es relativamente alta, e, inevitablemente disminuye si su rentabilidad es relativamente baja. Por lo tanto, en el interior de una colmena de abejas, como en el mundo natural en general, el proceso de selección natural genera un orden impresionante, sin recurrir a un decisor de alto nivel (supervisor) para regular ese orden.

Como hemos visto, el control de la conducta de la colonia es descentralizado. De hecho, se distribuye entre todas las recolectoras de la colonia, tal que cada abeja independientemente, ajusta su comportamiento a lo que es apropiado a su propia fuente de alimentación. Sus decisiones hacen que surjan, a nivel de la colonia, automáticamente procesos de reclutamiento y abandono. Pero la omisión de una autoridad central genera conflictos, por las acciones de sus miembros, que responden a sus distintas situaciones locales, no globales. En todo caso, las respuestas a situaciones globales, como el ataque de un depredador, requieren equilibrar dos aspectos: el tiempo para producir efectos de retroalimentación negativa para regular el número de individuos en una actividad, y aprovechar la distribución del control en el grupo, que elimina la necesidad del tiempo de comunicación entre los individuos sensores y los que toman decisiones. La distribución del control puede hacer al grupo menos propenso a daños.

Algunos autores indican que la razón principal del control descentralizado, es que es un medio para que la sociedad logre un alto grado de organización, sin avanzados sistemas de comunicación y dispositivos de cómputo [161]. Si las grandes colonias de insectos tuvieran una autoridad central, cada colonia tendría que poseer una red de comunicación elaborada, para que la información pueda fluir adecuadamente en toda la colonia hacia los planificadores, y para que las órdenes de los planificadores centrales puedan transmitirse a los miembros apropiados de la colonia. Igualmente, el organismo central de planificación tendría que poseer un mecanismo de procesamiento de la información muy sofisticado, para realizar los cálculos necesarios para integrar la información de toda la colonia, y producir las órdenes que den lugar a una asignación racional de los recursos de la colonia. Ambos dispositivos complejos de coordinación social se evitan en las colonias, con control descentralizado, en donde los individuos toman relativamente simples decisiones, utilizando la información que tienen directamente a la mano. La sociedad de abejas pone de manifiesto la eficacia de lo anterior.

Volviendo al tema de búsqueda de alimentos en las colonias de abejas, el papel de las recolectoras es recoger el néctar y llevarlo al nido, donde se las dan a las abejas receptoras, que luego lo almacenan en las celdas [14, 130]. Como hemos dicho, las colonias de abejas utilizan un complejo sistema de señales y otros mecanismos de retroalimentación, para coordinar la capacidad total de trabajo de los dos grupos de trabajadoras involucrados (recolectoras y receptoras). Los mecanismos específicos son el baile de coleteo, el baile temblando, la señal de parada, la señal de agitación y la señal de abandono. La danza temblando se ajusta a la información, esto no es cierto en la danza de coleteo. Las danzas son los mecanismos de regulación primaria, y las señales de parada y de agitación son mecanismos secundarios. Todas ellas permiten la aparición de un proceso de adaptación a nivel del grupo. El factor clave es que los individuos funcionan como una unidad de adaptación, con transferencia de información entre los individuos en forma de señales. Esas señales permiten regular las actividades y subactividades en la colonia. Por ejemplo, regulan el número de trabajadoras involucradas en el proceso de recolección de néctar, que implica tanto la recogida (lo hacen las recolectoras) como el almacenamiento en las celdas (lo hacen las receptoras). Las abejas tienen sofisticados mecanismos para regular el número de trabajadoras en esos dos grupos, tanto para reclutar más trabajadoras para explotar la fuente, como para equilibrar la relación recolectoras vs receptoras. Cuando la relación óptima entre esos grupos no existe, la colonia lo detecta, porque la velocidad de transformación de néctar es menor de lo que podría ser.

Volviendo a las señales usadas como mecanismos específicos de regulación del trabajo por las colonias de abejas, sus detalles son [14, 130]:

- *La danza de coleteo (meneo)*: Es probablemente la más conocida señal de las abejas. Se trata de una señal enviada por recolectoras de néctar, y está dirigido a abejas desempleadas, y, posiblemente, trabajadoras que participan en otras tareas (figura 4.20). Estas danzas también se utilizan para transmitir información sobre la ubicación del agua, del polen y de sitios potenciales para hacer nidos. Un componente de la danza es la dirección del coleteo, que le dice a las seguidoras del baile la dirección de la fuente de alimentos. Un segundo componente es la duración, que indica la distancia. Su mensaje es: “He encontrado una buena fuente de alimentos digno de una mayor explotación. Está ubicada en la dirección X, a la distancia Y”, mientras que su signi-

ficado es: “ayúdame a explotar ese néctar”. Por lo tanto, ejerce una retroalimentación positiva sobre el número de recolectoras activas (figura 4.21).

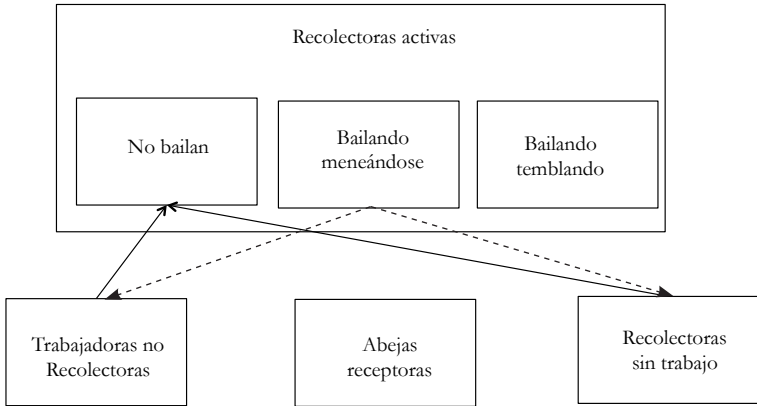


Figura 4.20. Flujo de Información para la danza por meneo. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]).

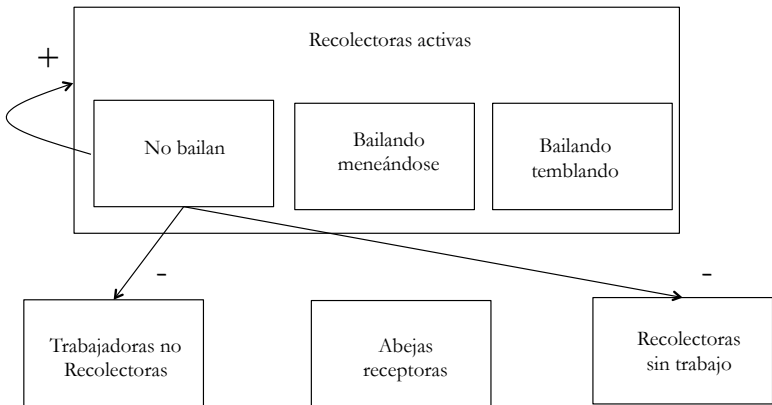


Figura 4.21. Retroalimentación en la danza por meneo, para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]).

- *La danza temblando*: Igual que la anterior, es una danza que se hace al regresar a la colmena. En contraste con la otra danza, esta señal es enviada por una abeja que experimenta un largo tiempo para depo-

sitar su carga, normalmente de más de 50 segundos. Su mensaje es (ver figura 4.22): “He visitado una rica fuente de néctar, digna de una mayor explotación, pero ya tenemos más néctar de lo que podemos manejar”. Ese mensaje tiene múltiples significados. Para las trabajadoras en el nido, su significado es: “debo cambiar a la tarea de procesamiento de néctar” (retroalimentación positiva, ver figura 4.23). Para las dedicadas a ser forraje en búsqueda de néctar, su significado es otro: “Me abstendré de reclutar abejas adicionales para mi fuente de néctar”. También, esta danza reduce la duración de la danza de coleteo, o en algunos casos, hace que bailarinas de esa danza de coleteo dejen de bailar de inmediato (con su efecto de reducción del reclutamiento que esa danza genera). Por lo tanto, esta danza puede tener un efecto negativo, o al menos no positivo, en el forraje, ya que reduce el reclutamiento de abejas recolectoras; pero tiene un efecto positivo sobre el número de receptoras, el reclutamiento de más trabajadoras para recibir el néctar [14].

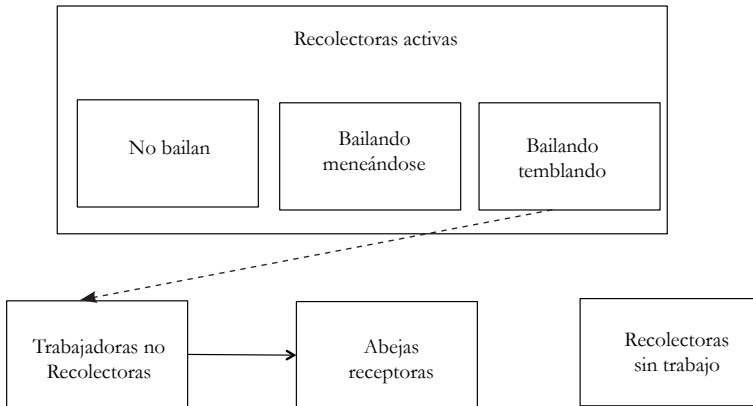


Figura 4.22. Flujo de Información para la danza temblando. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]).

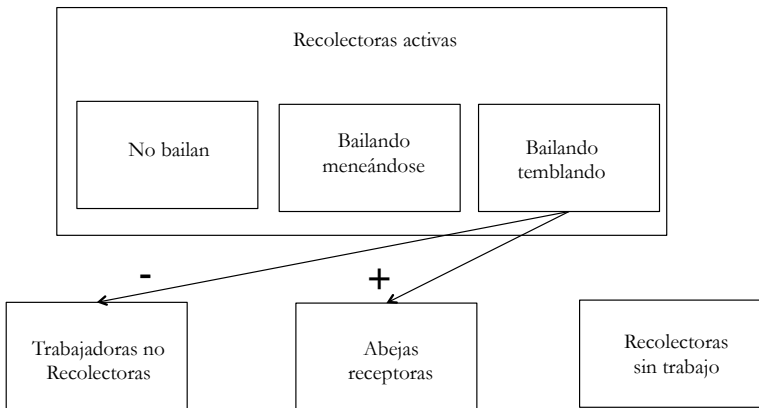


Figura 4.23. Retroalimentación en la danza temblando para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]).

- *Señal de parada:* comprende el emisor, que emite un sonido audible, “uno a uno”, a un receptor. El remitente físicamente impacta a un solo destinatario. Después de recibir esa orden, los destinatarios tienden a arrastrarse a la zona de baile, o hacia la entrada, donde son más propensos a entrar en contacto con otras señales (por ejemplos, las danzas), y por lo tanto, puede ser reclutadas por ellas.
- *Señal de agitación:* se utiliza en combinación con el baile de coleteo, para aumentar el número de recolectoras activas (figuras 4.24, 4.25), cuando la disponibilidad de néctar empieza a aumentar, después de una escasez de néctar importante en la colmena y, por lo tanto, se requieren recolectoras adicionales. El mensaje de la señal de agitación es: “prepararse para una mayor actividad”.

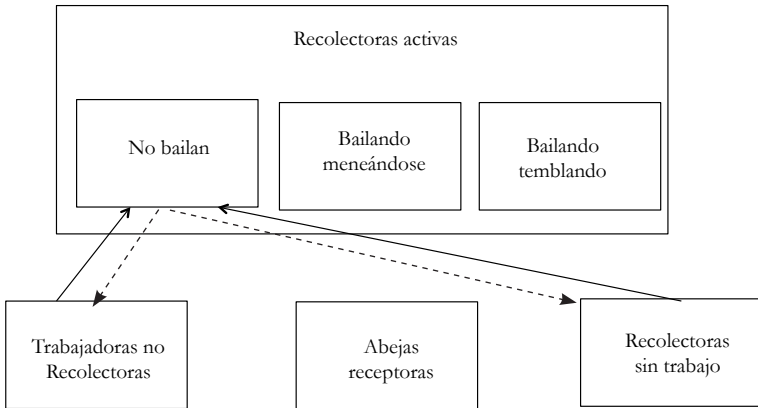


Figura 4.24. Flujo de Información por la señal de agitación. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]).

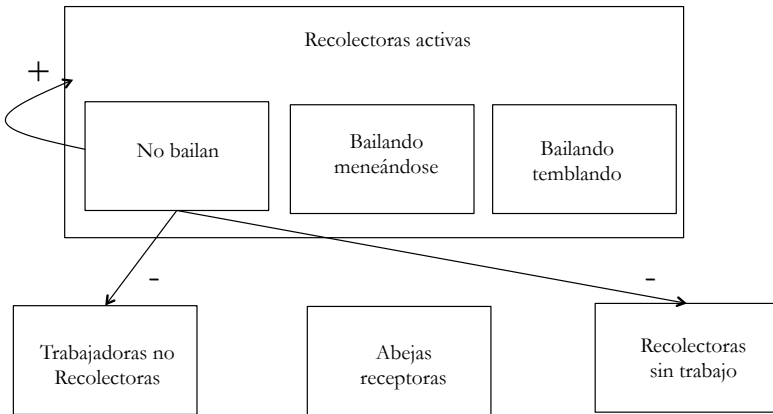


Figura 4.25. Retroalimentación en la señal de agitación para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibidor) (tomado de [130]).

- *Mecanismo de Abandono:* Aunque no es una señal, el abandono de una fuente por el forraje, es un importante mecanismo de información. Como cada forraje es independiente, un mecanismo local les permite tomar sus propias decisiones de abandonar una fuente. Al hacerlo, están disponibles para ser reclutados por otras fuentes (ver figuras 4.26 y 4.27).

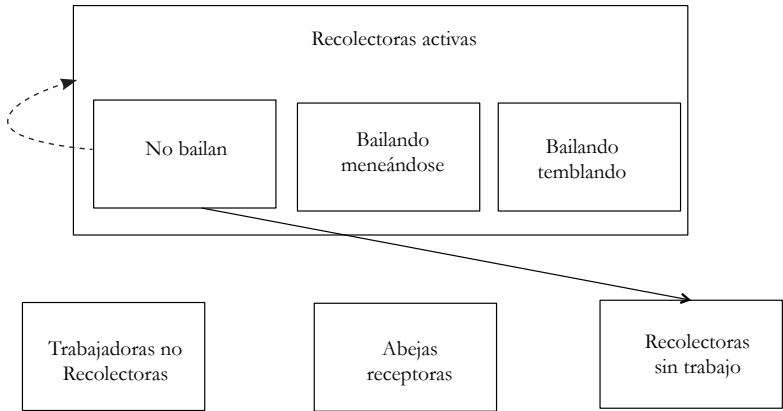


Figura 4.26. Flujo de Información por el mecanismo de abandono. Flujo de información del remitente al destinatario (flechas discontinuas), y trabajadoras que responden a las señales (flechas sólidas) (tomado de [14]).

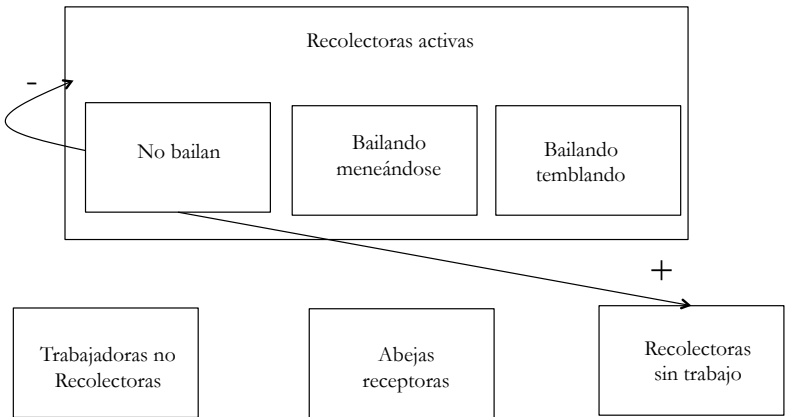


Figura 4.27. Retroalimentación en el mecanismo de abandono para la asignación de tareas (+ excitador, y - inhibitor) (tomado de [130]).

La relación entre los diferentes tipos de bailes que realiza una abeja es revelador [103]. La tasa de consumo de la colonia, y el tiempo de búsqueda (inicial) de una recolectora (el tiempo que necesita para encontrar un néctar), se correlacionan positivamente con la probabilidad de la danza para buscar alimentos. También, como ya hemos dicho, los bailes influyen en la necesidad de una colonia, y posterior ajuste, de su capacidad de procesamiento del néctar, por lo tanto tienen una función comunicacional

(sirve para reclutar abejas para la tarea de procesar néctar). Por otro lado, las danzas para reclutar recolectoras pueden ser inhibidas por un sistema de retroalimentación negativa, cuando la capacidad de procesamiento de néctar de la colonia es baja. De esta manera, hay efectos diferentes de las danzas sobre los distintos tipos de abejas, las procesadoras de alimentos y las que buscan alimentos. Las causas de las danzas, según Seeley [160, 161, 162, 163, 1664, 165, 166, 167, 168, 169], son el resultado de desequilibrios entre diferentes tasas: de consumo de néctar, de capacidad de procesamiento de la colonia, de tiempo de búsqueda de alimentos, entre otras. Ellas son usadas para calcular una suerte de probabilidad de bailar cada tipo de danza. De esta manera, las danzas son un sofisticado sistema de regulación de las actividades de la colonia.

En particular, los dos bailes se conjugan para controlar las tareas que debe realizar la colonia: recolectar néctar, almacenar miel y polen, etc. Las danzas permiten organizar los diferentes grupos de trabajo para evitar retrasos en sus tareas⁶⁴. Las danzas se comportan como mecanismos de retroalimentación positiva o negativa para los grupos (por ejemplo, la danza de coleteo permite reclutar mas recolectoras desempleadas para explotar una fuente de néctar-retroalimentación positiva, o la danza temblando permite reclutar más receptoras para procesar néctar-retroalimentación positiva, o inhibe reclutar mas recolectoras-retroalimentación negativa).

Por otro lado, las abejas necesitan una señal de parada, debido a las fluctuaciones en la disponibilidad de néctar y la capacidad de trabajo de los diferentes grupos (de forrajes, receptoras), a menudo siendo unos superiores a la de los otros. Para corregir ese desequilibrio, se esperaría que un solo tipo de trabajadora sea reclutada a la vez. Es decir, las abejas en un colonia, o realizan danzas temblando (para reclutar receptoras) o bailes de coleteo (para reclutar recolectoras), pero no ambos bailes. Sin embargo, en la realidad, las dos danzas pueden ocurrir juntas. Una razón son los desfases que se producen entre la adquisición de la información y el baile, tal que la información se convierte en obsoleta. Una segunda razón es la falta de fiabilidad inherente a las señales, los retrasos, etc. Como era de esperarse, hay un mecanismo de regulación, la señal de parada, que inhibe directamente el reclutamiento de recolectoras (es una señal de retroalimentación negativa sobre el reclutamiento de recolectoras).

⁶⁴ Los retrasos son indicadores de la capacidad de trabajo de los grupos.

En cuanto a la señal de agitación (por danza de coleteo), que se emite cuando aumenta la disponibilidad del néctar después de un período de forrajeo de baja actividad, se da, porque es una situación en la que la mayoría de recolectoras estaban inactivas. Claramente, en esa situación, la colonia está interesada en reclutar más rápidamente para explotar ese nuevo recurso, antes de que las condiciones se deterioren. Sin embargo, como no hay muchas abejas de forrajeo para emitir esa señal, el reclutamiento a través del baile por coleteo será lento, lo que lleva a la necesidad de una señal adicional para complementar el reclutamiento de recolectoras: la señal de agitación. Así, una abeja en sus próximos viajes, emite una mezcla de ambas señales (de agitación y danza de coleteo), y luego, en los viajes posteriores, tiende solo a hacer la danza de coleteo. Así, la señal de agitación proporciona específica información sobre la necesidad de forraje.

Como hemos visto, al menos cuatro señales usan las abejas: la danza de coleteo, la danza temblando, la señal de parada y la señal de agitación. Las danzas de coleteo y temblando usan un mecanismo de comunicación por difusión (de uno a muchos), mientras que la señal de parada y de agitación son claramente “uno a uno”. Los dos bailes se desarrollan con algo de falta de fiabilidad, por diferentes razones: el retraso experimentado por el proceso de toma de decisión de si o no bailar, la posibilidad que los dos bailes estén ocurriendo simultáneamente, etc. Las señales de parada y de agitación son más fiables, ya que se basan en información precisa⁶⁵.

Finalmente, como dijimos antes, algo interesante es que son las recolectoras quienes reclutan nuevas receptoras, y no ellas mismas quienes reclutan receptoras adicionales. La razón es que las recolectoras tienen información esencial adicional, que no está a disposición de las receptoras tales como la ubicación del néctar, la velocidad a la que se puede recoger, etc. Así que, esa tarea de reclutar es dada en la colonia, a quien maneja la información necesaria para una mejor toma de decisión.

⁶⁵ Por ejemplo, la señal de agitación de las recolectoras se da durante el cambio de las condiciones en la colonia, algo que pueden detectar desde sus propias experiencias.

4.2.2.4 Comportamiento Defensivo

El comportamiento defensivo de las abejas es bien interesante, siguen un modelo defensivo basado en un mecanismo de auto-organización, con las características siguientes [122]:

- Capacidad de la colonia para localizar y centrar su ataque,
- Capacidad de la colonia para caracterizar la intensidad del ataque.

En general, casi no hay estudios que traten de explicar el patrón colectivo (a nivel de la colonia) de los mecanismos defensivos, ante ataques y las dinámicas que los rigen. Sin embargo, los pocos estudios han demostrado la importancia de los mecanismos basados en la auto-organización. La respuesta colectiva de defensa de las abejas, es un ejemplo de un proceso de reclutamiento (amplificación) en los insectos sociales. Un modelo que da cuenta de ello es el siguiente [122]. En cada paso de tiempo, una abeja tiene una probabilidad (P_i) de picar uno de los objetivos (blancos). Si B es el número de abejas que están vivas, capaces de picar, el número de picaduras por segundo que se producen en cada objetivo es $B \cdot P_i$. Debido a que cada vez que una abeja pica pierde su aguijón, el número total de abejas capaces de picar disminuye cada segundo por la cantidad de $B(P_1 + P_2)$ ⁶⁶ si se suponen 2 blancos. Para el cálculo de la probabilidad (P_i), se consideran las características del destino (color, movimiento, etc.) y el número total de picaduras previas (N_i) en el objetivo. Una expresión de P_i , propuesto en [122], es:

$$P_i = \frac{\gamma_i(a + bN_i^2)}{a + N_i^2} \quad \forall i = 1, 2 \quad (4.64)$$

Donde, γ_i es la probabilidad de estar dentro del alcance sensorial del blanco i , y a , a' y b son constantes. Las abejas seleccionan aleatoriamente un objetivo, tal que $\gamma_i < 0.5$. P_i es una función de umbral de respuesta, que toma en cuenta el aumento de la probabilidad de picar, cuando aumenta N ($N = N_1 + N_2$). La ecuación 4.64 puede ser modificada, para tener en cuenta el potencial de saturación del objetivo. Un enfoque biológico es sustituir N_i por $F_i = \frac{N_i}{[1 + N_i/\delta]}$, donde, δ puede consi-

⁶⁶ Suponiendo dos objetivos.

derarse como una medida de la aglomeración o saturación del blanco, y F_i es una función que expresa el efecto de saturación. Cuando δ es muy grande, $F_i = N_i$. Es fácil mostrar con este modelo, que las abejas centran rápidamente sus ataques en un objetivo, salvo cuando el número total de picaduras es muy pequeña (es el caso de una amplificación débil), o muy grande (caso en el que un efecto de saturación se produce).

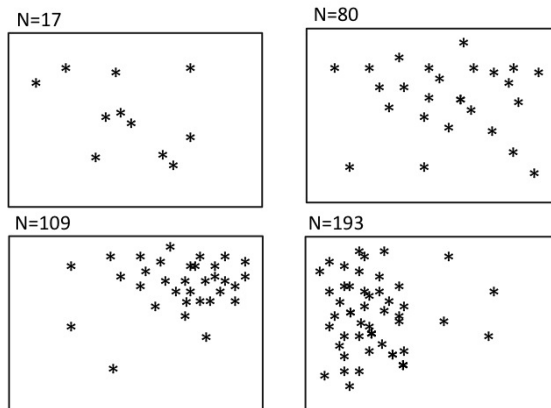


Figura 4.28. Distribución de las picaduras en un blanco, para diferentes valores de N

La figura 4.28 muestra la distribución de las picaduras, para diferentes números de picaduras (N) Inicialmente, las picaduras se hacen más o menos aleatoriamente. Después, cuando una picadura ocurre, la zona alrededor de ella adquiere una mayor probabilidad de ser atacada. Así, la distribución de las picaduras llega a ser de agregación. La distribución de las picaduras es al azar y homogénea, para valores pequeños de N , pero un patrón heterogéneo se desarrolla, cuando N es grande.

Ahora, en general, como hemos dicho, en la defensa, una colonia de abejas, inicialmente enfrenta a un intruso, concentrando sus fuerzas y centrando sus ataques defensivos. Si el intruso no es repelido, aumentan el número de picaduras. Por otro lado, en condiciones naturales, el color, la textura y los olores de las diferentes partes de un intruso, tienen efectos diferentes atractivos, para modular la respuesta defensiva de la colonia.

De esa manera, el sistema defensivo de las abejas, es capaz de amplificar, aparentemente triviales variaciones en las condiciones iniciales con que se presenta un ataque, y usa esa variabilidad para modular la intensidad defensiva de la colonia. Este efecto es una característica adaptativa de la colonia. Las propiedades de la respuesta defensiva aparecen en un nivel colectivo, y no pueden ser apreciadas, estudiando solamente las características de los individuos. La respuesta colectiva de la colonia, es una propiedad emergente, de la dinámica no lineal de las interacciones en la colonia. A través de sus mecanismos auto-organizados, la colonia puede alcanzar las propiedades de plasticidad y diversidad, en sus respuestas adaptativas, sin la necesidad explícita de codificar toda la información (número total de picaduras en el ataque, distancia al intruso, tiempo de respuesta a los ataques, etc.), para construir sus respuestas colectivas. El proceso auto-organizado, implícitamente asocia todas las características de las respuestas colectivas, aunque a primera vista, pudiesen parecer independientes (por ejemplo, la intensidad del ataque y la capacidad de centrarse en un objetivo).

4.2.2.5 Construcción de Panales (Colmenas)

Otro aspecto interesante de estudiar en las colonias de abejas, es el patrón característico de sus panales, que determinan zonas para las crías, el polen y la miel (tres regiones concéntricas distintas: el área central para las crías, después le sigue una zona para el polen, y una gran región periférica para la miel) [32]. Ese patrón es consistente, bien organizado y adaptativo, sin embargo, el mecanismo de formación no está claro. Dos hipótesis se han hecho, para intentar explicar ese proceso [32]: Una primera, supone la existencia de plantillas, que determinan lugares específicos para los huevos, el polen y la miel, es decir, el patrón se desarrolla como consecuencia de un modelo existente, que dispone las cosas ordenadamente. En ese caso el patrón sugiere que la miel, el polen y los huevos, sean depositados en lugares concretos en el panal⁶⁷. La segunda hipótesis, se basa en la “auto-or-

⁶⁷ Es parecido a la lógica que está detrás de un plano de arquitectura, donde se especifican las relaciones espaciales entre los componentes. Se piensa en un equipo: un arquitecto, que diseña al edificio y elabora el plan, y los obreros, que realizan la construcción del edificio, organizando los bloques en base a lo determinado en el plan. Otro excelente ejemplo de esta hipótesis, es el modelo biológico del ARN, que especifica una secuencia particular de aminoácidos en una cadena de proteína. No podemos entender cómo se forma una proteína, en particular, mediante el examen de los constituyentes aminoácidos, debemos

ganización”, que establece que el diseño surge espontáneamente, de las interacciones dinámicas entre los procesos de depósito y eliminación de las crías, el polen y la miel, sin un plan que especifica relaciones espaciales. El patrón emerge espontáneamente, de las dinámicas que se dan en la colonia (puesta de huevos, polen y miel, consumo de polen y miel, aparición de abejas adultas, etc.). En ese sistema auto-organizado, no hay un plan para especificar las ubicaciones de las crías, el polen y la miel; las relaciones dinámicas, por los procesos de depósito y eliminación de material, son suficientes para organizar un patrón en los panales (ver figura 4.29).



Figura 4.29. Panal en las Abejas melíferas (tomado de mielarlanza.com)

El patrón bien organizado, sugiere la capacidad de adaptación de la colonia. Un área compacta para las crías, puede ayudar a asegurar una precisa regulación de la temperatura de incubación para ellas. La ubicación del polen en el borde adyacente donde se cría, lo hace fácilmente accesible a las abejas enfermeras (abejas nodrizas), y promueve la alimentación eficiente de las larvas. El patrón no sólo está bien organizado, sino que es coherente todo el tiempo. Todos los días, en las celdas se depositan miel y polen, se consumen dicha miel y polen, se ponen cientos de huevos, emergen abejas adultas, y se retiran crías enfermas. A pesar de la rotación regular en las celdas de los panales, la estabilidad del patrón se mantiene.

La segunda hipótesis establece que el patrón surge de forma automática, a través de un proceso de auto-organización, a partir de reglas de com-

referirnos a la plantilla del ARN. En el caso concreto de la formación del patrón en los panales, aparentemente, la aparición de un gradiente de temperatura, desde el centro hacia la periferia, parecen indicar donde los huevos, el polen o la miel, se van a colocar.

portamiento de las abejas. En general, las recolectoras de polen, seleccionan una celda en la que depositan su carga. Las abejas obreras, regurgitan su miel, para que las abejas que almacenan los alimentos seleccionen una celda para descargarlas. La mayor parte del polen se coloca en una banda, en el borde del área de las crías, y la mayoría de la miel está en la periferia, aunque algo de polen y de miel quedan dispersos en el área de las crías. El área central de las crías, da a las abejas una señal que les permite depositar el néctar y el polen en lugares específicos. Una característica interesante, y tal vez importante, del proceso de auto-organización, es que las perturbaciones del patrón normal se “reparan”, de manera rápida y automáticamente, sin ningún tipo de proceso especial de reparación. Por ejemplo, una enfermedad que mata las larvas, hace que luego sean eliminadas por las abejas adultas. El patrón es “auto-reparable” después de estas perturbaciones, recuperando rápidamente su orden anterior. Esta característica de formación de patrones, contribuye al funcionamiento eficiente de la colonia.

Una implicación, algo especulativa, de la hipótesis de auto-organización, es que la tasa de puesta de huevos y recolección de polen, puede ser auto-regulada. La eliminación de polen y miel, en función de la cercanía a las crías, sugiere una situación de retroalimentación positiva. A medida que la cantidad de crías aumenta, la tasa de eliminación de polen y miel cercana también aumenta (posibilitan la aparición de celdas vacías, en las que la reina puede poner huevos, según su tasa máxima fisiológica). Como la cantidad de crías aumenta, el consumo de miel y de polen cerca de las crías es probable que también se incremente, por lo tanto, se requiere aumentar el espacio disponible de almacenamiento de polen, en paralelo con las necesidades nutricionales de las larvas en desarrollo. Un ejemplo de un modelo de construcción de nido, es dado por las ecuaciones siguientes [25], donde suponen por simplicidad, que las dos orientaciones para depositar cera son paralela al eje y o al eje x :

$$\frac{dA_x}{dt} - \theta \Delta A_x = \varphi - \pi A_x + m_x A_x \quad (4.65)$$

$$\frac{dA_y}{dt} - \theta \Delta A_y = \varphi - \pi A_y + m_y A_y \quad (4.66)$$

$$\frac{dC}{dt} - (A_y + A_x)D\Delta C = \alpha(A_y + A_x) - \nu C \quad (4.67)$$

Donde, $A_x(x, y, t)$ representa la densidad de abejas en el plano x , $A_y(x, y, t)$ la densidad de abejas en el plano y , $C(x, y, t)$ la cantidad de cera depositada, y D es el coeficiente de difusión en los dos planos (para hacerlo simple). En particular, las ecuaciones 4.65 y 4.66 describen como varían A_x y A_y . Ellas están formadas por una parte con el termino con Δ (que describe la difusión), una parte con el termino con φ que corresponde al flujo constante de abejas llegando en la orientación x (o y , de tal manera que las dos orientaciones sean a priori simétricas), otra parte con el termino con π que representa las abejas que parten desde la orientación x (o y), y el termino m_x que representa la interacción no lineal entre las abejas orientadas en el sentido x (o y) con respecto a la cera ya depositada, y el resto de las abejas. Ese término es descrito por la ecuación:

$$m_{x/y} = \beta(A_x A_y - A_{y/x}^2) + \delta C + \gamma \frac{d^2 C}{d(x/y)^2} + \epsilon \frac{d^4 C}{d(x/y)^4} \quad (4.68)$$

Donde, β es la ganancia por seguir a abejas orientadas en el plano x debido a la reorientación de las abejas orientadas en el plano y por la presencia de las abejas orientadas en el plano x , menos la perdida de abejas orientadas en el plano x debido a la presencia de abejas orientadas en el plano y , δ es la atracción de zonas con alta concentración de cera, y γ , ϵ son gradientes de concentración de cera (indican que las abejas siguen las zonas más densas). En cuanto a C (ecuación 4.67), el termino con Δ traduce el efecto de que las abejas tratan de depositar cera donde ya hay, el término con α es el flujo constante de cera desde el exterior, y el termino con ν es la desaparición de cera debido a que se cae o se quita.

4.2.2.6 Colonia Artificial de Abejas (ABC)

El algoritmo ABC (por sus siglas en ingles, Artificial Bee Colony), es uno de los algoritmos más recientes en el área de inteligencia colectiva. La colonia artificial de abejas es un algoritmo de optimización basado en poblaciones de abejas, muy efectivo para resolver problemas de búsqueda. ABC tiene varias variantes, las principales son [99, 155]:

- Comportamiento de Forrajeo: se basa en el comportamiento colectivo de las abejas para la selección de fuentes de alimentos. Actualmente, existen muchas propuestas inspiradas en ese comportamiento.
- Comportamiento de Unión: basado en el comportamiento de apareamiento de las abejas.
- Comportamiento de la Abeja Reina: inspirado en los algoritmos genéticos, tal que le permite al mejor individuo de una población generar varios descendientes.

En la variante de ABC que presentaremos aquí, las soluciones al problema de optimización, llamadas fuentes de alimentos, son buscadas por las abejas artificiales, usando operadores de variación. El objetivo de las abejas es descubrir las fuentes de alimentos con mayor néctar [14, 99, 158]. Las abejas artificiales se mueven en un espacio de búsqueda multidimensional, eligiendo fuentes de néctar, dependiendo de su experiencia pasada y la de sus compañeros de colmena. Algunas abejas (exploradoras) eligen fuentes de alimento aleatoriamente, sin usar experiencia. Cuando encuentran una fuente de néctar mejor, memorizan su posición, y olvidan la anterior. De este modo, ABC intenta equilibrar procesos de exploración y de explotación, en el espacio de búsqueda [99, 155]. El modelo tiene cuatro componentes principales:

- Fuente de alimentos: el valor de una fuente de alimentos depende de muchos factores, como su proximidad a la colmena, riqueza o la concentración de la energía, y la facilidad de extracción de esta energía.
- Abejas exploradoras: están en constante búsqueda de fuentes de alimentos. Se encargan de buscar en el entorno que rodea a la colmena, nuevas fuentes de alimentos.
- Abejas en espera: buscan una fuente de alimentos, a través de la información que le compartan las recolectoras o exploradoras.
- Abejas recolectoras: están asociadas a una fuente de alimentos en explotación. Ellas llevan información sobre esa fuente en particular (su distancia, ubicación y rentabilidad), para compartirla con sus demás compañeras.

El intercambio de información entre las abejas, permite formar un conocimiento colectivo, que caracteriza los comportamientos de la colmena:

- *Incorporación a una fuente de néctar*: la danza de las abejas informa la calidad de las fuentes de alimentos, y a partir de esa información obtenida, sobre todas las fuentes de alimentos que están disponibles, se determina cuál es la más rentable, para así, incorporarse a ella.
- *Abandono de una fuente*: mediante la misma danza de las abejas, se determina si una fuente ya no es rentable, y por consiguiente, debe ser abandonada.

El pseudocódigo de ABC es [99]:

Fase de inicialización

REPITA

Fase de Abejas Recolectoras

Fase de Abejas en Espera

Fase de Abejas Exploradoras

Memorización de la mejor solución lograda hasta ahora

HASTA (*Ciclo=Número de ciclo máximo*)

En la *fase de inicialización*, se establecen las abejas exploradoras, recolectoras, y en espera, y la población de fuentes de alimentos (soluciones). En la *fase de abejas recolectoras*, esas abejas buscan nuevas fuentes de alimentos dentro de su vecindad. Al encontrar una vecina fuente de alimento la evalúan, y realizan una selección aleatoria entre esa fuente y la anterior. Después de eso, las abejas recolectoras comparten su información de fuente de alimentos con las abejas en espera en la colmena, bailando. En la *fase de abejas espectadoras (en espera)*, esas abejas eligen probabilísticamente su fuente de alimentos, en función de la información proporcionada por las abejas recolectoras. Para ello se puede usar una técnica de selección basada en aptitud, como el método de selección de la ruleta. En la *fase de abejas exploradoras*, las abejas recolectoras cuyas soluciones no pueden ser mejoradas a través de un número determinado de pruebas, denominado “límite”, se convierten en exploradores, y sus soluciones son abandonadas. Luego, las exploradoras comienzan a buscar nuevas soluciones al azar. Estos tres pasos se repiten hasta que un criterio de culminación se cumple, por ejemplo, un máximo número de ciclos.

4.2.3 Modelo de las Cucarachas

La distribución espacial de los individuos, es un tema importante en muchos campos, ya que determina el nivel de interacciones entre ellos, y en general, la organización de la población. En muchas especies, los individuos forman grupos, por lo que la densidad de población es mayor en algunas zonas. La cohesión espacial y temporal de tales grupos de individuos, como su complejidad y diversidad, se han explicado de diversas maneras (por ejemplo, los ecologistas destacan la importancia de los estímulos ambientales) [95]. Específicamente, una agregación se define como cualquier conjunto de individuos ubicados en una región, con una mayor densidad de individuos que en sus alrededores [95]. Una agregación se puede formar, por la atracción de los individuos a estímulos del medio ambiente, o por mutua atracción entre miembros del grupo. Agregaciones sociales que involucran la atracción entre individuos, requieren intercambio de información. Las normas que rigen los movimientos individuales dentro de una agregación, y sus propiedades emergentes, no son fáciles de entender.

En general, el comportamiento colectivo de agrupación, que se produce en un amplio rango de animales (incluyendo bacterias, peces, aves y mamíferos), es llamado de diferentes maneras, en función de la especie [95]: rebaños, cardúmenes y enjambres, son ejemplos de agregaciones. Como dijimos antes, hay dos tipos de agregación:

- Un tipo es la agregación, como resultado de respuestas individuales a la heterogeneidad ambiental. Señales externas, que son generalmente características fijas del medio ambiente, actúan como plantillas, especificando los patrones de agregación final, los cuales son independientes de las condiciones iniciales y de la densidad. Una vez que la heterogeneidad ambiental se elimina, los individuos podrían dispersarse. En específico, la presencia de heterogeneidades en el medio ambiente (por ejemplo, la luz o los gradientes de temperatura), puede afectar el comportamiento individual, proveyendo una plantilla, que se combina con las interacciones sociales, para favorecer el inicio de una agrupación, en un sitio en particular, o reforzar la intensidad de agregación, en algún sitio ya dado.
- El segundo tipo de agregación, es resultado de las interacciones so-

ciales, que involucran la atracción entre los miembros del grupo. La congregación describe grupos, formados y mantenidos por atracciones mutuas. Así, los patrones de agregación, son el resultado de las interacciones entre individuos que siguen reglas simples, basadas en información local.

El estudio de los mecanismos que participan en la formación de los grupos, puede ayudar a comprender al concepto de auto-organización. En general, uno de los mecanismos claves de la auto-organización, en los sistemas sociales, es la existencia de retroalimentaciones positivas [25]. En el caso del segundo tipo de agregación, los grupos tienen su origen y cohesión en la atracción entre los individuos [25]: los miembros del grupo son la fuente de la atracción. Así, el comportamiento del grupo es considerado como un proceso emergente, que surge de atracciones entre los individuos del grupo. El primer tipo de agregación, también puede verse como un proceso emergente, que surge de las atracciones entre los individuos con su entorno inmediato. En ambos casos, la agregación de individuos se basa en la amplificación de una señal dinámica, proporcionada por los individuos o por los estímulos del medio ambiente.

Estudiemos el caso de las cucarachas. Las cucarachas tienden a reunirse en refugios durante sus períodos de descanso, y seleccionan los refugios según sus características físicas [13]. Estos refugios también resguardan las larvas. Los refugios son un recurso importante para estos insectos, y facilita el comportamiento gregario⁶⁸ cooperativo [13]. La formación de agregaciones depende, tanto del medio ambiente como de la atracción mutua. Las cucarachas son capaces de utilizar al medio ambiente, para aprender información espacial clave para regresar a sus refugios, así como reconocer el olor producido por cada grupo (lo que le da su cohesión). Así, para ese comportamiento gregario, el reconocimiento de olores que caracterizan a cada cepa⁶⁹ es fundamental. De esta manera, las cucarachas nos proporcionan una interesante modelo para investigar las relaciones interindividuales, las habilidades de reconocimiento, la organización de las poblaciones en agregaciones, y discutir sus consecuencias evolutivas. Particularmente, en [47, 48] han estudiado las cucarachas de la especie *Blattella germanica* y su comportamiento gregario. Ellos han propuesto un modelo de ese fenómeno, modelando el proceso de elec-

⁶⁸ Que vive formando grupos o asociaciones

⁶⁹ Es una variante fenotípica de una especie.

ción colectiva de las cucarachas del refugio de sus larvas, como resultado de un paseo aleatorio y una probabilidad P_i de dejar el refugio i ($P_i=1/\text{tiempo_descanso}$). Debido a la inter-atracción entre los individuos, esa probabilidad disminuye en función del número de sus congéneres (X_i) en ese refugio, según la ecuación [48]:

$$P_i = \frac{a}{1 + bX_i^2} \quad (4.69)$$

Donde, $a=0.01$ y $b=0.16$. Las características del refugio afectan el tiempo de reposo de los individuos, que para un animal aislado es aproximadamente $1/a$. La expresión $1 + bX_i^2$ describe, cómo la presencia de otros congéneres aumenta el tiempo de reposo. Ese modelo predice, que diferentes patrones colectivos de agregación pueden surgir de forma espontánea, manteniendo las mismas reglas individuales. Ahora bien, un grupo de cucarachas es capaz de seleccionar un único refugio, sólo si el número de refugios es pequeño.

En situaciones naturales, los refugios no son idénticos, y se caracterizan por diferentes parámetros, que son más o menos fáciles de detectar e integrar por un individuo. Cualquier parámetro del refugio que aumente el tiempo de reposo del individuo, favorece la formación del grupo en ese refugio. También, como dijimos antes, las interacciones entre los individuos, aumenta la probabilidad de un individuo de permanecer en un sitio. Por otro lado, debido a la competencia entre los refugios, la mayoría de los individuos se agregan en el sitio que posibilite el más largo tiempo de descanso. Ahora bien, las larvas prefieren el olor de su propia cepa (raza), que la de otras. Sin embargo, en grupos mixtos con dos cepas, la agregación final no es diferente que en grupos puros, eso se puede modelar como [48]:

$$P_{1i} = \frac{a}{1 + b(X_{1i} + \beta X_{2i})^2} \quad (4.70)$$

$$P_{2i} = \frac{a}{1 + b(X_{2i} + \beta X_{1i})^2} \quad (4.71)$$

Donde, P_{1i} (P_{2i}) es la probabilidad de que un individuo de la cepa 1 (2) deje el refugio i , X_{1i} y X_{2i} son, respectivamente, el número de individuos de la cepa 1 y 2 en ese refugio i , y β es la interatracción entre ambas cepas. Si $\beta=1$ no hay diferencia entre las cepas, y si $\beta=0$ no hay interatracción entre ellas.

El modelo predice que dos cepas son capaces de separarse, cuando los sitios de descanso están superpoblados. Los nuevos grupos se caracterizan por una mayoría de larvas de la misma cepa. En este caso, el grupo es un elemento que emerge dinámicamente, donde la segregación se obtiene sin parámetros agresivos, o cualquier otra forma de repulsión entre las cepas. Cuanto más pequeño sea el refugio, y mayor la diferencia entre los dos cepas (β pequeño), más fácilmente emerge la segregación. Por el contrario, si las dos cepas son bastante similares ($\beta>0.7$), la segregación nunca es observada. En resumen, el hacinamiento en los refugios, y el grado en que los individuos reconocen a otros (la proximidad entre las cepas), afectan la dinámica de agregación.

En las cucarachas, el cambio entre la agregación y la segregación, se obtiene sin ningún tipo de comportamiento modificado. Los mecanismos involucrados en la agregación y segregación de las cucarachas (amplificación del tiempo de descanso, reconocimiento químico, etc.), tienen su equivalente en diferentes organizaciones sociales de insectos [47, 95].

Por otro lado, en [13] han estudiado la influencia de los congéneres, en el tiempo de descanso de los individuos, en las cucarachas. Han definido un modelo, según el cual, la distribución de los tiempos de descanso en todas las situaciones, es una ecuación exponencial (e^{-Qt}), donde Q es la probabilidad de dejar el sitio, el cual ha sido definido en [95] como la función empírica:

$$Q = \frac{\theta}{K + X^n} \quad (4.72)$$

Esta función significa, que la probabilidad de dejar un sitio disminuye según el número de sus congéneres (X) en el sitio. Los valores de θ y K fueron estimados experimentalmente en [95]. $\theta/(K+1)$ es la probabilidad más alta de dejar un sitio (es decir, cuando un individuo está solo en el sitio). K y n modulan la influencia de las demás individuos, tal que K

corresponde a un umbral en relación con el número de individuos (X), y n es el sensibilidad a ese número. Las características del sitio influyen en θ , K , y por lo tanto, en la duración del descanso.

El modelo se puede generalizar para varios sitios, con ciertos ajustes, de manera de describir la dinámica de cada uno de los grupos en los sitios de descanso, y por lo tanto, el tráfico entre los sitios. Esos ajustes a la ecuación 4.72 serían: la probabilidad de pasar de un sitio i a un sitio j , depende de la probabilidad de abandonar el sitio i (Q_i).

$$Q_i = \frac{\theta}{K + X_i^2} \quad (4.73)$$

Donde, X_i es el número de individuos en el sitio i . Por otro lado, el flujo de personas entre los dos sitios, se puede describir de la siguiente manera:

$$\phi_{ij} = X_i Q_j \quad (4.74)$$

Además, las ecuaciones diferenciales que describen las variaciones en el número promedio de individuos en cada lugar, en relación con el tiempo, usan dos términos: (1) una parte positiva, que refleja la llegada de individuos al sitio y , (2) una parte negativa, que describe sus salidas. Si se supone que los sitios son iguales, todos los parámetros que caracterizan a los sitios son iguales, y la ecuación diferencial que describe las variaciones en el número promedio de individuos en cada lugar se puede escribir como:

$$\frac{dX_i}{dt} = -\frac{\theta X_i}{K + X_i^2} + \frac{\theta X_j}{K + X_j^2} \quad \text{donde } j \text{ es el resto de sitios} \quad (4.75)$$

El modelo se puede generalizar para grupos con diferentes cepas. En grupos mixtos, la probabilidad de que un individuo, perteneciendo a cualquier cepa, deje el sitio, es función del número de individuos presentes en el sitio. Como ya hemos dicho antes, debido a que las larvas prefieren el olor de su propia cepa a la de otras cepas, la influencia de individuos que pertenecen a la misma cepa es más importante, que la de los individuos que pertenecen a otras. En ese caso, el modelo debe ser completado con el parámetro de atracción entre dos cepas i y j : β_{ij} . Se

supone dos cepas, X_i y Y_i que representan el número de individuos de las cepas 1 y 2, en el sitio i . Los parámetros de atracción entre los miembros de una cepa, se consideran siempre igual a 1 ($\beta_{ii}=1$)⁷⁰. Se supone que la interacción de una cepa con otra cepa es la misma $\beta_{12}=\beta_{21}=\beta$, por lo tanto, las probabilidades de que los individuos de cada cepa dejen el sitio i , que dependen de X_i y Y_i , son:

$$Q_{x,i} = \frac{\theta}{K + (X_i + \beta Y_i)^2} \quad \text{y} \quad Q_{y,i} = \frac{\theta}{K + (Y_i + \beta X_i)^2} \quad (4.76)$$

Además, como hay dos cepas X e Y (y suponemos 2 sitios), la ecuación diferencial que describe las variaciones en el número promedio de individuos de cada cepa en cada lugar se puede escribir como:

$$\frac{dX_i}{dt} = -Q_{x,i}X_i + Q_{x,j}X_j \quad \text{y} \quad \frac{dY_i}{dt} = -Q_{y,i}Y_i + Q_{y,j}Y_j \quad \text{para } i=1, j=2, \text{ y viceversa} \quad (4.77)$$

Donde, $X_1 + X_2 = N_x$, $Y_1 + Y_2 = N_y$, N_x , N_y son los números de individuos de cada cepa, y $N_x + N_y = N$ es el número total de individuos.

El modelo permite agregaciones, sólo cuando el número de individuos ya presentes en el sitio, es lo suficientemente grande. Cuando el número de individuos es pequeño, el nivel de agregación es débil. Tampoco el modelo tiene en cuenta el marcado del ambiente con estímulos, que podrían reforzar la agregación. Este aspecto no es eficaz a corto plazo (pocas horas), pero estabiliza las agregaciones a largo plazo. Ese último modelo es para dos refugios y dos cepas. Sin embargo, los modelos teóricos para más de dos sitios y dos cepas, tienen una respuesta similar colectiva.

Por otro lado, en [69] modelan el hecho que en la naturaleza, algunos lugares son más atractivos para las cucarachas, promoviendo así, la agregación en esos sitios en particular. Por ejemplo, las cucarachas preferiblemente se agregan en lugares oscuros [69]. Si dos o más lugares oscuros existen, la mayoría de las cucarachas se colocan en uno de esos refugios, en lugar de distribuirse de manera uniforme entre todos

⁷⁰ $\beta < 1$, expresa el hecho de que un individuo de una cepa tiende a permanecer más con un individuo de la misma cepa, que con un individuo de otra cepa. Cuando $\beta = 0$, las dos cepas se comportan de forma independiente.

los sitios. Aunque los mecanismos que conducen a esta elección colectiva todavía no están plenamente entendidos, en un trabajo reciente se mostró, que la modulación simple del período de descanso en un lugar determinado, por el número de individuos en ese sitio, lleva al grupo de cucarachas a la elección de un refugio [69].

También, el feromona segregado por las heces promueve la agregación, en varias especies de cucarachas [31]. Una de las funciones de ese feromona es de orientación direccional, otra es de inhibición de la locomoción. Las cucarachas tienden a detener su avance, cuando se encuentran con el feromona generado por las heces, y tienden a permanecer allí. La inhibición locomotora es realizada por la interacción social entre los individuos, y parece estar controlada, en parte, al menos, por la percepción olfativa.

Otro modelo de agregación en las cucarachas, propuesto en [95], vinculada al problema de colisión, es el siguiente: Una larva detenida, ya sea que este agrupada o aislada, podría moverse después de una colisión. Ellos asumen que cada larva parada en un grupo de N individuos ($2 \leq N \leq 3$), podría detectar movimientos de larvas dentro de su radio de detección. Por experimentos, ellos calcularon la fracción $F_{\text{Colisión},N}$ de larvas que dejan su estado de parada, debido a una colisión. Esta fracción, dividida por el tamaño del grupo, da la probabilidad individual de empezar a moverse. Si se asume que la probabilidad de moverse es constante por unidad de tiempo, cuando una cucaracha en movimiento detecta una parada, $1/\tau_{\text{Colisión},N}$ es la probabilidad de moverse por unidad de tiempo durante una colisión, siendo $\tau_{\text{Colisión},N}$ el tiempo entre la detección del movimiento de la larva y el arranque de la cucaracha parada. Así, se puede calcular la fracción de grupos de tamaño N , en el tiempo t ($F(t)$), como:

$$F(t) = \sum_{I=0}^N \frac{N!}{I!(N-I)!} p_c^I (1-p_c)^{N-I} e^{-\left(\frac{t}{\tau_{c,N}} + \frac{(N-I)t}{\tau_{l,N}}\right)} \quad (4.78)$$

Donde, p_c es la probabilidad de que una larva pertenezca a la categoría de paradas de corta duración, τ_c y τ_l la duración promedio de las paradas cortas y largas. Ahora, $1/\tau_{\text{Colisión},N}$ puede ser calculada como

$$1/\tau_{\text{Colisión},N} = -\frac{v \left(\ln \left(1 - \frac{F_{\text{Colisión},N}}{N} \right) \right)}{12} \quad (4.79)$$

Donde $F_{\text{Colisión},N}$ es la fracción de larvas que dejan su estado de paradas por una colisión (o la fracción de encuentros entre una larva en movimiento y una larva aislada), y v es la velocidad de las cucarachas.

En la literatura hay otros modelos teóricos, que tratan similares procesos gregarios en los insectos, como el caso de los escarabajos [26]. En general, los modelos ofrecen una fuerte evidencia de que la agregación puede ser explicada, entre otras cosas, en términos de las interacciones entre los individuos, que siguen reglas simples basadas en información local, sin un conocimiento global. Así, la agregación en cucarachas, parece requerir un estrecho contacto entre individuos. De esta manera, el comportamiento de una cucaracha (es decir, la probabilidad de pararse, descansar, etc.), se ve afectada por la presencia de congéneres en las inmediaciones. Una cucaracha en movimiento, utiliza el campo de difusión de un vecino como una señal para detenerse. Este campo, también podría afectar la duración de la parada de las cucarachas. Sin embargo, no podemos descartar la influencia de un feromona de agregación. Parece que feromonas de agregación, ejercen una acción directa sólo a cortas distancias.

En general, la agregación requiere la modulación de la conducta individual, en relación a los cambios sociales o ambientales en las inmediaciones. Por ejemplo, las cucarachas aumentan su tiempo de descanso dentro de un grupo, a partir de un proceso de amplificación y formación de un agregado principal. En otros contextos, la modulación de la conducta individual, lleva a la selección colectiva de un sitio de agregación común.

Finalmente, como dijimos antes, los mecanismos implicados en la agregación de las cucarachas, tienen su equivalente en muchos insectos sociales. Adicionalmente, muchos de los modelos presentados en esta sección, se pueden aplicar a una serie de especies gregarias, así como a un conjunto de situaciones en las que las actividades sociales, se basan en un fenómeno de agregación.

4.2.4 Modelo de enjambre

En general, en las colonias de insectos, el comportamiento de enjambre está muy presente, entendido como el comportamiento de la colonia, en las que sus miembros interactúan, con el fin de optimizar un objetivo global, pudiendo ser ellos muy simples o complejos [102]. Inspirados en ese comportamiento, en la literatura se han venido proponiendo modelos de enjambre⁷¹. Algunos aspectos interesantes de esos modelos, es que normalmente se basan en interacciones locales, las cuales suelen ser indirectas, a través del entorno (a eso hemos llamado estigmergia, en capítulos anteriores), y que exhiben un comportamiento auto-organizativo.

Ya hemos vistos algunos de ellos en secciones anteriores, tales como los que hemos presentado, inspirados en el comportamiento de las abejas, hormigas y cucarachas. En esta sección, más que caracterizar un proceso propio de un sistema de insecto en particular, presentamos un modelo de optimización general, basado en un comportamiento colectivo. A ese modelo se le ha denominado en la literatura, *optimización por enjambre de partícula* (PSO⁷², por sus siglas en inglés) [8, 102], modelo de inteligencia colectiva, que busca optimizar soluciones a un problema dado, utilizando un enjambre de partículas (población de soluciones), donde cada una se va optimizando, dependiendo de la experiencia personal, y de la experiencia de las otras partículas en su vecindario. Estas experiencias, son denominadas por Engelbrecht, como componente cognitivo y componente social, respectivamente [102].

El algoritmo de enjambre de partículas se basa en una idea muy simple [86]: la gente aprende a darle sentido al mundo, interactuando con los otros sobre él. Las personas hablan unas con otras, observan unas a otras, y aprenden unas de otras, para darle sentido a un mundo confuso. Esta premisa, permite diseñar algoritmos que codifican una población de individuos, que proponen soluciones a un problema dado, y luego son capaces de refinar las soluciones, mediante la interacción con sus “compañeras”, recogiendo las sugerencias de sus vecinos, y a partir de ellas, se ajustan. Con el tiempo, los individuos encuentran buenas soluciones al problema, aun cuando el problema sea muy difícil⁷³. En general, esta técnica ha sido utilizada en problemas multiobjetivos, dinámicos, y muchos otros tipos de problemas difíciles.

⁷¹ En inglés se llaman “Swarm Intelligence Modelos”

⁷² Partícle Swarm Optimization

⁷³ Multimodal, no lineal, ruidoso, etc.

Como se verá más adelante, se han propuesto en la literatura, muchas variaciones al modelo de enjambre de partículas. En las secciones siguientes presentaremos el modelo general y algunas de las variaciones. Comencemos por definir las características comunes de todos ellos [102]:

- En primer lugar, todas parten de una población de partículas.
- En segundo lugar, cada enjambre de partículas tiene algún tipo de topología, que describe las interconexiones entre las partículas. La topología tradicional se llama GBEST, por su nombre en inglés (Global Best). La topología GBEST, puede ser pensada como una población totalmente interconectada, es decir, todos los miembros de la población pueden verse influidos por los otros (es considerada como una especie de red social). Ahora bien, en un enjambre de partículas estándar, las partículas se ven afectadas por el individuo que ha encontrado la mejor solución al problema, por el momento (el mejor de la población). Por lo tanto, en GBEST, aunque contiene el mayor número posible de conexiones entre los miembros de la población, en la práctica, significa seguir la mejor solución encontrada. La topología LBEST (Local Best) es una red en anillo, donde cada partícula está conectada a las partículas a cada lado de ella. En esa estructura, las subpoblaciones pueden converger, de manera independiente, en diversos óptimos, en el espacio del problema. Esta topología es típicamente más lenta para converger en un óptimo global, pero también, menos susceptibles al encanto de óptimos locales. Además de estas dos, en la literatura se han propuesto otras topologías (la figura 4.28 ilustra algunas topologías).

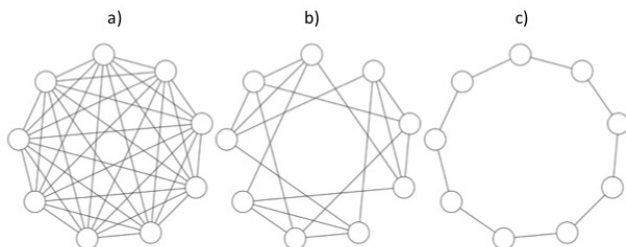


Figura 4.30. Topologías de Interconexión de Partículas⁷⁴ (tomado de http://www.scholarpedia.org/article/Particle_swarm_optimization).

⁷⁴ La figura 4.30.a es una topología completamente conectada (GBEST). La figura 4.30.b es la topología llamada Von Neumann, tal que el grado de cada nodo es 4. La figura 4.30.c es una topología tipo anillo, donde cada partícula está relacionada con dos vecinas (LBEST).

- Una tercera característica de los enjambres de partículas, es que usan una norma de cambio (normalmente, expresada en una fórmula matemática). Las partículas se mueven a través del espacio de búsqueda, tal que la selección de un punto en el tiempo t , es definida por una norma de cambio, que depende de su posición en el instante $t-1$, sus éxitos anteriores, y los éxitos anteriores de sus vecinos. A menudo, esa evolución en el espacio de búsqueda, es descrita en términos de dos fases: de exploración y de explotación. El algoritmo de búsqueda, busca primero las regiones buenas en el medio ambiente y, a continuación, habiendo encontrado una buena región, busca el mejor punto en esa región. En el enjambre de partículas, la búsqueda se parece al consenso en un barrio: si una partícula y sus vecinos han tenido éxito en una determinada área, entonces en esa zona se buscará, pero si algunos vecinos están investigando todavía en otras regiones del espacio del problema, se espera por esa exploración. Así, el enjambre de partículas puede buscar en varias regiones del espacio, simultáneamente, y las partículas pueden cambiar, de forma flexible, de una región a otra.
- Una cuarta característica es la regla de interacción. Una partícula considera sus éxitos, y los de algunas otras partículas, en la determinación del siguiente punto de prueba, en el espacio de búsqueda.

Así, la metáfora que subyace a este modelo colectivo de resolución de problemas, es que la inteligencia opera a través de la interacción entre sus miembros. Los miembros están motivados a buscar y mantener la coherencia entre ellos, porque, por ejemplo, es incómodo tener creencias, que lógicamente se contradigan. De esta manera, este es un proceso de optimización, con una constante búsqueda de formas de organizar y reorganizar las creencias y actitudes, con el fin de producir más consistentes patrones, lo menos disonantes posibles.

En general, el modelo de enjambre de partículas puede ser descrito como una población de vectores, cuyas trayectorias oscilan en torno a una región, que es definida por el mejor éxito anterior de cada partícula y el mejor éxito de todas ellas. En el caso de GBEST, la trayectoria de búsqueda de cada partícula, es influenciada por el mejor punto encontrado por la población. La mejor partícula actúa como un atractor, atrayendo todas las partículas hacia ella. Con el tiempo, todas las partículas convergen en esa posición. LBEST permite que cada individuo sea influenciado por un número más reducido de miembros (es un subconjunto del enjambre,

que eventualmente no tiene directa relación con las otras partículas. Es como un barrio de la población). Cuando el número de vecinos aumenta, el caso puede llegar a ser equivalente a GBEST. GBEST es muy recomendable para funciones objetivos unimodales, mientras que LBEST se recomienda para funciones objetivos multimodales.

Veamos formalmente un algoritmo basado en esa premisa [8]. Cada partícula posee un vector de posición (x_i), que es la solución codificada en un espacio de búsqueda en R^n , y un vector de velocidad (v_i) también en R^n , que determina la magnitud del cambio por cada dimensión del vector de posición de la partícula. Por lo tanto, a mayor velocidad, mayor es el cambio en la posición. La posición de la partícula i durante la iteración $t+1$, es definida por la ecuación 4.80, donde, $x_i(t)$ es la posición actual de la partícula, y $v_i(t+1)$ es la velocidad que lleva la partícula.

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (4.80)$$

Además, cada partícula posee memoria que le permite recordar cuál ha sido la mejor posición en la que ha estado (componente cognitivo), y cuál es la mejor posición que se ha encontrado en el vecindario (componente social); denominadas mejor posición individual y mejor posición del vecindario. La actualización de la velocidad es afectada por el componente cognitivo y social de cada partícula y depende del algoritmo a emplear (topología usada). Como ya lo hemos dicho, GBEST emplea una topología de interconexión global y LBEST una topología anillo para esa actualización.

Los parámetros necesarios para llevar a cabo la evolución, son [102]:

- Tamaño del enjambre: determina la cantidad de partículas que contiene el enjambre. Mientras mayor es esa cantidad, mejores son los resultados, porque se explora más el espacio de búsqueda. Sin embargo, el aumento del tamaño, también aumenta el tiempo computacional requerido para la hacer la evolución. Según Engelbrecht [102], estudios empíricos realizados, muestran que enjambres con tamaños entre 10 y 30 partículas, son suficientes para conseguir soluciones óptimas; no obstante, el autor remarca que la cantidad de partículas en un enjambre, depende del problema.

- Tamaño del vecindario: parámetro válido para los enfoques que usan vecindarios, como LBEST, y define la interacción social de las partículas en el enjambre. Mientras menor es el vecindario, menor es la interacción entre las partículas, pero aun así, se pueden encontrar buenas soluciones, porque se explora bien el espacio de búsqueda, aunque se tarde más en converger el enjambre.
- Número de iteraciones: es dependiente del problema. Engelbrecht [102] considera que muy pocas iteraciones pueden terminar la búsqueda muy pronto, mientras que muchas iteraciones pueden alargar el procesamiento computacional innecesariamente.
- Coeficientes de aceleración: generalmente se utilizan valores constantes. Estos valores, determinan la importancia del componente cognitivo (c_1) y del componente social (c_2). Engelbrecht [102] considera que estos valores dependen del problema, y que cuando $c_1 < c_2$, la partícula es atraída con más fuerza hacia su mejor posición personal, en cambio, cuando $c_2 < c_1$, la partícula es atraída con mayor fuerza hacia la mejor posición global; pero, cuando $c_1 = c_2$, la partícula es atraída al promedio entre la mejor posición personal y la mejor posición global.

Pasemos a describir los dos algoritmos más usados de enjambres de partículas.

4.2.4.1 Algoritmo GBEST

En este algoritmo, el vecindario definido para cada partícula es el enjambre completo (ver figura 4.28.a). En este caso, la mejor posición del vecindario es la mejor posición global, de ahí el nombre del algoritmo. La actualización de la velocidad, en este caso, viene determinada por:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\hat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (4.81)$$

Donde, $v_{ji}(t)$ es la velocidad de la partícula i en la dimensión j durante la iteración t , c_1 y c_2 son constantes de aceleración, que definen la importancia del componente cognitivo y social, respectivamente, r_{1j} y r_{2j} son números aleatorios en el rango $[0, 1]$, sacados de distribuciones uniformes independientes, y_j es la dimensión j de la mejor posición alcanzada por la

partícula i (componente cognitivo), y $\widehat{y}_j(t)$ es la dimensión j de la mejor posición global alcanzada por el enjambre hasta la iteración t (componente social). La mejor posición individual alcanzada por la partícula i , se calcula de acuerdo a la ecuación 4.82:

$$y_i(t+1) = \begin{cases} y_i(t) & \text{si } f(x_i(t+1)) \geq f(y_i(t)) \\ x_i(t+1) & \text{si } f(x_i(t+1)) < f(y_i(t)) \end{cases} \quad (4.82)$$

Donde la función f define la proximidad de la partícula con el punto óptimo, tal que la mejor posición individual es un problema de minimización de f . Eso es válido para cualquier dimensión. Por otro lado, la mejor posición global alcanzada por el enjambre, es la mejor entre las mejores posiciones individuales alcanzadas por las partículas que conforman el enjambre. Matemáticamente es descrita por la ecuación 4.83:

$$\widehat{y}(t) \in \{y_o(t), \dots, y_n(t)\} \mid f(\widehat{y}(t)) = \min \{f(y_o(t)), \dots, f(y_n(t))\} \quad (4.83)$$

Donde, n es el número total de partículas en el enjambre. Finalmente, el algoritmo GBEST puede escribirse como:

Crear e inicializar un enjambre n -dimensional;

Repetir hasta alcanzar condición de parada

por cada partícula $i = 1, n$

si $f(x_i) < f(y_i)$ entonces

$y_i = x_i$

si $f(y_i) < f(\widehat{y})$ entonces

$\widehat{y} = y_i$

por cada partícula $i = 1, n$

actualizar la velocidad usando la ecuación 4.81

actualizar la posición usando la ecuación 4.80

4.2.4.2 Algoritmo LBEST

En este algoritmo, el vecindario del enjambre es definido por una topología tipo anillo, o similar (ver figuras 4.28.b y 4.28.c), es decir cada par-

tícula tiene un vecindario formado por sus k vecinos inmediatos. Según Engelbrecht, este algoritmo tiene dos ventajas [102]:

- Es computacionalmente económico, porque no requiere de un orden espacial complejo, ya que se descompone el espacio.
- Ayuda a difundir las mejores soluciones entre todas las partículas, sin importar donde estén ubicadas.

La ecuación 4.84 determina la actualización de la velocidad bajo esta topología.

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_{2j}(t)[\widehat{y}_{ij}(t) - x_{ij}(t)] \quad (4.84)$$

Donde, \widehat{y}_{ij} es la dimensión j de la mejor posición conseguida por el vecindario N_i de la partícula i hasta la iteración t (componente social). La ecuación 4.85 describe como determinar esa mejor posición del vecindario N_i :

$$\widehat{y}_i(t+1) \in \{N_i \mid f(\widehat{y}_i(t+1)) = \min \{f(x)\}, \quad \forall x \in N_i\} \quad (4.85)$$

y la formación de vecindario N_i es caracterizada por la ecuación 4.86, donde n_{N_i} es la cantidad de vecinos por partícula.

$$N_i = \{y_{i-n_{N_i}}(t) + y_{i-n_{N_i}+1}(t), \dots, y_{i-1}(t), y_i(t), y_{i+1}(t), \dots, y_{i+n_{N_i}}(t)\} \quad (4.86)$$

Es importante ver que los vecindarios de las partículas se solapan, lo que permite compartir el espacio de búsqueda entre ellas. Finalmente, el algoritmo de Local Best PSO puede escribirse como:

Crear e inicializar un enjambre n-dimensional;

Repetir hasta alcanzar condición de parada

por cada partícula $i = 1, n$

si $f(x_i) < f(y_i)$ entonces

$$y_i = x_i$$

si $f(y_i) < f(\hat{y}_i)$ entonces

$$\hat{y} = y_i$$

por cada partícula $i = 1, n$

actualizar la velocidad usando la ecuación 4.84

actualizar la posición usando la ecuación 4.80

4.2.4.3 Algunas mejoras

Hasta ahora se han explicado los algoritmos principales de optimización por enjambre de partículas; no obstante, se han propuesto modificaciones, que incluyen la introducción de un peso de inercia, límites de velocidad, restricciones en los componentes cognitivo y social, maneras de determinar la mejor posición individual o global, y diferentes modelos de velocidad, todo en aras de mejorar la velocidad de convergencia y la calidad de las soluciones [102]. Veamos algunas de las variaciones mencionadas anteriormente, particularmente, las de límites en la velocidad y la introducción del peso de inercia.

- *Límites de Velocidad:* Los límites de velocidad se diseñaron para controlar la exploración y refinar la búsqueda, evitando que las velocidades de las partículas alcancen valores tan altos, que los cambios en la posición sean tan grandes que puedan obviar áreas de interés en el espacio de búsqueda. El primer paso es establecer el límite de velocidad por cada dimensión del vector de velocidad. Engelbrecht [102] sugiere el uso de la ecuación 4.87, para conseguir un buen valor que logre balancear entre: a) moverse muy rápido o muy lento, y b) exploración y explotación.

$$V_{\max,j} = \delta(x_{\max,j} - x_{\min,j}) \quad (4.87)$$

donde $x_{\max,j}$ y $x_{\min,j}$ son los valores máximos y mínimos de x en la dimensión j , $\delta \in [0, 1]$ y depende del problema. Una vez establecido el límite de velocidad por cada dimensión, la ecuación 4.88 determina cómo hacer

cumplir el límite de velocidad.

$$v'_{ij}(t+1) = \begin{cases} v'_{ij}(t+1) & \text{si } v'_{ij}(t+1) < V_{\max,j} \\ V_{\max,j} & \text{si } v'_{ij}(t+1) \geq V_{\max,j} \end{cases} \quad (4.88)$$

Donde, $v'_{ij}(t+1)$ se calcula utilizando las ecuaciones 4.81 o 4.84, según sea el caso.

La importancia de $V_{\max,j}$ radica en que, para un valor pequeño de $V_{\max,j}$ se favorece la explotación, porque los cambios de posición son pequeños, mientras que para un valor grande se favorece la exploración. Finalmente, teniendo en cuenta la importancia de $V_{\max,j}$, Engelbrecht [102] redefine la ecuación 4.87, para reducir la sensibilidad del valor d en la ecuación 4.88, utilizando la función de la tangente hiperbólica.

$$v_{ij}(t) = V_{\max,j} \tanh\left(\frac{v'_{ij}(t+1)}{V_{\max,j}}\right) \quad (4.89)$$

- *Peso de Inercia:* El peso de inercia de una partícula determina la influencia de la velocidad anterior $v_{ij}(t)$, al momento de calcular la nueva velocidad $v_{ij}(t+1)$. Se trata de otro mecanismo, para controlar entre explorar y explotar en el enjambre. La ecuación 4.90 sustituye la ecuación de actualización de velocidad del algoritmo GBEST (para LBEST se realiza un cambio similar), donde w es el peso de inercia.

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_{1j}(t)[y_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2r_{2j}(t)[\widehat{y}_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (4.90)$$

Según Engelbrecht [102], el valor de w es muy importante, porque de él depende la convergencia del enjambre y el equilibrio óptimo entre explorar y explotar. El valor debe estar en el rango (0; 1], habiendo mayor exploración para valores altos de w , y mayor explotación para valores bajos de w . El valor óptimo depende del problema, Engelbrecht propone diferentes enfoques de ajuste dinámico del peso de inercia [102]: a) ajustes aleatorios, b) disminución lineal, c) disminución no-lineal, d) inercia difusa adaptativa, y e) aumento lineal. Por

ejemplo, en la disminución lineal se va disminuyendo linealmente el peso de inercia, desde un valor alto hasta un valor pequeño (generalmente se utilizan como valores altos y pequeños a 0.9 y 0.4, respectivamente), como lo muestra la ecuación siguiente:

$$w(t) = (w(0) - w(n_t)) \frac{(n_t - t)}{t} + w(n_t) \quad (4.91)$$

Donde n_t es el número máximo de iteraciones en que el algoritmo será ejecutado, $w(0)$ es el peso inicial de inercia, $w(n_t)$ es el peso final de inercia, y $w(t)$ es el peso de inercia en la iteración t (note que $w(0)$ debe ser mayor a $w(n_t)$).

En la literatura existen otros modelos de optimización por enjambre de partículas, con diversas fuentes de inspiración de la naturaleza [102]:

- Algoritmo de Búsqueda Gravitacional (Gravitational search algorithm)
- Modelo de Gotas de Agua Inteligentes (Intelligent Water Drops)
- Modelo de Formación Dinámica Fluvial (River formation dynamics)
- Algoritmo de Búsqueda por Difusión Estocástica (Stochastic diffusion search)

4.3. Modelos Sociales

Otros ejemplos de modelos emergentes provienen de los sistemas sociales. Ejemplo de ello es cuando, una gran cantidad de personas interactúan sin ninguna comunicación directa entre ellas, y emergen patrones desde esas interacciones. Los sistemas sociales exhiben características de comportamientos de enjambre, las cuales pueden ser analizadas desde, por lo menos, dos perspectivas [85, 86, 87, 88, 89]:

- *Capacidad de filtrado colaborativo*: Se basa en la premisa de que las personas que buscan información, hacen uso de lo que otras ya han analizado. Para ello, se deben almacenar las preferencias y evaluaciones de los personas. Esas preferencias y evaluaciones, son usadas para guiar las acciones de las personas. Así, el objetivo de un filtrado colaborativo es predecir la utilidad de un determinado tema, para un

usuario en particular, basado en los gustos anteriores del usuario, y en las opiniones de otros usuarios con gustos similares. El filtrado colaborativo puede clasificarse en: basados en memoria y basados en modelos. Los primeros usan una base de datos de usuario-tema, para generar una predicción. Los segundos desarrollan/construyen modelos mediante diferentes técnicas, tales como redes bayesianas o enfoques basados en reglas.

- *Secuenciación adaptativa colaborativa:* La secuenciación adaptativa es uno de los principales retos en diferentes ámbitos sociales (por ejemplo, la educación virtual a distancia). En el caso educativo, consiste en seleccionar el orden en que se deben presentar un conjunto de unidades a un estudiante (secuencia), con el fin de hacer su aprendizaje lo más exitoso posible, teniendo en cuenta sus capacidades y necesidades (personalización). Algunos estudiantes se benefician con secuencias con muchos ejercicios para los temas difíciles, mientras que otros prefieren otras secuencias (por ejemplo, actividades con una gran cantidad de texto escrito, con muchos recursos gráficos, etc.). Aunque estudiantes diferentes tienen secuencias diferentes de aprendizaje, sus preferencias muestran cierto grado de correlación. De esta manera, colectivamente, a partir de las correlaciones, es posible determinar modelos de secuenciación comunes. Así, el problema de secuenciación puede ser visto como un problema de optimización de ruta (“encontrar el camino que maximiza el aprendizaje”).

Inspiradas en esas dos perspectivas de los sistemas sociales, presentaremos algunos modelos emergentes, referenciados en la literatura.

4.3.1 Modelos de Preferencia

Probablemente, el método más simple para alcanzar decisiones colectivas y evitar conflictos, es votando [85]. Este método asume que todas las opciones son conocidas por todos los individuos, y que la pregunta restante es determinar sus preferencias. Este mecanismo elige la opción, en base a las preferencias de todos los agentes. En el caso más simple, cada individuo tiene un voto, que se lo da a la opción que este individuo prefiere. Agregando todos los votos, se determina las preferencias relativas entre las diversas alternativas. Esto es similar al funcionamiento de las colonias de hormiga, en donde el rastro de

feromona dejado por una hormiga en particular, se puede ver como el “voto” de la hormiga en la discusión sobre donde se encuentra el mejor alimento. Este protocolo es conocido como el protocolo de la pluralidad (la opción con el mayor número de votos gana) [85].

En una versión más sofisticada del mecanismo de votación, los individuos pueden distribuir su votación sobre diversas alternativas, proporcionalmente a sus preferencias individuales. Por ejemplo, la alternativa A pudiera conseguir un voto de 0.5, B de 0.3, C de 0.2 y D de 0.0. En ese caso, la función de preferencia colectiva P_{col} , es el promedio de las n funciones de preferencias individuales P_i , la cual fue definida en el capítulo 2 por la ecuación 2.1.

Una simulación de la solución colectiva de este procedimiento, permite ilustrar la dinámica que determina un promedio intrínseco. En [97] realizaron una simulación, que consistió en un número de agentes que intentan encontrar una ruta a través de un “laberinto”, desde una posición inicial fija a una posición final fija. En una primera fase, los agentes “aprenden” la disposición del laberinto, explorándolo en un orden al azar. Hacen eso, usando una función de preferencia vinculada a cada recorrido que intentan. En una segunda fase, utilizan ese conocimiento para encontrar una ruta corta, que evita todos los lazos y callejones sin salida encontrados durante la fase de aprendizaje. Puesto que diversos agentes han aprendido diferente funciones de preferencia, sus mejores rutas pueden diferenciarse grandemente en longitud. Johnson [97] demostró que si se hace un promedio de las funciones de preferencia, para una gran cantidad de agentes, la ruta seleccionada por esa preferencia “colectiva” es perceptiblemente más corta, que la ruta media encontrada por un agente individual típico. De hecho, si la colectividad de agentes es suficientemente grande, la solución colectiva es mejor, que la mejor solución individual. Debido a la ley de grandes números, podemos esperar que las malas “fluctuaciones” se anulen, cuando se hace un promedio de muchas preferencias. Por lo tanto, el promedio de las decisiones tomadas por un grupo grande es más eficaz, que la decisión tomada por un individuo al azar.

Otro modelo de preferencia se basa en un protocolo binario (series de votos, con 2 opciones cada una) [97]. En este caso, podrían irse esco-

giendo de dos en dos opciones, hasta ir eliminando todas las opciones y quedarse con una. Otro modelo es llamado protocolo de Borda [97]. En este caso, los agentes escogen todas sus preferencias, y a partir de allí se desarrolla una función de bienestar social, la cual asigna N puntos a la preferencia que ha sido elegida por todos los individuos, y así sucesivamente, siendo N el número de candidatos. Versiones de este protocolo existen, donde se mezclan con esquemas de distribución de la votación, etc. En general, cada una de ellas le da preferencia a un aspecto colectivo, su uso dependerá de lo que se quiera hacer prevalecer, en el proceso de toma de decisiones.

Finalmente, otro ejemplo de preferencia es en la construcción de “filtrados colaborativos”, o “filtrados Sociales”, de información [85, 97]. La idea principal es automatizar el proceso de “boca-a-boca”, a través del cual la gente recomienda productos o servicios entre sí. Este ejemplo lo narramos en la sección 2.4, pero lo volvemos a describir en detalle aquí. Si se tiene que elegir entre una variedad de opciones, de las que no se tiene ninguna experiencia, a menudo uno se basa en las opiniones de otras personas que tienen experiencia. Sin embargo, cuando hay miles o millones de opciones, como las que uno encuentra en la web, se hace prácticamente imposible para una persona, localizar expertos que pueden dar consejos sobre cada una de las opciones. Al cambiar de un modo de recomendación individual a uno colectivo, el problema se hace más manejable. En lugar de pedir la opinión de cada individuo, se podría tratar de determinar una “opinión media” para un grupo. El mecanismo básico detrás de los sistemas de filtrado colaborativo, es el siguiente:

- Se registra un gran grupo de preferencias de la gente
- Se crea un subgrupo de gente, cuyas preferencias son similares a las de la persona que busca asesoramiento, utilizando una métrica de similitud,
- Se calcula un promedio (posiblemente ponderada) de las preferencias para ese subgrupo
- Se usa la función de preferencia resultante, para recomendar opciones en las que quien busca ayuda no ha expresado ninguna opinión personal hasta el momento.

Una métrica de similitud típica es el coeficiente de Pearson, que establece coeficientes de correlación entre las funciones de preferencia de los

usuarios El coeficiente de correlación entre dos usuarios a y b , se define según la ecuación 2.8. Si la métrica de similitud ha seleccionado a personas con gustos similares, las posibilidades son grandes que las opciones que están altamente evaluadas por dicho grupo, también sean las mismas de quien busca ayuda. El método puede ser utilizado para la selección de documentos, servicios o productos (libros, CDs, etc.).

El principal cuello de botella con los sistemas de filtrado colaborativo, es la colección de preferencias. Para ser fiable, el sistema necesita una gran número de personas (normalmente miles), que expresen sus preferencias acerca de un número relativamente grande de opciones (por lo general, docenas). Dado que el sistema sólo llega a ser útil después de una “masa crítica” de opiniones que se hayan recogido, la gente puede no estar muy motivada para expresar preferencias en las etapas iniciales, cuando el sistema aún no puede ayudarlos. Una forma de resolverlo es recoger las preferencias que están implícitas en las acciones de las personas. Por ejemplo, las personas que ordenan libros por Internet, implícitamente expresan sus preferencias a través de los libros que compran. Los clientes que han comprado el mismo libro, es probable que tengan preferencias similares para otros libros⁷⁵. Hay otras formas sencillas para recoger las preferencias implícitas en la web, como el registrar todos los documentos publicados en un sitio web, que han sido consultados por un determinado usuario. Una función de preferencia para ese usuario, sería la lista de todos los documentos disponibles, con preferencia 1 para los que han sido consultados, y 0 para los demás. Usando métricas de similitud en esos vectores de preferencias, se puede determinar usuarios con intereses similares.

Con el filtrado colaborativo, es posible determinar grupos de documentos relacionados. En este caso, se cambia el interés de las similitudes entre los usuarios a las similitudes entre las opciones, tal como se expresa implícitamente en las preferencias de los usuarios. Esto permite abstraerse de los usuarios, o de grupos específicos, con el fin de generar una función de preferencia colectiva, que describa asociaciones entre opciones, y no sólo las evaluaciones de las opciones. Para ello, se parte de la suposición que dos documentos son más similares, entre más usuarios los hayan consultado a los dos. Sin embargo, la frecuencia de consulta depende, no sólo en la similitud de un documento con el otro, sino de su valor intrínseco. Por lo tanto, con el fin de determinar el vínculo entre un

⁷⁵ Este principio es el que aplica Amazon (www.amazon.com).

documento x y un documento y , se puede utilizar la probabilidad condicional de que un usuario puede consultar x , dado que ese usuario consultó y . Esa probabilidad $P(x|y)$ determina una matriz M_{xy} , que representa las fuerzas de las conexiones entre los documentos (co-ocurrencia). Cada elemento de esa matriz es definido por la ecuación 2.9, presentada en el capítulo 2, la cual recordamos aquí:

$$m_{xy} = P(x|y) = \frac{\#(x \& y)}{\#(y)} \quad (4.92)$$

Donde, $\#(x)$ representa el número total de usuarios que consultaron x , y $\#(x\&y)$ el número total de usuarios que consultaron tanto x como y .

Esa fórmula es tan general, que se puede aplicar en casos en donde dos documentos x e y aparecen juntos en una selección determinada. Eso ha sido llamado como “co-ocurrencia”. Una fuente obvia para la co-ocurrencia de datos en la web, son documentos que contienen listas de enlaces a otros documentos. Si dos documentos x e y aparecen en la misma lista, se puede asumir que el autor de esa lista considera que esos documentos son igualmente relevantes para el tema de esa lista, y por lo tanto, similares en alguna forma. Si x e y aparecen juntos en otro documento, más se asume que estén relacionados, y por lo tanto, mayor es el peso del vínculo que los une. Los valores resultantes pueden ser utilizados, para determinar una lista de enlaces ponderados, que conecta todos los documentos que han sido examinados de este modo. Puede parecer que con la reducción de filtrado colaborativo a co-ocurrencia, se pierde la posibilidad de recomendar a una persona. Sin embargo, recomendaciones personales más complejas P , se pueden recuperar mediante la representación de una función de preferencia individual P en el conjunto de opciones, como un vector $p=(p_1, p_2, \dots, p_n)$, y calculando el producto de ese vector con la matriz de co-ocurrencia:

$$p'_i = \sum_j M_{ij} p_j \quad (4.93)$$

Pudiéndose definir una matriz de co-ocurrencia general:

$$M_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n p_i^k p_j^k}{\sum_{k=1}^n p_j^k} \quad (4.94)$$

4.3.2 Modelo de los Peatones

Las personas conforman un tejido urbano basado en sus movimientos, ya sea en vehículos o a pie. Los movimientos indican la vitalidad de la ciudad, por lo que comprender el patrón de movimiento de las personas, ayuda a comprender a la ciudad. En general, los planificadores urbanos se interesan en los movimientos de las personas, para evaluar las características de calidad de una ciudad [174]. Por ejemplo, el comportamiento de los peatones en una ciudad, es influenciado tanto por la configuración como por la ubicación de los lugares de interés, las facilidades peatonales, etc. También, los comerciantes tienen interés en la comprensión de la forma en que la gente se mueve, para situar sus tiendas en zonas que puedan atraer a una gran cantidad de gente. Los servicios de emergencia, de información turística, etc., por razones diferentes, tendrían intereses similares de comprensión de los movimientos de la gente.

Así, la necesidad de entender la forma en que la gente se mueve en las ciudades, tiene como objetivo, entre otros, predecir los movimientos de los peatones. Tradicionalmente, los registros de los movimientos de personas en las calles, se han basado en fotografías y en conteos del número de personas que pasan por un sitio, en períodos determinados de tiempo [174]. Aunque estas técnicas pueden establecer cualitativamente el movimiento en un entorno urbano, no pueden explicar las causas ni el comportamiento emergente, derivado desde los movimientos peatonales.

Un modelo basado en agentes, propuesto en [174], considera la actividad de los peatones como el producto de dos componentes distintos:

- La configuración de la red de calles.
- La ubicación de los lugares de interés (tiendas, oficinas públicas, edificios, etc.) en esa red.

Algunas investigaciones sostienen que el principal generador de movimiento de los peatones es la configuración de la red de calles, otros consideran que la distribución de atractores dentro de la red es fundamental. En general, la importancia de atractores en la determinación de los patrones de movimiento de los peatones, en los sistemas urbanos, ha sido largamente reconocida. Las técnicas de interacción espacial o gravitacional, han sido usadas en el modelado de la relación entre atractores y el movimiento. Partiendo de esa idea, modelar la interacción entre dos sitios i, j , puede ser hecha a través de la siguiente fórmula [174]:

$$A_i B_j / f(C_{ij}) \quad (4.95)$$

Donde A_i es la población en i , B_j es alguna medida de la atracción del lugar j , y C_{ij} es una medida del costo o distancia entre i y j . Si C es distancia, f puede representar distancias euclidianas o distancias entre puntos sobre redes de carreteras. Este modelo permite la predicción de la intensidad de la interacción entre el lugar donde la gente empieza su viaje (el orígenes) y donde termina (su destino), y es la base de muchos modelos de planificación del transporte.

Este modelo es adecuado para modelar los patrones generales de circulación, y no para modelar el movimiento de las personas. Un nuevo enfoque de modelado, basado en agentes, que logra modelar el movimiento de los patrones, es también propuesto en [174], el cual es el siguiente: el modelo contiene muchos agentes (al menos decenas), los cuales son la unidad básica de actividad, y permite que emerjan patrones colectivos de movimiento, determinados por las interacciones de los agentes. En términos generales, en dicho modelo, un agente es una unidad autónoma dirigida a un objetivo. Los agentes pueden poseer otras capacidades, además de estas dos (por ejemplo, inteligencia y capacidad de adaptación). El comportamiento del agente es determinado por la información local, y por el conocimiento general que tenga. En las calles se requiere de la capacidad cognitiva de los agentes, para integrar los efectos de la configuración y de los atractores sobre sus comportamientos. Otras características que contribuyen al comportamiento de los agente son: su velocidad, su alcance visual, su fijación en el plan a seguir, etc. La velocidad es simplemente la velocidad máxima de marcha del agente. El rango visual se refiere a la agudeza visual de un agente, y determina qué del medio

ambiente el agente “ve”. La “fijación” describe cómo un agente sigue el plan de actividades pre-establecido⁷⁶. Por otro lado, los objetos en el centro urbano pueden ser estáticos (estacionamientos, paradas de autobús) o dinámicos (llegadas de buces, carros, etc.), estos últimos tienen una tasa de llegada, que sigue una distribución de Poisson.

Otro modelo del Comportamiento Colectivo de los Peatones el cual permite describir el movimientos de las personas, es el denominado Modelo de Fuerza Social (MFS) [138]. El MFS es un modelo que describe los patrones colectivos, que surgen de las interacciones entre muchos peatones. El modelo considera que cada peatón α está sujeto a diversas fuerzas, las cuales son descritas a continuación [138]:

- Fuerza Impulsora. Es la fuerza que impulsa a un peatón al destino determinado donde quiere llegar. Normalmente, el peatón toma el camino más corto posible, siguiendo una dirección $\overline{e}_\alpha(t)$, definida como:

$$\overline{e}_\alpha(t) = \frac{\overline{r}_\alpha^k - \overline{r}_\alpha(t)}{\left| \overline{r}_\alpha^k - \overline{r}_\alpha(t) \right|} \tag{4.96}$$

Donde, $\overline{r}_\alpha(t)$ es la posición actual del peatón α en el tiempo t . Además, el peatón en cada momento t se dirige a \overline{r}_α^k (vector de posición del k -ésimo punto más cercano a α , en el camino más corto al sitio destino). Si el movimiento de un peatón no se altera, camina hacia la dirección deseada $\overline{e}_\alpha(t)$ a una cierta velocidad deseada v_α^0 . Partiendo de lo anterior, la fuerza impulsora es:

$$\overline{F}_\alpha^0(v_\alpha, v_\alpha^0, \overline{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \overline{e}_\alpha - v_\alpha) \tag{4.97}$$

Donde, \overline{v}_α es la velocidad actual, y τ_α es el tiempo de relajación en el cual no hay mayores cambios de velocidades en el peatón.

⁷⁶ Agentes con alta fijación siguen su plan casi exactamente, mientras que con fijación baja se distraen con facilidad, visitando tiendas, e incluso, alejándose de su plan original.

- Efectos Repulsivos. El movimiento de un peatón α es influenciado por los otros peatones. En específico, el peatón se mantiene a cierta distancia de los otros peatones, la cual depende de la densidad de peatones y de su velocidad deseada v_α^0 . Para ello, se consideran los efectos de repulsión hacia los demás peatones β , definidos por el vector⁷⁷:

$$\overrightarrow{F_{\alpha,\beta}^0}(\overrightarrow{r_{\alpha,\beta}}) = -\nabla_{\overrightarrow{r_{\alpha,\beta}}} V_{\alpha,\beta}(\overrightarrow{r_{\alpha,\beta}}) \quad (4.98)$$

Donde, $V_{\alpha,\beta}$ es el potencial repulsivo, el cual define la distancia entre el peatón α y los otros peatones β , y $\overrightarrow{r_{\alpha,\beta}}$ es la anchura del paso del peatón β (se asume que el peatón, al dar cada paso, respeta la “esfera privada” de los otros peatones).

Por otro lado, un peatón también se mantiene a una cierta distancia de los muros, edificios, obstáculos, calles, etc. Por lo tanto, existe otro efecto repulsivo con los bordes B de esos objetos, descrito por:

$$\overrightarrow{F_{\alpha,B}}(\overrightarrow{r_{\alpha,B}}) = -\nabla_{\overrightarrow{r_{\alpha,B}}} U_{\alpha,B}(\overrightarrow{r_{\alpha,B}}) \quad (4.99)$$

Donde, $U_{\alpha,B}$ es un potencial repulsivo y monótono decreciente, y $\overrightarrow{r_{\alpha,B}}$ indica la ubicación del borde B más cercano al peatón α .

- Efectos de Atracción. Por otro lado, los peatones son a veces atraídos por otras personas (por ejemplo, artistas en la calle, amigos, etc.) u objetos (por ejemplo, vidrieras de tiendas, etc.). Estos efectos de atracción, son descritos por la fuerza de atracción del peatón $\overrightarrow{F_{\alpha,i}}$, con respecto al i -ésimo elemento atractor. Lo anterior puede ser modelado, por un potencial atractivo monótono creciente $W_{\alpha,i}(\overrightarrow{r_{\alpha,i},t})$:

$$\overrightarrow{F_{\alpha,i}}(\overrightarrow{r_{\alpha,i},t}) = -\nabla_{\overrightarrow{r_i}} W_{\alpha,i}(\overrightarrow{r_{\alpha,i},t}) \quad (4.100)$$

⁷⁷ El símbolo $-\nabla$ indica que los gradientes son negativos, ya que la función es decreciente. Además, el signo negativo garantiza que el valor obtenido para la fuerza respectiva será positivo.

Donde $\overline{W_{\alpha,i}}$ es el potencial atractivo que depende del tiempo, ya que la atracción $\overline{F_{\alpha i}}$ es normalmente decreciente con el tiempo t debido a que el interés va disminuyendo, y $\overline{r_{\alpha,j}}$ es la distancia de i con respecto al peatón α .

A partir de esas expresiones, se puede definir la ecuación para la motivación total de un peatón ($\overline{F_{\alpha}}(t)$) igual a [138]:

Fuerza impulsora + Fuerza repulsiva con respecto a los otros peatones
 + Fuerza repulsiva con respecto a los bordes o fronteras + Fuerza de atracción.

Tomando la formalización de dichas fuerzas definidas previamente, $\overline{F_{\alpha}}(t)$ es definida como:

$$\overline{F_{\alpha}}(t) = \overline{F_{\alpha}^0}(v_{\alpha}, v_{\alpha}^0, e_{\alpha}) + \sum_{\beta} \overline{F_{\alpha,\beta}^0}(\overline{r_{\alpha,\beta}}) + \sum_B \overline{F_{\alpha,B}}(\overline{r_{\alpha,B}}) + \sum_i \overline{F_{\alpha i}}(\overline{r_i}, t) \quad (4.101)$$

Y la dinámica de MFS es definida por:

$$\frac{dw_{\alpha}}{dt} = \overline{F_{\alpha}}(t) + \text{fluctuaciones} \quad (4.102)$$

Donde, $\overline{w_{\alpha}}(t)$ es la velocidad deseada del peatón α . Se le agrega un término de fluctuación, que considera las variaciones aleatorias del comportamiento (es una distribución Gaussiana, perpendicular al vector, que señala la dirección deseada).

4.3.3 Modelo de Ciudades

Las ciudades nos permiten extender la noción de super-organismos, en la escala de la vida humana. Sobre las ciudades, ciertos investigadores han sido capaces de aplicar la lógica del enjambre [96]. Las ciudades evolucionan de manera impredecible, creando zonas urbanas sin ninguna garantía de que las mismas crezcan. Las ciudades se van auto-organizando a través del tiempo, emergiendo zonas ricas o deprimidas, condicionadas por

fuerzas descendientes, tales como las leyes y normas urbanas, sin negar el poder de las fuerzas ascendentes en los procesos de planificación urbana. En particular, esas fuerzas ascendentes no pueden predecir, y muchas veces no se compaginan, con la evolución que sigue la ciudad.

Un ejemplo de modelo de ciudad fue desarrollado por Krugman en 1995, el modelo define una ciudad compuesta por tiendas/empresas, donde cada una decide donde instalarse, en función de donde están ubicadas las otras tiendas/empresas. El modelo supone fuerzas centrípetas, que permiten que las tiendas/empresas se acerquen (eso les permite compartir clientes, servicios urbanos, etc.) y fuerzas centrifugas que las alejan (compiten por espacio, clientes, etc.). Ese modelo se caracteriza por [96]:

- Una tensión entre las dos fuerzas, que permite el equilibrio entre ellas.
- Un rango de acción para cada fuerza, tal que el de la fuerza centrípeta es más corta que el de la fuerza centrifuga, lo que permite que las tiendas/empresas semejantes estén cerca, pero no demasiado cerca.

El modelo genera patrones espontáneos de centros comerciales/empresariales, claramente separados entre sí. El proceso auto-organizativo de la ciudad, permite ver en el tiempo, como las tiendas/empresas logran reunirse en grupos bien diferenciados. A partir de una única microconducta (estar cerca de tiendas similares), el modelo es capaz de generar una macroconducta a nivel de la ciudad (patrones de organización/ubicación de las tiendas/empresas).

Esa idea desarrollada a través del modelo de Krugman, puede ser extendida para explicar el comportamiento de las diferentes zonas urbanas que componen una ciudad. Por ejemplo, se puede explicar la formación de barrios en una unidad superior llamada ciudad. Dichos barrios surgen a partir de miles de interacciones locales, que se dan en la ciudad. Los barrios son patrones en el tiempo, que emergen a partir de consensos tácitos [96]: la zona financiera se ubica en una zona determinada, los bares en otra, las tiendas de venta de automóviles en otra, las prostitutas en otra, y así sucesivamente. Esos patrones de esas zonas urbanas, son caracterizados por sus dinámicas culturales, que determinan sus actividades, habitantes que las frecuentan, reglas sociales que las rigen, formas urbanísticas que se

dan, lógicas que se perciben en sus aceras, entre otras cosas. Sus habitantes viven en dichas zonas, siguiendo las normas sociales que les son propias a su patrón, sin que ninguna autoridad las ordene.

Algunos investigadores han combatido la forma de planificación urbana burocrática, que saca a la gente de las calles, que no considera como vital la circulación peatonal; porque reconocen que el orden y vitalidad de las ciudades se da en las calles, en las reuniones improvisadas e informales que se dan en ella [96], en las miles de interacciones entre los peatones. Esos espacios (las calles, sus aceras, etc.), son los que permiten la emergencia de la vida de la ciudad. De esta manera, han criticado soluciones de planificadores urbanos, que han creado grandes asentamientos urbanos deshumanizados, alejados de la vida de la ciudad.

En particular, las aceras son los conductores de base, de los flujos de información entre los residentes de una ciudad [96]. En ellas se dan procesos de (re)conocimientos del otro, intercambio de información, etc., ya sea porque vemos o hablamos con otros, de manera indirecta a través de los comercios, de la publicidad, etc., o de cualquier otra forma que emerja desde su propia dinámica. Las aceras, y cualquier otro espacio público que sea un conductor primario de información (parques, etc.), proporcionan a la ciudad, el tipo y la cantidad correcta de interacciones locales, que ella requiere para su auto-organización. Esto es lo que algunos autores han llamado la “cultura de las aceras”, que permite explicar cómo desde su diversidad, desde su dinámica, la vida de la ciudad puede mejorarse. El valor del intercambio que se da en las aceras, reside en como beneficia al supra-organismo llamado ciudad, como coadyuva a su orden global. La vida de la ciudad depende de poder disipar información/interacciones entre desconocidos, para cambiar sus comportamientos individuales (por ejemplo, decidirse mudarse a un barrio porque le atrajo lo visto/escuchado, etc.). Así, la diversidad de las aceras cobra su sentido, cuando es capaz de alterar conductas. Todo esto es mucho más complejo y difícil, en ciudades mediadas por las autopistas, donde la posibilidad de interacción desde vehículos, es muy efímera y disipativa.

Podemos concluir que una ciudad, es un sistema emergente y auto-organizado a través de sus espacios públicos (en particular, las aceras). Ellas son un organismo de nivel superior, que reflejan la emergencia de formas, patrones generados por sus componentes de una escala inferior (sus

habitantes). Un humano toma decisiones conscientes de dónde ir, que hacer, etc. Eso hace que los patrones sociales que se conciben/emergen en una ciudad, son mucho más complejos que los que se encuentran en las sociedades de insectos. Son patrones multidimensionales, que toman en cuenta la complejidad de los humanos (su cultura, sus intereses, etc.).

Lo resaltante de lo dicho hasta ahora, es que es necesario pensar en la ciudad en la misma escala que se piensa en una colonia de insectos (en la escala de un super-organismo). En las ciudades, como en las sociedades de insectos, los humanos van tomando decisiones vinculadas a su supervivencia diaria (que abarca al menos el periodo de sus vidas), las cuales afectan la escala milenaria definida por ellas⁷⁸. Esas decisiones individuales conscientes, contribuyen al macrodesarrollo de la ciudad, la cual crece, evoluciona y aprende en ciclos de miles de años, producto de muchas generaciones.

De esta manera, las ciudades es uno de los super-organismos más competente del planeta, porque han tenido la capacidad de evolucionar [96]: atraer poblaciones migratorias, alentar tasas de natalidad, desaparecer en condiciones difíciles, etc. Puede debatirse si para la humanidad, la ciudadalización es una virtud o no, lo cierto es que la población mundial se ha venido concentrando en grandes asentamientos urbanos, los cuales han venido evolucionando en el tiempo. Ese super-organismo social ha triunfado sobre otras formas sociales. Una de las razones es por la inteligencia colectiva, que emerge desde su dinámica (como en el caso de las colonias de insectos), que le permite almacenar y recabar información, para reconocer y responder a patrones de conducta humana. Todos los individuos contribuimos en ese proceso, sin percatarnos.

En este caso, el proceso de aprendizaje en la ciudad es vital. Se entiende por aprendizaje la capacidad de poder almacenar información, saber cómo encontrarla, poder reconocer y responder a cambios de patrones, entre otras cosas. Como cualquier sistema emergente, la ciudad per se es un patrón emergente en el tiempo, producto de múltiples generaciones, donde las perturbaciones (cambios de gobiernos, innovaciones tecnológicas, etc.) van amoldándolo (en Florencia los hiladores de seda han estado agrupados en las mismas zonas por cientos de años, igual que la

⁷⁸ En el caso de las colonias de insectos, cada insecto toma decisiones individuales que afectan a la colonia como un todo.

zona roja de Ámsterdam, ajustándose a la evolución de la ciudad).

Algunos de esos patrones se mantienen, porque están vinculados a estructuras físicas (iglesias como la de San Pedro han permitido la existencia de un barrio religioso alrededor de ella, puentes como el de Rialto de Venecia han mantenido una dinámica turística alrededor de él, etc.), pero otros han surgido por las leyes de la emergencia (por ejemplo, el barrio de los hilares de seda no tienen una estructura física atractora). Y esto es así no por holgazanería (pereza para mudarse), sino por la emergencia cultural que se da en la escala de miles de años. Las ciudades están dotadas de una fuerza cultural, que mantiene a raya los cambios bruscos que chocan con la historia (a pesar que algunas de esas disrupciones pueden afectarlas para siempre, como las derivadas por una guerra), derivada del proceso de auto-organización que se da en su seno (esa fuerza ha permitido, por ejemplo, que las hiladoras de seda se hayan mantenido unidas, a pesar de que el mundo se ha recreado durante estos últimos miles de años).

Así, la ciudad es una estructura para almacenar y transmitir información (precios del mercado, remedios de enfermedades, etc.), que permite el fenómeno de agregación, para hacer más eficiente el comportamiento de los grupos humanos que se aglomeran. Eso ha permitido la emergencia de muchos inventos, de tecnologías, que incluso pudieron surgir antes, pero no perduraron porque no llegaron a formar parte de la inteligencia colectiva de las civilizaciones, hasta que las ciudades fueron capaces de almacenarlas y transmitir las. Todo ese conocimiento emerge sin que nadie esté consciente de ello, son el fruto de una conducta colectiva, la suma de miles de interacciones locales: compartir, intercambiar, etc.

4.3.4 Comunidades de acceso libre: software libre

En la mayoría de los proyectos abiertos de software de gran escala (Linux, Apache, etc.), el trabajo se realiza típicamente en un entorno distribuido auto-organizado [135]. La falta de una planificación precisa, es compensada por el hecho de que la información sobre el estado actual del proyecto es completa y libremente disponible, lo que permite contribuir en cualquier cosa en cualquier momento. Esto proporciona una diversidad mucho mayor de puntos de vista, y experiencias, que se aplican al abordar

los problemas. Por otra parte, ya que los contribuyentes seleccionan las tareas a trabajar, tienden a estar más interesados, motivados, y son más conocedores de esas tareas. Los proyectos abiertos atraen a un mayor número diverso de participantes, y aumentan la fertilización cruzada de sus ideas combinadas. Esta fuerza, acelera la capacidad de producir novedad. Esta comunidad grande y diversa, además mejora la selección, ya que las nuevas ideas se pondrán a prueba en muchas circunstancias diferentes. En general, esto conduce a una mayor flexibilidad, innovación y fiabilidad.

En particular, el software es construido como resultado de un esfuerzo colectivo, sin una coordinación central [23]. *La coordinación estigmérgica* explica cómo los actores pueden afectar el comportamiento de otros miembros de la comunidad, a través de las huellas que dejan en sus actividades o artefactos compartidos. Esta colaboración tiene implicaciones para *la congruencia socio-técnica* del proyecto. La idea de congruencia socio-técnica, como factor de éxito en la coordinación del desarrollo de software, sostiene que la tarea de desarrollo de software genera dependencias que se gestionan a través de un conjunto de estructuras sociales y organizacionales, que permiten a los desarrolladores coordinar sus acciones. La congruencia significa que la capacidad de coordinación, parte de las necesidades sobre la base de la estructura del software. Esa coordinación ocurre a través del propio código, en particular, porque el código se deposita dinámicamente en un repositorio compartido por todos.

El Software Libre (SL) ha crecido como una alternativa al enfoque clásico convencional de desarrollo de software [135]. El SL es un software desarrollado de manera abierta, lo que significa que el código fuente está disponible para su inspección y reutilización. A menudo, el desarrollo se lleva a cabo por un grupo de voluntarios, caracterizado por un desarrollo distribuido, produciendo un software rápido y fiable. Son muchas las comunidades que actualmente trabajan en torno a proyectos de SL, sin embargo, sólo algunas, por su éxito y evolución, han llegado a ser modelos a referenciar. Entre estas se pueden mencionar: comunidad encargada del desarrollo del núcleo del sistema operativo Linux (www.kernel.org); comunidad que desarrolla Apache (servidor web de mayor implantación en la actualidad, www.apache.org); comunidad de Mozilla (navegador web y multiplataforma de desarrollo de otras aplicaciones web, www.mozilla.org). La forma de desarrollo clásica en las comunidades de desarrollo de

SL, es la del estilo bazar⁷⁹. Basado en ese enfoque, las comunidades de SL poseen los componentes y procesos claves para comportarse como un sistema auto-organizado y emergente, de manera tal, que la calidad del software desarrollado es el resultado del esfuerzo colectivo realizado por la comunidad.

El trabajo de desarrollo de software en los equipos de software libre es altamente individual. Los investigadores han encontrado varias explicaciones [135], pero la que nos interesa en este caso es:

- La ausencia de comunicación directa entre los actores. Sin embargo, son capaces de lograr en conjunto, la producción de software a través de una coordinación implícita y estigmérgica. La estigmérgica permite estar cooperando de forma organizada y coordinada, sin embargo, a nivel individual, parecen estar funcionando solos, como si no tuviesen ninguna interacción con los demás actores de la comunidad (como en las colonias de insectos). La estigmérgica da así una explicación. La falta de comunicación directa es, por lo tanto, motivada por el hecho de que toda la información necesaria para los desarrolladores, ya se ha incrustado en las huellas de sus trabajos.

Teniendo en cuenta la congruencia socio-técnica y la coordinación estigmérgica en proyectos de software libre, podemos identificar tres aspectos claves en estas comunidades:

- La coordinación se puede dar a través de la comunicación indirecta entre los actores;
- La interacción estigmérgica es siempre mediada por artefactos, u otras huellas, dejadas por los actores en el medio ambiente;
- El medio ambiente y el artefacto tienen un papel activo, como mediadores, como espacio de acumulación de estímulos, etc.

Cualquier actividad de la comunidad en su sitio Web (cambios en las líneas de código, nuevos documentos revisados, correos electrónicos, etc.), es una alteración del entorno comunitario, y en específico, es una

⁷⁹ En la metodología estilo bazar, el código está disponible para los usuarios, con la finalidad que ellos también puedan detectar errores, aportar soluciones, e ir construyendo el programa de manera colaborativa. No existe un único “propietario” del programa, se distribuyen las responsabilidades y tareas. En consecuencia, se libera con frecuencia una versión, para poder obtener una mayor cantidad de correcciones [135].

huella dejada por los miembros. Cuando un miembro de la comunidad descubre algo en su entorno virtual (un error, una posible nueva función, etc.), puede tratar de resolver el problema (y después de tener la solución, dejar un nuevo rastro de su actividad), o esperar hasta que alguien encuentre una solución. Tres aspectos son claves en los proyectos de software libre, para garantizar la coordinación estigmérgica [135]:

- El código debe ser transparente y accesible para todos los miembros de la comunidad,
- El lenguaje de programación utilizado en el proyecto, y las normas y medidas tomadas por la comunidad de software libre, facilita la comprensión correcta y el uso del código,
- Los desarrolladores añaden líneas de código sobre las líneas de código subidas por otros, como la metáfora biológica en las termitas, que agregan material para construir sus nidos sin coordinación directa.

Así, como ya se dijo, la coordinación estigmérgica es a través de los repositorios de software. Los actores dejan huellas de sus acciones en el código, y leen y reflexionan sobre el código escrito por otros, a fin de tener una acción coordinada. En tales situaciones, el código influye en las conductas de los actores, y los comportamientos de los actores, al mismo tiempo, influyen en la forma del nuevo código.

Otros ejemplos conocidos de comunidades de acceso abierto son Wikipedia⁸⁰, la enciclopedia internacional más grande en existencia, y World Wide Web en sí mismo, una colección de aplicaciones para la distribución transparente de documentos hipermedia a través de Internet [88, 89]. Estos progresos están revolucionando a nuestra sociedad. Todas esas experiencias están siguiendo, simplemente, la filosofía básica científica: publique sus datos e ideas tan extensamente como sea posible, de modo que otros puedan utilizarlas, criticarlas, y mejorarlas.

4.3.5 Modelo de Burocracia

La burocracia puede ser encontrada en gobiernos, corporaciones, y otras instituciones sociales. Así, ejemplos de burocracias pueden encontrarse

⁸⁰ Wikipedia es una enciclopedia de contenido libre que todos pueden editar. Esta enciclopedia es el resultado de un trabajo colectivo, donde cada artículo es el producto de múltiples contribuciones, que son mejoras y extensiones de un borrador inicial.

en los sectores públicos y privados (sistemas de colección de impuestos, servicios de migración, instituciones académicas, etc.). La eficacia de una burocracia se relaciona con el cumplimiento de sus metas, por lo que sería deseable aumentar su eficacia funcional. En la práctica, como la mayoría de la gente ha experimentado, esto es lejos de ser el caso [73, 76]. La corrupción, la rigidez, y los retardos, son apenas algunos ejemplos de los obstáculos que imposibilitan la eficacia en las burocracias.

Además, en vez de intentar predecir todas las funcionalidades de antemano de una organización, ella debería poder adaptarse a las demandas de cambio de su ambiente. Por ejemplo, el proyecto Cybersyn, desarrollo en Chile parcialmente, puesto que se puso fin por el golpe militar de 1973, tenía esa finalidad [73, 76]. Ese proyecto propuso un “sistema nervioso” para el país, en donde la información diaria de producción y demanda de las comunidades/fábricas, fuera comunicada a todos los interesados. Si bien en su primera fase existía una especie de cerebro central, que recibía la información (que priorizaba demandas, etc.), era predecible pensar en su distribución a todos los interesados, para explotar las capacidades emergentes de ese sistema nervioso.

En general, la ciencia organizacional ha desarrollado varios conceptos, que son útiles para mejorar la auto-organización y permitir la adaptación de las burocracias [73, 76]. Para diseñar burocracias auto-organizadas, las organizaciones se pueden modelar como sistemas de tratamiento de la información (R), donde un agente es una entidad que actúa en su ambiente. De esta manera, no sólo la gente puede ser descrita como agentes, sino también departamentos, ministerios, y gobiernos. Los agentes pueden tener metas, ser descritos por un observador, ser cognoscitivos porque necesitan “saber” qué acciones tomar para alcanzar sus metas, etc. Así, una descripción de la burocracia puede ser hecha, en términos de agentes que intentan satisfacer metas para aumentar su satisfacción. El público puede también ser descrito como agente, obrando recíprocamente (externamente) con la burocracia. Sin embargo, la satisfacción de un agente puede estar en conflicto con la satisfacción de otro agente. Se puede hablar de dos variables [76]: la fricción y la sinergia. La fricción tiene que ver con, cómo un agente disminuye la satisfacción de otro agente al aumentar su satisfacción. La sinergia se refiere a, cuando el comportamiento de un agente aumenta la satisfacción de otro agente. De esta manera, la fricción debe ser reducida al mínimo y la sinergia maximizada.

Las metas de una burocracia se relacionan con su función particular. Esta función puede ser co-resuelta por el estado, por el público, y/o por la burocracia misma. La eficacia podía ser una manera de evaluar a la burocracia, pero aun está el problema de cómo medir la eficacia. En general, la eficacia puede ser medida en términos de tiempos vinculados a retardos. El retardo dependerá de varios factores [76]: retardo en las decisiones, retardo en tareas anteriores, retardo de otras respuestas, etc. Una visualización de las interacciones dentro de la burocracia (quién se comunica con quién), podría proporcionar ideas para mejorar su diseño (por ejemplo detectar agentes o interacciones redundantes, o crear “atajos” para los agentes que se comunican con frecuencia).

Por otro lado, para adaptarse a los cambios imprevisibles, las burocracias requieren flexibilidad. Los ajustes deben ser realizados, pero la función necesita ser preservada. Se requiere la robustez, de modo que lo que hagan las adaptaciones no evite que la burocracia alcance sus metas. Una burocracia debe auto-organizarse, modificando en tiempo real sus propias estructuras, una vez que se sabe de dónde vienen las fricciones. Las soluciones pueden variar, dependiendo de la naturaleza de la fricción: asignar más individuos a un departamento, substituir a individuos, o reorganizar departamentos. Es auto-organizado, porque los cambios son dictados por el comportamiento de la misma burocracia.

El papel de los sensores en la organización es relevante, sin los sensores apropiados, no habrá bastante información para tomar decisiones apropiadas. Los sensores permiten percibir y digerir información relevante a sus metas. Sin los sensores apropiados, ninguna auto-organización ni adaptación puede ocurrir. También, los sensores pueden ser usados para medir la eficacia de una burocracia. Una variable popular, relacionada con la eficacia, es la satisfacción pública [73, 76]: si el público es feliz con los servicios proporcionados por la burocracia, entonces su eficacia puede ser asumida. Las encuestas son un tipo de sensor para medir la satisfacción pública, pero exigen cierto esfuerzo del público y de recursos, para diseñarlas y analizarlas. En general, las burocracias deben desarrollar diferentes tipos de sensores, algunos, incluso, que no requieran la participación pública.

Para visualizar las burocracias se pueden usar redes, donde cada nodo representa un agente (en una escala particular), y los arcos representan interacciones entre los agentes (ver figura 4.31). Una red que representa una

burocracia no es homogénea, puesto que diversos papeles son tomados por diversos agentes. En un sistema donde demasiados agentes necesitan obrar recíproca e inmediatamente (por ejemplo, la Unión Europea con sus miembros), la complejidad de las interacciones puede ser demasiado difícil de manejar. La modularidad puede ayudar a hacer frente a la complejidad, si algunas decisiones se toman localmente (por ejemplo, grupos de cinco países son encomendados a discutir un aspecto) (Figura 4.31.c). Un equilibrio en los modelos de burocracia se debe buscar, donde los agentes puedan tomar decisiones, y obrar recíproca y eficientemente como sea posible.

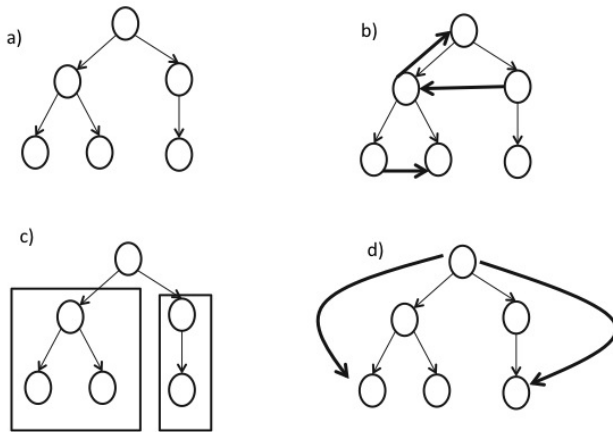


Figura 4.31. Burocracia representada como red⁸¹. a) Red jerárquica estricta. b) El aumento de interacciones y dependencias rompe la jerarquía. c) Módulos pueden ser creados, cuando demasiadas interacciones causan retrasos. d) “Atajos” se pueden hacer, para evitar intermediarios (basado en [73, 76]).

En [76] proponen que la complejidad un sistema escala con respecto a:

$$C_{\text{sist}} \approx \begin{cases} \#E \\ \#I \\ \sum_{j=0}^{\#E} C_{e_j} \\ \sum_{j=0}^{\#I} C_{i_j} \end{cases} \quad (4.103)$$

⁸¹ Las flechas indican dependencias.

Donde, #E es el número de elementos en el sistema, #I es el número de interacciones, y C_e , C_i son la complejidad, tanto de los elementos como de las interacciones entre ellos. La complejidad de una interacción C_i es el número de posibles diferentes interacciones entre dos elementos vinculados por esa interacción.

De la ecuación 4.103 podemos deducir, que más interacciones implican una complejidad más alta del sistema⁸². Una característica deseable de las redes burocráticas, es que las interacciones entre los agentes no necesiten muchos intermediarios, lo que se necesita es que se reduzcan las fricciones y se maximice la sinergia. En este panorama, una jerarquía burocrática debe ser dinámica y cambiar cuando sea necesaria. Estos cambios deben ser emergentes, porque la reestructuración debe venir desde dentro de la institución, dirigida por su propia dinámica.

La emergencia permite mejorar el funcionamiento organizacional. Veamos el siguiente caso: los agentes en una organización con largas colas, causan más fricción que los otros, debido a que tendrán un tiempo de respuesta alto, para los agentes que dependen de él. Un criterio muy simple para reestructurar una red, es identificar el agente con la cola más larga (A). Entonces, el agente con un retardo en sus respuestas (B), que depende del agente con la cola más larga, cambia su dependencia al agente con la cola más corta (C). En una burocracia real, esto es posible. El cambio de la dependencia de B, de A a C, debe ser un proceso que emerja de la propia dinámica interna, para que sea cónsono con la realidad organizacional.

Lo que vemos es que la emergencia, por un proceso de auto-organización, mejora el funcionamiento organizacional. Lo que no es obvio, es el efecto preciso que esto tendrá en el rendimiento global, es decir, el impacto del cambio. La auto-organización no asegura el óptimo, sino la adaptabilidad. Así, las técnicas de auto-organización mejoran la eficacia de diversos aspectos de las burocracias. Todas las mejoras tienen que ver con disminución de retardos, reduciendo de fricciones, etc.

⁸² Una organización será más compleja que otra si tiene más divisiones, si sus divisiones tienen más empleados, si las divisiones tienen más canales de interacción, y/o si sus canales de interacción implican más personas.

La tecnología ha ayudado en la reducción de los retardos de la decisión. Las bases de datos electrónicas proporcionan información inmediata. Las decisiones de sistemas informáticos reducen retardos, reducen la fricción, mejoran la comunicación, aumentando la eficacia. Esto nos hace ver que nuevas formas de auto-organización seguirán emergiendo, derivadas de los cambios tecnológicos.

La idea principal de hacer los cambios es la siguiente [73]: primero, detectar cómo cada agente afecta la satisfacción de los otros. Entonces, cambiar las relaciones respectiva para reducir al mínimo la fricción y para promover la sinergia. Esto se puede alcanzar por reforzamiento: los comportamientos que se han probado que son ineficaces deben ser evitados, y los beneficiosos deben ser promovidos. Los cambios se podrían introducir gradualmente, y con cierta redundancia, para comparar sus ventajas y desventajas.

Capítulo 5: Algunos Retos de la Emergencia

En general, las propiedades emergentes pueden ser usadas computacionalmente para muchas cosas, por ejemplo, en la concepción de sistemas de software compuestos por un gran número de componentes sencillos⁸³ [94]. Algunas propiedades colectivas emergentes interesantes a explotar computacionalmente, incluyen las capacidades para generalizar, reconocer, categorizar, y corregir errores, entre otros. Pero, para su posible explotación computacional, es fundamental estudiar los problemas de embotellamiento y complejidad, derivados del hecho de que el número de interacciones posibles, crece exponencialmente con el número de componentes [87]. En este capítulo final, daremos cuenta de algunos trabajos, que desde las ciencias computacionales se han acercado a la teoría emergente, ya sea para estudiarlos en detalle, para proponer sistemas artificiales emergentes, o porque consideran aspectos cercanos a dicha teoría.

5.1 Sistemas Emergentes Artificiales Computacionales

En los años últimos, el uso de las computadoras ha crecido espectacularmente [20]. Las formas de desarrollo de software clásicas por descomposición en módulos, no garantizan la funcionalidad del software, dada la gran variedad de módulos, y sus complejas formas de interacciones y de combinación. Además de esto, el uso masivo y ubicuo de recursos distribuidos a través de la red, aumenta las dificultades del diseño y mantenimiento del software. El desafío es encontrar nuevas formas de desarrollar, diseñar y mantener el software, considerando sus complejidades cada vez mayores, confiriéndole a dichos sistemas altas propiedades de confiabilidad y robustez. Para esto, y debido a las semejanzas, parece oportuno mirar los sistemas emergentes (biológicos, físicos, sociales, etc.), para entender sus mecanismos, y los procesos que permiten su funcionamiento. En general, dichos sistemas, integrados por componentes autónomos, exhiben aptitudes para realizar tareas complejas sin ningún

⁸³ En este caso, emulando el comportamiento de algunos sistemas biológicos, físicos, etc., donde a partir de un gran número de elementos simples, las interacciones entre ellos producen un eficiente comportamiento colectivo (por ejemplo, el cerebro, la estabilidad magnética, los patrones de flujo de los fluidos, etc.).

control global⁸⁴. Además, pueden adaptarse a sus alrededores por necesidad de supervivencia, o para mejorar el funcionamiento colectivo.

Inspirado en lo anterior, los sistemas artificiales emergentes a construir, no deben describir la actividad colectiva a observar en ningún componente, sino que debe emerger desde las interacciones entre las partes [71]. Así, los objetivos, las funciones, y en general, el propósito de dichos sistemas, no debe ser diseñado, programado, o controlado, explícitamente. Los componentes deben obrar libremente, adaptándose para alcanzar una configuración “deseada” (atractor), que permita que emerja el propósito del sistema. Esto es fundamental en situaciones, donde el observador (por ejemplo, el diseñador del software) no puede a priori concebir todas las configuraciones, propósitos, o problemas posibles, que el sistema debe enfrentar, muy común en los sistemas informáticos complejos⁸⁵. En esta sección, presentaremos algunos conceptos o áreas de la informática, vinculadas a los sistemas emergentes.

5.1.1 Juegos Emergentes

El concepto de juego emergente da comienzo a una etapa importante en los videojuegos [153, 179, 180, 181, 182, 183]: el devenir del juego se adapta al jugador. Para ello, es necesario contar con videojuegos autónomos, capaces de interactuar con los jugadores, sin restringir sus libertades, tal que sus personajes puedan explotar la información disponible de sus usuarios, interactuar con ellos, crear narrativas desde sus experiencias, entre otras cosas.

En general, el juego emergente puede verse como un concepto, donde la emergencia se basa en la creación de un mundo dinámico, autónomo, en el cual se va a desarrollar el juego. Las acciones del jugador podrán influir en el mundo que le rodea, pero este tiene la capacidad de auto-regularse, surgiendo de forma espontánea ante el jugador, elementos del juego no predefinidos.

La emergencia máxima en un juego, se produciría cuando este es capaz de utilizar los elementos básicos que son proporcionados por el desarrollador del juego y las experiencias previas del mismo juego, para hacer

⁸⁴ Por ejemplo, la sincronización al aplaudir en una muchedumbre.

⁸⁵ Por ejemplo, los sistemas de gestión empresarial, la Web Semántica, un SCADA, etc.

emerger uno completamente nuevo (por ejemplo, nuevas historias, estrategias, reglas, etc.). De esta manera, un juego emergente podría permitirle al jugador, jugarlo de una manera que no fue diseñado o implementado por el desarrollador.

En general, un juego emergente se desarrolla en un ambiente simulado simplificado de la realidad. La historia se integra en ese mundo, gracias a una serie de objetivos, que el jugador debe cumplir para poder seguir avanzando en la historia, siendo lo novedoso la viveza y autonomía del entorno, y su influencia en la evolución del juego, tal que el jugador debe estar atento a los cambios que se producen en él. En un juego emergente dos sesiones del mismo pueden distar mucho entre sí, ya que la variabilidad del entorno y el indeterminismo de sus cambios gobiernan el juego. Así, aunque los objetivos de los jugadores fuesen los mismos, la dinámica emergente del juego hace que cada sesión se transforme en un reto diferente.

5.1.1.1 Bases Teóricas

Los juegos emergentes responden de manera realista a las acciones de los jugadores, y son capaces de interactuar con ellos. En un juego emergente, con un conjunto relativamente simple de reglas, se genera un juego complejo que tiene vida propia, más allá de lo que hagan los jugadores, tal que el entorno puede responder a sus acciones, construyendo una historia que podría ser en esencia la misma, pero expresada en forma muy distinta, adaptada a las preferencias del jugador [105, 134, 153, 179, 180, 181, 182, 183, 184]. Así, el guión no está escrito de antemano, la historia no es única, y no hay un camino marcado ni un final único.

Los juegos emergentes requieren de un nivel de interactividad elevado. Además, buscan explotar la creatividad del ser humano. En un juego emergente, el diseñador pierde su papel principal, ya no es más un creador del juego en el sentido de “producto”, sino que se convierte en aquel que abona el terreno, y dispone el entorno adecuado para que el nacimiento del juego tenga lugar.

Como dijimos antes, la emergencia en los juegos es posible gracias a la definición de reglas simples, globales, del comportamiento y de las propiedades de los objetos del juego, así como a la interacción entre el

mundo del juego y el jugador. La emergencia del juego permite que el mundo del juego pase a ser más interactivo y reactivo, creando una gama más amplia de posibilidades para las acciones, estrategias, etc. Las formas de emergencia se expresan de diferentes maneras [105, 134, 153, 179, 180, 181, 182, 183, 184]:

- Una emergencia se produce cuando una sección de un juego permite que surja un nuevo comportamiento.
- Una emergencia se produce cuando las reglas simples de bajo nivel, y las propiedades de los objetos del juego, interactúan para crear un juego nuevo, de alto nivel, que altera el funcionamiento del juego en su conjunto.
- Una emergencia se produce cuando en un juego, debido a las decisiones de los jugadores, surge un nuevo comportamiento en el juego.

Los juegos emergentes proporcionan una diversidad de ambientes y situaciones, en las que nos podemos entrenar (por ejemplo, equipos de fútbol de robots podrían aprender a jugarlo y entrenarse en estos ambientes, antes de ir a competencias, o un piloto de avión podría entrenarse en estos ambientes, antes de volar). Particularmente, con los juegos emergentes podemos desarrollar nuestra inteligencia [105, 134, 153, 179, 180, 181, 182, 183]:

- Los juegos emergentes explotan la *inteligencia emocional*. Nuestras emociones son formas de optimización, nos dan sensaciones físicas que nos ayudan a tomar decisiones, que ayudan a nuestra supervivencia. Los juegos emergentes ofrecen un marco para el desarrollo de la inteligencia emocional.
- Los juegos emergentes explotan la *Inteligencia Social*, la cual está basada en entender las interacciones entre las personas. Una enorme porción de nuestro cerebro se dedica a hacer frente a situaciones sociales, para comprender las instituciones y convenciones sociales, y para desarrollar las teorías acerca de cómo otras personas se comportan. Una vez más, los juegos emergentes proporcionan un lugar para desarrollar esas habilidades sociales.
- Los juegos emergentes proporcionan un contexto más simple para refinar la *inteligencia física*. La inteligencia física está vinculada con el aprendizaje, para controlar y ajustar nuestros movimientos físicos (por ejemplo, el de una bailarina cuando está interpretando una obra).

Ahora bien, algunos de los tipos de emergencia que se dan en los juegos emergentes son [105, 134, 153, 179, 180, 181, 182, 183]:

- *Emergencia intencional*: se produce cuando los usos creativos del juego son predefinidos por los diseñadores del juego. Juegos como Cosmic Encounter⁸⁶ o Dungeons & Dragons⁸⁷ son de ese tipo, proporcionando a los jugadores reglas relativamente simples, que intencionalmente los alientan a explorar estrategias creativas para el logro de la victoria o la meta. Esta emergencia también puede ocurrir en juegos de composición, por ejemplo, el juego Scribblenauts⁸⁸ de Nintendo permite al jugador almacenar miles de objetos en su base de datos. Con ellos, el juego reta al jugador a encontrar las maneras para alcanzar una meta, combinándolos.
- *Emergencia accidental*: se produce cuando los usos creativos de los videojuegos, no son derivados de las intenciones de los diseñadores del juego. La emergencia de juego puede surgir por la creación de efectos inesperados, incluso para los desarrolladores de software. Esto puede ser ya sea por un fallo de software, el juego funciona normalmente pero con resultados inesperados, o cuando se juega de una manera anormal, que el software permite. Ejemplos de lo anterior son en el caso de enfermedades genéticas no planeadas en juegos de criaturas donde eso sea importante, o el fallo en el caso del juego de Tribus, que permitía a los jugadores moverse hacia arriba o abajo de una pendiente pronunciada, rápidamente, pulsando la tecla de salto, ganando velocidad sustancial en el proceso⁸⁹, o en el caso del juego de lucha Street Fighter II⁹⁰, donde los jugadores expertos descubrieron que al combinar varios ataques no dejaban tiempo para que sus adversarios se recuperasen.

Pero también la emergencia se ve en las dinámicas sociales que se han venido generando alrededor de los juegos, como en el caso de los juegos en línea, que han visto emerger una actividad económica derivada del proceso de adquisición de objetos virtuales, o avatares, para dichos juegos, con dinero real, desde sitios web [105, 134, 179, 180, 181, 182, 183].

⁸⁶ <http://www.cosmicencounter.com/screens/home.html> y

⁸⁷ https://signup.ddo.com/ddo.php?ftui=DDOBlackDragon&abrs=308_1358686892

⁸⁸ <http://www.scribblenautsonline.com/>

⁸⁹ La explotación de este fallo se convirtió en un hecho fundamental para el juego, sustituyendo aspectos que se habían previsto en el juego original.

⁹⁰ http://en.wikipedia.org/wiki/Street_Fighter_II

Ese proceso de comercialización para ganar dinero, no tiene nada que ver con lo objetivos iniciales de los diseñadores de esos juegos.

Dos ejemplos emblemáticos de juegos emergentes son SimCity y Los Sims [177]. Veamos en detalle el juego de Los Sims. Los Sims, creado por Will Wright, es un juego muy especial por varias razones, una de la más llamativas es la ausencia de una narrativa para guiar al jugador y hacer progresar al juego. No hay caminos correctos ni incorrectos, todo vale si el juego te deja hacerlo. Los objetivos los establece el jugador. En Los Sims, la historia surge de las acciones del jugador. Al jugador se le da tanto control, que podría dedicarse más a la creación de una historia que a interactuar con una historia. Al tratarse de un simulador social, podemos encontrar un objetivo final implícito: tener el máximo poder económico y el mayor reconocimiento social posible; pero esto es un reflejo de la sociedad en que vivimos, y aunque para muchos sea el modo adecuado de jugarlo, en este juego no es un requisito alcanzarlo para quedar satisfecho. Al no tener un final propiamente dicho, el juego es prácticamente inacabable, lo cual puede notarse en la cantidad de objetos que pueden comprarse para las casas, el número de personajes, etc.

En los Sims, el concepto de juego emergente es llevado al extremo. El juego consiste en un simulador social en el cual no hay objetivos predefinidos, y las cosas suceden en nuestro alrededor en función de nuestras acciones. El jugador es completamente libre de hacer lo que desea, dentro de los límites impuestos por el juego, controlando a todos los individuos de una familia, decidiendo lo que quiere que hagan con su vida (eligiéndoles un trabajo, definiéndoles una casa, etc.), permitiéndoles interactuar con los miembros de otras familias creadas en otras partidas, etc.

En los Sims 2⁹¹ el medio ambiente es inteligente, tal que sus objetos difunden sus propiedades a los agentes para guiar sus comportamientos [177]. Cada agente tiene diversas motivaciones y necesidades, y cada objeto en el terreno puede satisfacer esas necesidades de diferentes maneras. Por ejemplo, un refrigerador puede difundir que puede satisfacer el hambre, y la cocina que puede preparar comida. Cuando el agente busca que hay en la nevera, se le transmite los alimentos con que cuenta para cocinar, y la acción “recuperar alimentos en la nevera” le indica a la cocina que podría preparar comida. En consecuencia, el agente guía sus

⁹¹ http://thesims.com/en_US/home

acciones según el medio ambiente, que a su vez también es guiado por el agente.

Otros juegos emergentes interesantes son *Half-Life*⁹² (sus objetos tienen contenidos que definen sus propiedades, y determinan cómo pueden verse afectados por los jugadores y por otros objetos. Además, son codificados con tipos de comportamiento y reglas de interacción. De esta manera, se comportan de manera más realista y más interactiva), *Oblivion*⁹³ (tiene muchos personajes y organizaciones independientes, cada una con diferentes motivaciones, roles y posibles interacciones con el jugador. El mundo también es amplio y lleno de muchos enemigos, animales, objetos y lugares, que el jugador puede visitar. Hay una amplia gama de posibles interacciones).

También, los diseñadores de juegos han tratado de fomentar los juegos emergentes, proporcionando herramientas para los jugadores, tales como colocar en sitios web motores de juegos (por ejemplo, *Eve Online*⁹⁴ y *The Matrix Online*⁹⁵), herramientas de integración, y lenguajes de programación (por ejemplo, el que se usó en *Second Life*⁹⁶), o permitiéndoles generar objetos (por ejemplo, en *Scribblenauts*⁹⁷). Algunas de las líneas de trabajo en el diseño de juegos emergentes son [105, 134, 153, 179, 180, 181, 182, 183, 184]:

- Caracterización de la inteligencia emergente: los juegos emergentes ofrecen un paisaje ideal para el desarrollo de la inteligencia artificial distribuida, son como un vivero para el estudio de la inteligencia emergente. La inteligencia emergente deberá proveer las formas de juego de cada jugador, que de manera colectiva serán agregadas para culminar en un nuevo juego.
- Personalización de contenidos: el objetivo es brindar una experiencia distinta para cada jugador, adaptada a sus gustos, a sus habilidades. Se trataría de juegos “con memoria”, capaces de recordar a sus usuarios,

⁹² http://thesims.com/en_US/home <http://orange.half-life2.com/>
http://en.wikipedia.org/wiki/Half-Life_2

⁹³ <http://www.elderscrolls.com/oblivion/>

⁹⁴ <http://www.eveonline.com/>

⁹⁵ http://en.wikipedia.org/wiki/The_Matrix_Online

<http://pc.gamespy.com/pc/the-matrix-online/>

⁹⁶ <http://secondlife.com/>

⁹⁷ <http://games.kidswb.com/official-site/scribblenauts/unlimited/>

de sesión en sesión. Para ello, será necesario gestionar la experiencia, las habilidades, entre otras cosas, de los jugadores, de tal manera de adaptar la duración, el contenido, etc., de cada sesión de juego.

- Integración de bases de reglas de juegos emergentes. Se trataría de incluir reglas de base de juegos emergentes, en motores de juegos emergentes, capaces de generar inesperados comportamientos y elementos nuevos.

5.1.1.2 *Metrópolis*

Basado en el concepto de simuladores de ciudades, como Simcity, Lin-City, City Life y OpenCity⁹⁸ [180], en esta sección se presenta *Metrópolis* [3], un juego en el que emergen dinámicas sociales, a partir de las decisiones que van tomando los habitantes. En *Metrópolis*, el comportamiento emergente de la sociedad, se deriva de las reglas que regulan las interacciones entre los agentes (jugadores), que representan grupos de intereses distintos en la sociedad. *Metrópolis* tiene como premisa, que las ciudades se auto-gestionan a partir de las decisiones que se van tomando colectivamente, en un entorno en el que todos los agentes (jugadores) ejercen un rol de igual importancia, ya que no hay una figura principal de autoridad local (alcalde, gobernador, etc.). En el juego se persigue planificar colectivamente el crecimiento exitoso de comunidades, para después observar y comparar las ciudades desarrolladas.

El elemento de base del juego, es el espacio de toma de decisiones colectivas: el consejo. En el consejo, cada agente que representa a un colectivo (grupo), tiene la oportunidad de votar a favor o en contra de construir cierto tipo de construcción, haciendo uso del presupuesto limitado de la ciudad (compartido por todos los agentes), en caso de que se decida construir.

Se tienen agentes de dos tipos, unos que representan a los jugadores, otros generados aleatoriamente y controlados por el juego. Se asignan personalidades a los agentes, que indican sobre qué tipo de construcción tienen más interés, tanto de construir como para votar en el consejo. La ciudad evoluciona según lo que los agentes decidan, en cuanto a qué se construirá o destruirá en la misma. De este modo, las acciones de cada jugador afectan directamente a la ciudad.

⁹⁸ <http://lincity.sourceforge.net>, A. Ferré. “SimCity”, in Verb, Architecture Boogazine: Connection. Actar, 2004

Ahora bien, cada jugador no sólo se representa a sí mismo, sino a un porcentaje de los habitantes de la ciudad (a un colectivo). A la hora de construir algo en la ciudad, cada jugador hace de dicho proyecto un proyecto en común (el proyecto es sometido a votación popular en el consejo).

El juego lleva un sistema de puntuación, el cual es calculado cada año. La puntuación está basada en los índices de avance (o de desarrollo) de la ciudad, y en la felicidad de sus habitantes (la felicidad de todos los agentes afecta el índice de felicidad de la ciudad). Los índices de avance de la ciudad son calculados, según el balance que haya entre las diferentes áreas de desarrollo (ambiental, educativo, industrial, etc.). Los mismos se van sumando individualmente, para hacer ese cálculo. Las reglas del juego son:

- Pueden jugar uno o más jugadores, en uno o más equipos (cada equipo es representado por un agente). Se establece un tiempo límite, el cual es el número de años tras el cual el juego termina. Cada agente podrá votar en el consejo a favor o en contra de la construcción de una determinada edificación, en una determinada zona.
- Cada ciudad deberá tener 10 agentes, de los cuales al menos 5 son agentes artificiales, para así simular la porción de los ciudadanos que los jugadores no pueden controlar, pero que toman decisiones de igual forma. Los agentes pueden ser creados con personalidades al azar, o definidos por el usuario, al inicio del juego (más adelante se explica cómo).
- El jugador podrá construir la edificación que desee, en la zona que prefiera, especificada por las coordenadas X, Y. Las características de la ciudad que cuentan para el cálculo de sus índices de avance son: salud, educación, ambiente, comercio, industria y tecnología.

5.1.1.2.1 Diseño del Juego

Caracterización de las Edificaciones:

Cada tipo de construcción que exista en una casilla del mapa (coordenada), es representada con un valor numérico. Además, cada tipo de construcción tendrá un efecto determinado, en el juego y en el área que le rodea. En la tabla 5.1 se observa la bonificación y penalización que aporta a los índices de avance cada tipo de construcción (determina su efecto), su radio de cobertura en la ciudad (lo que cubren), así como otros aspectos como su costo de construcción, y a qué clase pertenecen.

Se tienen dos clases de edificaciones: las principales/primarias que otorgan/eliminan puntos a específicos índices de avance, y las secundarias que otorgan/eliminan porcentajes de bonos a específicos índices de avance. Los índices de avance son calculados y agregados al total, al final de cada año.

En cuanto al radio de acción de cada edificación, el mismo consiste en un rombo alrededor de la figura, con una longitud diagonal de dos veces el número dado en la tabla 5.1. Mientras que el radio de acción de dos edificaciones iguales (principales y/o secundarias) no se intercepten, las edificaciones aportarán su puntuación total. De interceptarse, las puntuaciones positivas disminuirán 50% para cada una, mientras que las negativas se mantendrán sin cambios.

Num	Tipo	Grupo	Radio	Bono	Penalización	Costo \$
0	Vacio	--	--	--	--	0
1	Árbol	--	--	+1 Ambiente	--	20
2	Residencia	--	--	--	--	500
3	Calle	--	--	--	--	40
4	Institución de Salud	Primaria	7	+250 Salud	--	7000
5	Institución Educativa	Primaria	4	+150 Educacion	--	4000
6	Institución Ambiental	Primaria	7	+100 Ambiente	--	4000
7	Comercio	Primaria	2	+50 Comercio	--	5000
8	Institución Industrial	Primaria	7	+200 Industria	-75 Ambiente	7000
9	Institución Tecnológica	Primaria	3	+170 Tecnologia	--	3000
10	Institución de Salud	Secundaria	2	+15% Salud	--	1000
11	Institución Educativa	Secundaria	2	+10% Educacion	--	800
12	Institución Ambiental	Secundaria	2	+12% Ambiente	--	800
13	Comercio	Secundaria	1	+7% Comercio	--	600
14	Institución Industrial	Secundaria	3	+ 18% Industria	-8% Ambiente	1000
15	Institución Tecnológica	Secundaria	2	+10%Tecnologia	--	800

Tabla 5.1. Radios, Bonos y Penalizaciones Según el Tipo de Construcción

Personalidades de los Agentes

Al inicio del juego, los jugadores deben escoger cuatro tipos de personalidad. Para los agentes artificiales, sus tipos de personalidad pueden ser elegidos al azar o seleccionados por el jugador. La personalidad determina el comportamiento de dicho agente durante el juego. Los tipos de personalidad son: hipocondriaco, saludable, con dificultades

en salud, autodidacta, indiferente a conocer, ambientalista, ahorrador, comprador, anti-industrial, industrialista, anticuado, geek⁹⁹.

El funcionamiento de los mismos difiere entre jugadores humanos y agentes artificiales: En el caso de los humanos, se usan para calcular la felicidad del jugador. Para los agentes artificiales, no sólo determinan su felicidad, sino su comportamiento durante el juego (por ejemplo, un agente artificial ambientalista siempre votará en contra de propuestas que incluyan hacer daño al ambiente).

Las personalidades activadas, determinan cuáles son las necesidades primarias del agente (su felicidad). De esta manera, las personalidades que no se activan, por omisión implica que sus valores deben estar en un nivel normal (1000 puntos), a la hora de comparar el índice de avance de la ciudad con la personalidad del jugador, para determinar su felicidad. Para las activadas, sus valores deberán oscilar entre 1250 y 750 puntos (los valores extremos de las dos personalidades antagonicas, ver casillas grises de la tabla 5.2).

Consejo

El consejo toma decisiones sobre que se dejara construir. Así, los agentes votarán a favor o en contra de las construcciones. En el caso de los agentes artificiales, ellos toman sus decisiones basándose en sus personalidades. Los votos de los 9 agentes restantes, de los 10 que se tienen (el que somete la propuesta no vota), son los que se toman en cuenta en la votación. La decisión se determinará por mayoría de votos.

Valoración de la proximidad de edificaciones

En la Tabla 5.3 se especifican las penalizaciones o bonificaciones por proximidad de ciertos tipos de construcciones. Si tomamos el ejemplo de proximidad de un hospital (institución de salud primaria, S1) con una industria (I1), se le daría una penalización de -6 puntos a ambas construcciones por estar cerca. Si por el contrario se construye un centro de investigación (institución de tecnología secundaria, T2) cerca de una escuela o universidad (instituciones de educación, E1), se le otorgaría a ambas

⁹⁹ Es un término usado para referirse, a una persona fascinada por la tecnología e informática.

una bonificación de 3 puntos. Para determinar la cercanía se considera la zona de cobertura de cada tipo de edificación (radio de la tabla 5.1).

Trato	Salud	Educación	Ambiente	Comercio	Industria	Tecnología
Hipocondríaco	1250	1000	1000	1000	1000	1000
Saludable	750	1000	1000	1000	1000	1000
Con Dificultades	1000	1250	1000	1000	1000	1000
Autodidacta	1000	750	1000	1000	1000	1000
Indiferente	1000	1000	1250	1000	1000	1000
Ambientalista	1000	1000	750	1000	1000	1000
Ahorrador	1000	1000	1000	1250	1000	1000
Comprador	1000	1000	1000	750	1000	1000
Anti-Industrias	1000	1000	1000	1000	1250	1000
Industrialista	1000	1000	1000	1000	750	1000
Anticuado	1000	1000	1000	1000	1000	1250
Geek	1000	1000	1000	1000	1000	750

Tabla 5.2. Tabla de índices de Felicidad y Tipos de Personalidad

Solapamiento

Además de calcular la bonificación/penalización por tipo de edificación, es necesario calcular el solapamiento de zonas de cobertura en el mapa, para obtener los índices de avance. El solapamiento ocurre cuando dos o más edificaciones, de un mismo tipo i , tocan el mismo espacio de la matriz (zona de cobertura \mathcal{Z}). La penalización del solapamiento en esa zona de cobertura \mathcal{Z} , es calculada dividiendo el valor de la casilla entre la multiplicación de la cantidad de construcciones i que tocan dicho espacio, por el número de casillas que tengan dicho solapamiento:

$$PO_i = \frac{VC}{NO_i * NCO} \quad (5.1)$$

Donde, PO_i es la penalización por el solapamiento de las edificaciones de tipo i ; VC es el valor de la casilla; NO_i es el número de solapamientos (cantidad de construcciones i que tocan dicho espacio); NCO es el número de casillas con dicho solapamiento. La puntuación total de una

construcción primaria i para un índice de avance dado j en el cual ella influye (ver tabla 5.1), se calcula sumando todos los puntos aportados por ese tipo de construcción en cada casilla cubierta por ella, a lo cual se le restan los solapamientos presentes:

$$PC_{ij} = \sum_r (P_{ij} - PO_i) \tag{5.2}$$

Donde, P_{ij} es el bono o penalización de la construcción i al índice de avance j , según la tabla 5.1, y r es la zona (casillas) que abarca la edificación i (se recorren todas las casillas en esa zona r). La ecuación 5.3 es para el caso de construcciones secundarias:

$$PC_{ij} = \sum_r (P_{ij} PI_j / 100 - PO_i) \tag{5.3}$$

Donde, P_{ij} es el porcentaje de bonificación o penalización de la construcción secundaria i al índice j (según tabla 5.1), y PI_j es el valor actual del índice j .

Matriz para Locate	AR	RE	CL	S1	E1	A1	C1	I1	T1	S2	E2	A2	C2	I2	T2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AR	1														
RE	2					X		X						X	
CL	3														
S1	4			-4			-2	-6	-2	+3				-4	
E1	5							-4	+3	+3	+3			-3	+3
A1	6		X					-3	+2			+3		-2	
C1	7			-2				-3					+3	-2	
I1	8		X	-6	-4	-3	-3		-3	-5	-3	-3	-3	+3	-2
T1	9			-2	+3	+2		-3			+3	+2		-2	+3
S2	10			+3	+3			-5			+3			-3	
E2	11				+3			-3	+3	+3		+2		-3	+3
A2	12					+3		-3	+2		+2			-2	+2
C2	13						+3	-3						-2	
I2	14		X	-4	-3	-2	-2	+3	-2	-3	-3	-2	-2		
T2	15				+3			-2	+3		+3	+2			

Tabla 5.3. Bonificación y Penalización según la cercanía de los tipos de construcción

Puntuación Total de un Índice de Avance

La puntuación total de cada índice de felicidad j , se calcula como:

$$PT_j = \sum_l \sum_i \left(PC_{ij}^l + \sum_s CER_{si} \right) + \sum_m \sum_k \left(PC_{kj}^m + \sum_s CER_{sk} \right) \quad (5.4)$$

Donde, l recorre todas las edificaciones primarias y m las secundarias, en la ciudad, respectivamente, y CER_{sk} son las bonificaciones o penalizaciones, según las cercanías de las edificaciones s a i , según las tablas 5.3 y 5.1¹⁰⁰.

Cálculo de la Felicidad de la Ciudad

El cálculo de Puntuación para el índice de felicidad del jugador p es:

$$VI_p = \sum_j \frac{1000PT_j}{TRJ_{pj}} \quad (5.5)$$

Donde, TRJ_{pj} es el total requerido por el jugador p para el índice j (ver tabla 5.2).

Luego de obtener los índices de cada agente, se promedian para generar los índices generales de felicidad de la ciudad. Veamos un ejemplo: supongamos que una ciudad tiene un total de 1000 puntos de salud. El valor para un jugador común sería:

$$ValorSalud = (1000 * 1000) / 1000$$

para un jugador Hipocondríaco sería:

$$ValorSalud = (1000 * 1000) / 750$$

y para un jugador Saludable sería:

$$ValorSalud = (1000 * 1000) / 750$$

¹⁰⁰ Por ejemplo, si se tienen dos instituciones de salud: una primaria y una secundaria, construidas una cerca de la otra, la primaria aportará 250 puntos al índice de avance de salud, y la secundaria aportará en puntos el 15% del valor de la primaria (correspondiente a 37.5 puntos), mas 3 punto por cercanía, para un total de 290.5 puntos.

Eventos Naturales

Dentro del ámbito de Metrópolis, un evento se define como algo que ocurre al azar, dentro del ambiente del juego, que afecta negativamente a la ciudad. Los mismos son calculados al azar constantemente, siendo sus probabilidades bajas según el tipo de evento. Se han definido 3 tipos de eventos, que en nuestro caso son desastres naturales, entre los que se encuentran incendios, terremotos y tornados. Estos están diseñados para destruir la ciudad, existiendo tres escalas de destrucción para cada uno de ellos: intensidad 1, 2 y 3; siendo tres la más devastadora. Para determinar la ocurrencia o no de un evento, se tendrá un generador de números aleatorios corriendo cada cierto tiempo. Dependiendo del número que se genere, se elegirá el evento a ocurrir. La probabilidad de que ocurra un incendio, es más alta de que ocurra un tornado o terremoto, siendo la probabilidad del tornado la menor. Un tornado de intensidad 3 destruye todo lo que está a su alrededor, mientras que un incendio de intensidad 1 destruye pocas cosas escogidas al azar (los dos extremos de efectos naturales).

5.1.1.2.2 Experimentación

En esta sección, presentamos dos ejemplos de uso de metrópolis, iniciando con una rápida explicación del funcionamiento de la interfaz gráfica del juego. En la figura 5.1 se ve:

1. Indica la cantidad de dinero que se tiene en el presupuesto.
2. Permite seleccionar el tipo de construcción, e indica el costo de cada una de ellas.
3. Coordenada X del mapa.
4. Coordenada Y del mapa.
5. Indicadores de avance en salud, educación, ambiente, comercio, tecnología e industrias.
6. Muestra el número de la casilla, para que el jugador pueda guiarse.
7. Botón de configuración de juego, es el primer paso para configurar los agentes.
8. Mapa donde se construyen las edificaciones.
9. Leyenda que muestra el icono asignado a cada tipo de construcción.

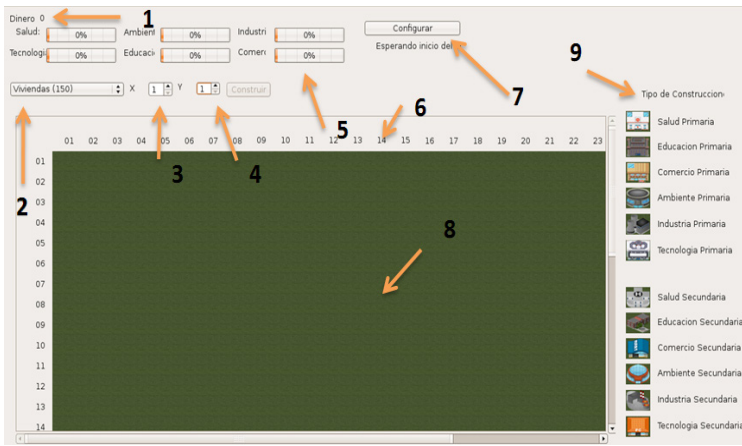


Figura 5.1. Pantalla principal de Metrópolis

La figura 5.2 muestra la ventana de configuración del juego, en la cual, además de seleccionar el tiempo de juego y el número de jugadores, se seleccionan las personalidades de los agentes. En la figura podemos ver:

1. Donde se selecciona el número de jugadores por partida.
2. Donde se selecciona el tiempo de juego en años.
3. Donde se selecciona las personalidades de por lo menos los 10 agentes que, por defecto, tiene el juego (incluyendo artificiales y jugadores). Por omisión, el menú desplegable se encuentra en random (aleatoria).



Figura 5.2. Ventana de configuración del juego

Una vez configuradas las opciones de juego, se activa el botón de Iniciar Juego. En la figura 5.3 hacemos un zoom al panel de visualización central, para apreciar que una vez que se presione el botón de Iniciar Juego, se activa el botón para controlar los turnos de los jugadores. Además, se activa el presupuesto de la ciudad.



Figura 5.3. Panel de Visualización

5.1.1.2.3. Caso 1: Emergencia de patrones urbanos

En este caso, hay 2 jugadores y el juego dura 3 años. Se dejan las personalidades de los agentes al azar. En la parte superior derecha de la figura 5.4, debajo del botón de turnos, se observa la información sobre el turno en el cual se encuentra el juego, y el jugador que está proponiendo una construcción en el momento.

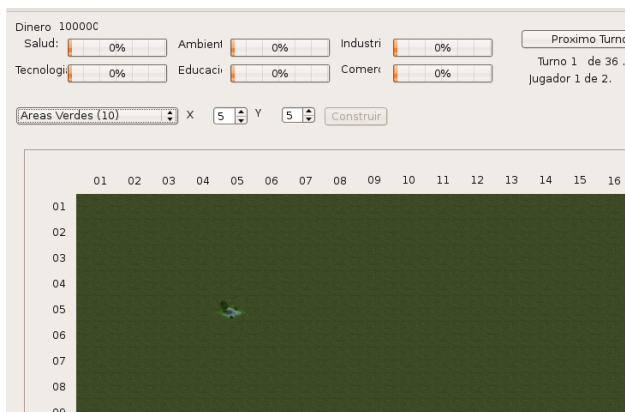


Figura 5.4. Construyendo en el Mapa



Figura 5.5. Índices de Avance de la Ciudad. Año 1

Cada turno de juego representa un mes para cada uno de los jugadores. Para este caso, se seleccionaron 3 años de juego, por lo tanto, se deben jugar 36 turnos de juego para culminar la partida. Cada 12 meses (turnos de cada jugador), una ventana muestra los índices de avance de la ciudad hasta ese momento, como lo muestra la figura 5.5. Para ese primer año, en este ejemplo, los índices de avance más elevados fueron los correspondientes a educación, tecnología e industrias. Al final de cada año, al presupuesto de la ciudad se le suma una cantidad de dinero (equivalente a las recaudaciones por impuestos, donaciones, etc., recibidas por la ciudad). La figura 5.6 muestra las construcciones, luego de 18 turnos de juego. Se observa como el presupuesto ha disminuido, conforme se fue construyendo. A su vez, se observan los patrones urbanísticos que emergen, por ejemplo, en este caso, de zonas con solo instituciones educativas. En la figura 5.7 se observa el surgimiento de otros patrones, en la parte izquierda (zonas industriales), para el turno 29. De igual manera, los índices de avance han variado conforme se ha jugado (ver figura 5.8).



Figura 5.6. Caso 1. Turno 18

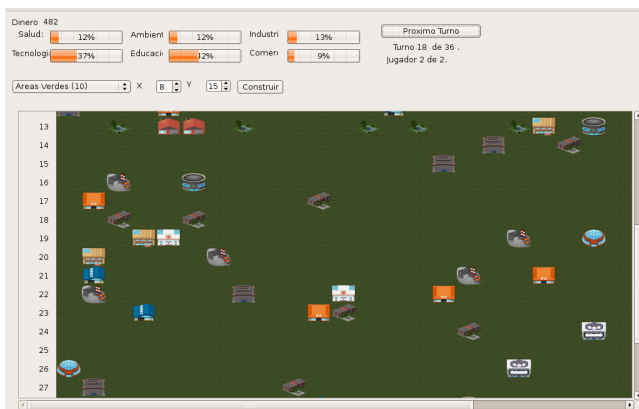


Figura 5.7. Caso 1. Turno 29



Figura 5.8. Índices de Avance de la Ciudad. Año 2

En la figura 5.8 se aprecia un aumento en todos los índices, especialmente en educación. Al finalizar la partida, una ventana aparecerá mostrando los índices de felicidad finales, para cada uno de los agentes (ver figura 5. 9). En la figura se observa que la salud fue uno de los índices más bajos para los agentes (peor satisfechos), y la educación uno de los más altos, al igual que el industrial. Al finalizar la partida, también se muestra la puntuación final de la ciudad (ver figura 5. 10). Una vez culminada la partida, se puede estudiar la densidad de cada tipo de construcción, en la ciudad. La figura 5.11 hace un zoom a los botones, en los cuales se puede seleccionar qué construcciones se desea estudiar.

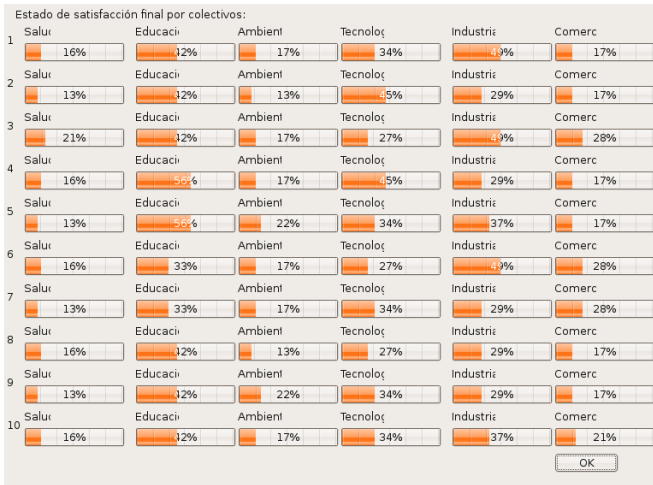


Figura 5.9. Índices de Felicidad para los Agentes



Figura 5.10. Índices de Avance de la Ciudad. Año 3

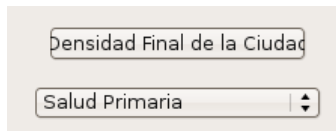


Figura 5.11. Estudio de la Densidad de construcción en la Ciudad

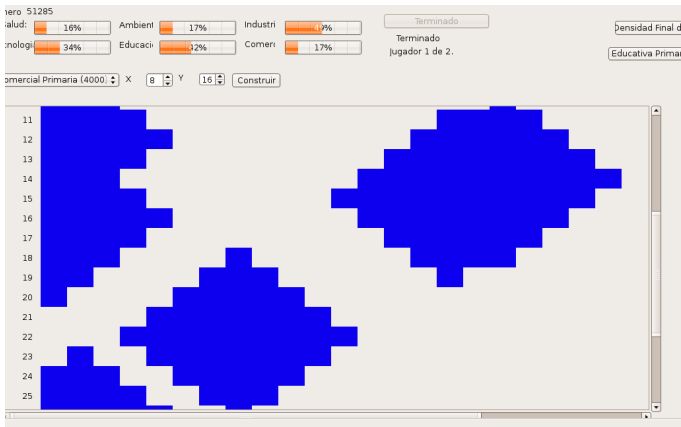


Figura 5.12. Densidad de Instituciones de Educación en la Ciudad

La figura 5.12 muestra la densidad, o concentración, de instituciones educativas en la ciudad, al finalizar la partida. En la figura 5.13 se observa la densidad de las instituciones industriales.

En la implementación no gráfica del juego (por consola), se puede observar de manera más detallada la densidad (ver figura 5.14). La figura 5.14 es un ejemplo de la densidad, para instituciones de salud en la ciudad. En esa figura, los números representan de mejor manera la densidad, ya que se diferencian las zonas dentro del rombo (las intensidades presentes de ese tipo de construcción, según sus zonas de influencias/coberturas). Lo interesante de esas densidades, es que nos muestran un comportamiento urbano que emerge de las decisiones tomadas por los agentes. Básicamente, dicho comportamiento consiste en los patrones que se van configurando en la ciudad, basada en el hecho de que edificaciones semejantes tratan de agruparse en un mismo sitio (ver tabla 3). Así, el efecto que se da, es el de emergencia de zonas urbanas que agrupan edificaciones semejantes.

de la unión de las distintas cualidades (personalidades) de cada agente. Estas cualidades son utilizadas, para obtener un objetivo común a lo largo de una partida: mejores índices de avances para la ciudad. Vemos en la figura 5.9, como esas personalidades de los agentes, son traducidas en un patrón de comportamiento de la ciudad, que en el tiempo debería estabilizarse (ver figura 5.10). Ese sería el patrón de conducta de la ciudad, adecuado a las necesidades más importantes de los miembros de ella.

5.1.1.2.4. Caso 2: Estudio de patrones de ciudad particulares, debido a necesidades específicas de los agentes

Para el segundo caso, se configuran los agentes 1 y 2 como sigue más abajo, y el resto se dejan al azar. El tiempo de juego es 2 años, y el número de jugadores es 4.

Agente 1: con dificultades en la educación, industrialista e hipocondríaco.
Agente 2: hipocondríaco, ambientalista, ahorrador y autodidacta.

La figura 5.15 muestra el juego culminado, las figuras 5.16 y 5.17 los índices de avances de la ciudad por año, del juego.

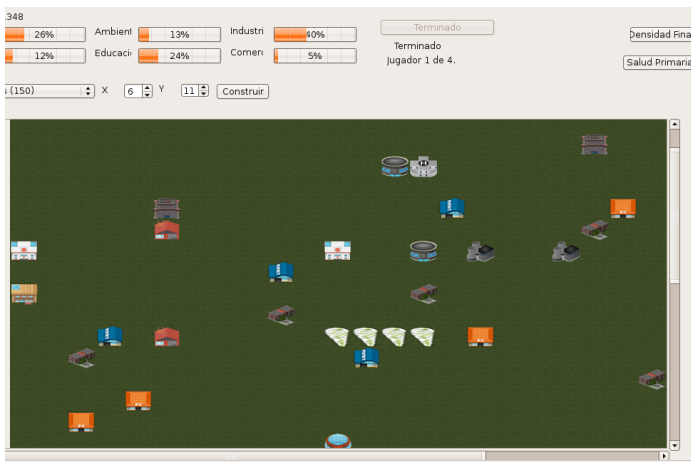


Figura 5.15. Caso 2. Juego Culminado

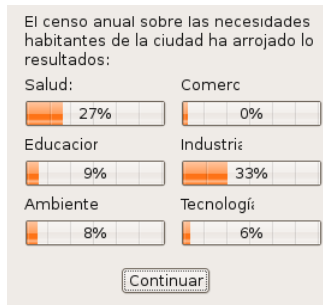


Figura 5.16. Caso 2. Índices de Avance de la Ciudad. Año 1.



Figura 5.17. Caso 2. Índices Finales del Avance de la Ciudad.

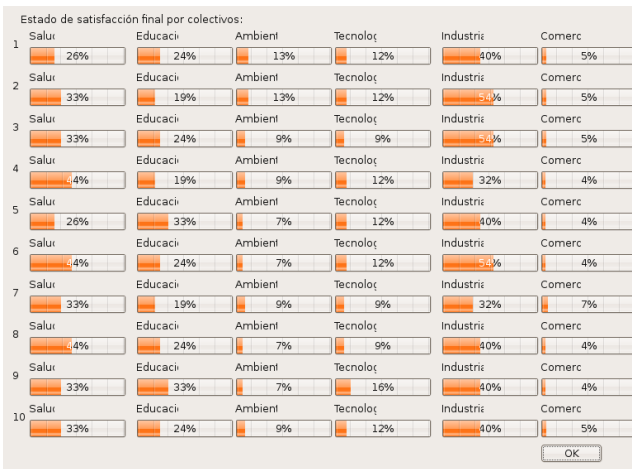


Figura 5.18. Caso 2. Índices de Felicidad para los Agentes Año 2.

Los resultados finales de la ciudad son congruentes con las personalidades de los agentes que se seleccionaron, ya que las necesidades mayores para ellos eran: salud, industrias y educación (ver figura 5.18). Vemos aquí como emerge un patrón de conducta en la ciudad, que busca satisfacer esas necesidades. Incluso, curiosamente, como uno de ellos es ambientalista y el otro industrialista, y a la vez, la mayoría de los agentes se enfocó en las industrias (en las escogencias al azar), se obtiene un índice de industrias mayor que el de ambiente (ver figura 5.17).

La ciudad se ve como un ente vivo, que está en constante movimiento y evolución [3]. A partir de la interacción de sus miembros, se generan resultados, que pueden ser vistos en un nivel más alto. Vemos así que la ciudad es un ente inteligente, comportamiento generado por una serie de agentes simples, que generan la emergencia. La ciudad se transforma en un sistema dinámico, cuya evolución no depende de uno, dos o más agentes, sino que depende de las emergencias que suceden en ella, producto de las decisiones colectivas de los agentes, que generan fuerzas ascendentes, que inciden directamente en la estructura global (las mismas son impredecibles, pese a conocerse las reglas con las que actúan los agentes [3]).

Metrópolis permite estudiar ese fenómeno en una ciudad. En Metrópolis, los comportamientos emergen de las decisiones tomadas por los agentes, en cuanto a qué tipo de construcción son de sus intereses. Esos comportamientos que emergen son de dos tipos:

- Patrones de zonas urbanas que se van configurando en la ciudad (edificaciones semejantes atraen a otras, para que sean construidas cerca de ella). Así, emergen zonas urbanas que agrupan edificaciones semejantes.
- Patrón de conducta de la ciudad, reflejada en los índices de avances. Hacia el final del juego, los mismos tienden a estabilizarse (no cambian), ya que cubren las necesidades derivadas de la fusión de las personalidades de los agentes de la sociedad (conjugan, de alguna manera, las necesidades del colectivo, derivadas de las personalidades de cada agente).

Con ciertos ajustes, Metrópolis podría ser utilizado en planificación urbana, ayudando en los procesos de toma de decisiones. También, si bien

es cierto que permite la emergencia de patrones, futuros trabajos deben estar orientados a permitir que las misma filosofía del juego, plasmada a través de las reglas e interacciones, puedan cuestionarse, permitiendo la emergencia de estructuras/reglas del juego imprevistas.

5.1.2 Conciencia Artificial

Hay muchos problemas con la definición exacta de la conciencia. La conciencia es quizás uno de los fenómenos más interesantes, pero peor comprendidos, de la biología humana, que emerge del cerebro. La Conciencia Artificial (CA), también conocida como la conciencia de la máquina (CM), o conciencia sintética, es un campo relacionado con la inteligencia artificial y la robótica cognitiva, cuyo objetivo es definir lo que pudiese ser sintetizado de la conciencia, en un computador [24, 35]. Algunos teóricos sostienen que la conciencia sólo puede darse en los sistemas biológicos [157]. Otros teóricos sostienen que la conciencia sólo puede ser realizada en los sistemas físicos, porque la conciencia tiene propiedades que dependen necesariamente de la constitución física [24]. Sin embargo, otros teóricos definen los estados mentales en términos de roles causales, tal que cualquier sistema que pueda crear una instancia del mismo patrón causal, independientemente de su constitución física, será una instancia de los mismos estados mentales, incluyendo la conciencia. Finalmente, algunos teóricos han propuesto que la conciencia puede ser diseñada y programada en los computadores [35]. Algunas de las preguntas a responder en la CA son [24, 35]:

- ¿Pueden los computadores pensar? ¿O simplemente calcular?
- ¿Es la conciencia una prerrogativa humana?
- ¿La conciencia dependerá del cerebro humano?, ¿La conciencia dependerá de los materiales del cerebro, incluido sus neuronas?

Responder a esas preguntas es difícil, porque requiere de muchas disciplinas: ciencias de la computación, neurofisiología, filosofía, religión, etc.

En general, la CA se entenderá como la manera de generar en los sistemas informáticos, la producción artificial de puntos de vista, opiniones, valoraciones, impresiones, deseos. Este tipo de sistema se relaciona con una cierta corporeidad, que puede tomar muchas formas. Por lo tanto,

deben diseñarse sistemas capaces de generar formas complejas, que representen los pensamientos, que tengan memoria de las cosas, que puedan hacer seguimiento de los acontecimientos vividos y apreciados. Deben ser sistemas muy autónomos en el uso de la memoria, para producir representaciones y planes de acción intencional. Esos sistemas deben poder generar pensamientos, que posibiliten soñar, meditar, planificar.

Hay dos escuelas principales de pensamiento en la CA [24, 35]:

- La conciencia fenomenal: simular las estructuras neuronales es la clave, ya que algunos dicen que la conciencia es un epifenómeno del cerebro.
- La conciencia funcional: supone modelar las funciones que se encuentran definidas en la psicología.

Recientemente, una tercera escuela ha comenzado a desarrollarse, llamada *Escuela de la Conciencia Híbrida*, que es un híbrido de las anteriores, y reconoce que todavía no se tiene suficiente conocimiento sobre la naturaleza del cerebro, para hacer un enfoque puro basado en algunos de los anteriores.

En general, en la CA se busca la construcción de un sistema general, de producción artificial de representaciones mentales. Por ejemplo, en [35] proponen un modelo de CA, el cual consta de cinco componentes:

- *Un subsistema organizador de la memoria*: guarda hechos, conocimientos, reglas y eventos, del contexto actual. La memoria no es una base de conocimiento, sino un entorno que interpreta continuamente el conocimiento.
- *Un subsistema de construcción de ideas*, como una actividad fundamental de cualquier agente.
- *Un subsistema de generación de emociones*, que afecta al subsistema anterior,
- *Un subsistema de entrada y salida*, que une el sistema de producción de la CA con el cuerpo del agente/ robot, o cualquier otro software,
- *Un subsistema de interfaz* para expresar el mapa mental, que es la representación de la realidad actual de la CA.

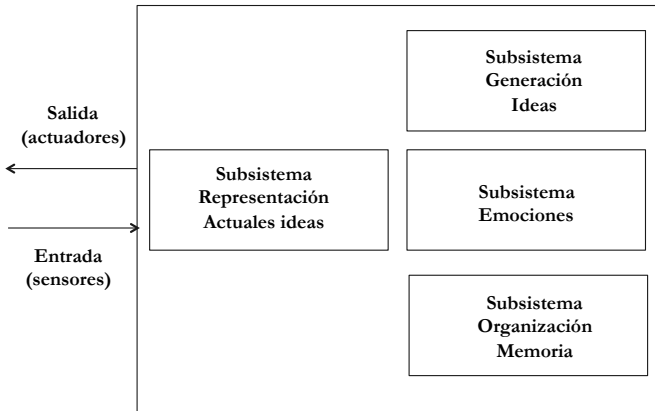


Figura 5.19. Modelo de conciencia artificial

El sistema hace una representación en línea de la conciencia del robot (u otro software). El estado de la conciencia depende de los datos sensados de su entorno, de su estado interno de acuerdo a su memoria, y de sus emociones actuales. Usando esa representación, el sistema conduce el comportamiento del robot. Lo que acontece en la mente, es mostrado en la figura 5.20.

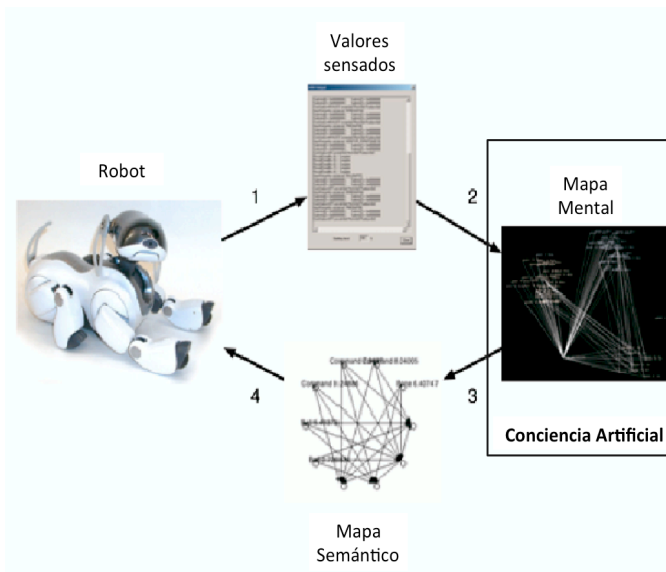


Figura 5.20. Ciclo que alimenta el proceso de conciencia artificial

Siguiendo la figura 5.20, el sistema recibe datos (desde sensores) y construye mapas mentales, que luego son analizados e interpretados semánticamente, para después ser usados en los procesos de toma de decisión de los robots.

El sistema tiene las siguientes características [35]:

- Es un sistema informático con un doble flujo constante de información, uno con el exterior, a través de los sensores y actuadores del sistema, y otro interno entre sus componentes, y particularmente, con la memoria.
- Es basado en una arquitectura por eventos, en la que está inmersa la memoria, la cual siempre se incrementa (propiedad de plasticidad del sistema).
- Almacena el valor informativo objetivizado de las entidades.
- De acuerdo con la sensación y la emoción que se siente sobre el objeto emergente, el sistema continúa con su generación, o hace un cambio.

En ese modelo de CA, la memoria contiene muchos acontecimientos, muchas historias, muchas habilidades; a diferencia de nosotros, que nacemos con una memoria vacía, que acumula los eventos vividos en nuestro desarrollo y vida, en relación con el medio ambiente y con nosotros mismos.

En general, los sistemas de producción de pensamientos, requieren de arquitecturas muy dinámicas. Para ello, en su funcionamiento, se pueden inspirar en lo que acontece en la producción de pensamiento en los seres humanos, cuyo proceso implica pasar por cinco momentos estrictamente secuenciales [35]:

- Establecer un objetivo para direccionar los pensamientos.
- Instanciar las ideas elementales latentes en la memoria, vinculadas a los objetivos.
- Generar una representación interna de esas ideas,
- Generar las sensaciones y acciones derivadas de la interpretación de esas ideas.
- Almacenar los objetos internos y resultados generados.

De esta manera, la CA puede ser vista como el proceso para generar un pensamiento artificial, que requiere, necesariamente, producir represen-

taciones de objetos internos, reconstruidos constantemente, para lo cual requiere de bucles de retroalimentación

5.1.3 Sistemas Multiagentes

Los Sistemas MultiAgentes (SMA) pueden definirse como una colección de agentes autónomos¹⁰¹, sociales, colectivamente estructurados, donde, a través de la interacción local y la comunicación social, emerge un comportamiento global. Uno de los retos actuales es lograr una mejor comprensión del comportamiento emergente global en los SMA y, en consecuencia, mejorar su diseño, y el propio proceso de diseño [68].

Los SMA pueden ser descritos en términos de redes de computación. Por ejemplo, los nodos pueden representar agentes, y los arcos sus interacciones. Las interacciones entre los agentes conllevan a que emerja un estado global que describe al sistema. Ese estado global es alcanzado, entre otras cosas, por la auto-organización [75, 86]. Esa capacidad emergente reside en las capacidades de coordinación de los agentes. La coordinación significa, que los agentes individualmente ejecutan acciones complementarias a su quehacer, que contribuyen al comportamiento colectivo.

Esta propiedad emergente es natural en el ámbito de la teoría de agentes, ya que la actividad colectiva compleja observada en el sistema, es el resultado de las interacciones de las actividades más simples a nivel de cada agente. La emergencia está en el medio, entre el nivel “micro” y el “macro”, de un sistema multiagentes, teniendo una arista estática (la emergencia es un resultado) y otra dinámica (la emergencia es un proceso) [68].

La emergencia en los sistemas naturales (por ejemplo, las colonias de insecto), es una prueba de que la autonomía individual no es incompatible con el orden global [199]. En ese sentido, cada decisión local ayuda a la generación de un comportamiento global coherente. Sin embargo, la extensión a los seres humanos nos advierte que la construcción de sistemas que exhiben ambos aspectos, la autonomía individual y el orden global, como expresión de la emergencia, no es trivial.

¹⁰¹ En el sentido de que cada agente determina sus acciones, basado en su propio estado y el estado del medio ambiente, sin comandos externos explícitos.

Los agentes no son inmunes a esa realidad humana. La tendencia natural de un grupo de procesos autónomos es al desorden, no la organización. La adición de información a un conjunto de agentes puede llevar a un aumento en la organización, pero sólo si se hace de la manera correcta, es decir, si posibilita la emergencia.

Un primer aspecto a considerar podría ser definir un modelo de entropía para la auto-organización, como forma de manifestación de la emergencia. Para ello, recordemos lo que representa un feromona. Las feromonas son marcadores de olor, que los insectos utilizan de dos maneras. En primer lugar, los feromonas se depositan en el medio ambiente para registrar un estado del individuo. En segundo lugar, los feromonas orientan los movimientos en un campo dado¹⁰². También, revisemos las funciones del feromona en el sistema donde se deposita [94, 199]:

- Es una forma de fusión de datos de múltiples agentes en diferentes momentos, en función de un objetivo común, es decir, es el depósito agregado de feromona de diferentes hormigas.
- Expresa una forma de olvido de información obsoleta, a través de la evaporación del feromona. Es una manera para detectar y resolver los conflictos, que se producen cuando afirmaciones incompatibles coexisten, convirtiéndose en un enfoque de mantenimiento de la verdad colectiva.

En el caso de las hormigas, sus movimientos constituyen el nivel macro del sistema, mientras que las moléculas de feromonas constituyen el nivel micro. El movimiento intencional de las hormigas, la construcción de caminos mínimos entre sus nidos y las fuentes de alimentos, reducen el desorden a nivel macro, y es posibilitado porque los agentes del nivel micro (que constituyen el feromona) se juntan, interactúan, etc. (ver figura 5.21). En particular, los modelos de coordinación mediados por el entorno, tal que los agentes cambian sus acciones según el entorno, es un proceso que antes denominamos “estigmergia” [94, 143, 199]. El proceso de generar estructuras en el entorno que los agentes perciben, y cierto desorden a nivel micro, es lo que permite un comportamiento ordenado en el nivel macro. De esta manera, se da cierto acoplamiento entre los niveles con comportamientos ordenados y desordenados, que permiten una cohesión emergente del sistema.

¹⁰² Aunque no es completamente determinista, ya que se permite cierta aleatoriedad en el proceso de toma de decisión.

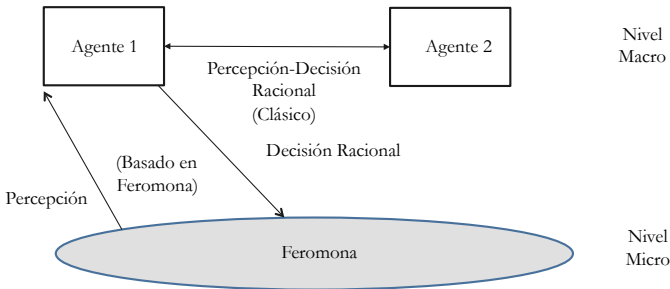


Figura 5.21 Comparación entre el Modelos de Coordinación Convencional y uno basado en Feromona

La figura 5.21 describe la diferencia entre la coordinación clásica en los SMA, y la mediada por el feromona, la cual permite naturalmente la emergencia de comportamientos. El desorden a nivel micro es producido por procesos de retroalimentación, tales como la evaporación o reforzamiento de los feromonas, que a nivel macro son usados por los agentes, para producir un patrón de comportamiento colectivo (orden).

Partiendo de esa constatación se puede calcular la entropía, considerando que la reducción de la entropía a nivel macro, esta causalmente relacionado con el aumento de la entropía a nivel micro [194]. En general, las condiciones que se deben dar en la coordinación, para que pueda surgir una cohesión emergente en el sistema, son [94, 143, 199]:

- La necesidad de algún tipo de mecanismo a nivel micro, que permita la creación del proceso de disminución de la entropía a nivel macro (por ejemplo, el reforzamiento del feromona).
- La necesidad de algún tipo de mecanismo a nivel micro, que aumente la entropía a nivel micro (por ejemplo, la evaporación del feromona).

En [68] se estudia el problema de la emergencia en los SMA, caracterizando en particular la emergencia de comportamientos colectivos, como parte de un proceso de auto-organización a partir de la dinámica de sus entidades, y de las interacciones entre ellas y con el medio ambiente. Este enfoque se basa en la idea de que un grupo de agentes en un medio ambiente, debido a sus interacciones, van a evolucionar hasta converger en un estado estable [68].

La primera característica esencial de este enfoque, es que ningún agente controla la dinámica de la comunidad. La segunda característica es que, por definición, los agentes actúan, y en consecuencia, modifican su medio ambiente. Pero los agentes no pueden percibir o actuar, sino localmente, en ese medio ambiente. La tercera característica es que el entorno de cada agente contiene a otros agentes. Los agentes son varios en un medio ambiente común, y las interpretaciones del medio ambiente por los distintos agentes pueden ser diferentes.

La dinámica del sistema es caracterizada por iteraciones entre interpretación del medio ambiente local, por parte de agentes, acciones de los agentes sobre ese medio ambiente, nueva interpretación del medio ambiente modificado, nuevas acciones, etc. Cuando tal dinámica se estabiliza, se puede hablar de emergencia de una estructura o funcionalidad global, con un medio ambiente, posiblemente modificado por el conjunto de agentes. Ese efecto sobre el medio ambiente tiene un efecto retroactivo sobre las partes, conllevando a una emergencia en un sentido fuerte, que posibilita un estado global emergente estable, que condiciona (o selecciona) los comportamientos individuales de cada agente.

La dinámica de las interacciones es esencial para la emergencia de fenómenos, estructuras. Esta idea se inspira en S. Forrest y Bunge [61]: “un sistema de entidades en interacción, caracterizado por sus estados y su dinámica ..., produce un fenómeno ..., un estado estable, que es inevitablemente global, puesto que es producido por el sistema”. Ese fenómeno global solo puede ser apreciado por un observador. o por el sistema mismo, a partir de su descripción, usando una teoría que posibilite su interpretación. Una teoría emergente es una teoría que describe un sistema de entidades, sus interacciones, y los fenómenos globales que emergen. Este enfoque supone [94, 143, 199]:

- Un sistema de entidades en interacción, cuyos estados y dinámica pueden ser descritos por una teoría;
- Ese sistema produce un fenómeno, (patrón, proceso, estado estable) global
- Ese fenómeno global, lo puede observar un observador o el mismo sistema.
- Esa observación es posible si:
 - Existe una descripción del fenómeno
 - El observador o el sistema pueden interpretar esa descripción.

En esta definición aparece el problema de interpretación de las descripciones, lo que proporciona dos sentidos posibles al fenómeno emergente. Un primer sentido, donde las descripciones se refieren básicamente a la interpretación de la realidad comprendida. El problema se resume entonces a “otra manera de hablar de las cosas”. En estos casos, la tarea se limita a una actitud interpretativa de los fenómenos observados. Un segundo sentido, más vinculado a la emergencia (proporciona una manera de ir más allá), justifica el fenómeno global (como un comportamiento del sistema).

5.1.4 Ejemplos de Técnicas Inteligentes y su relación con la emergencia

Ya vimos en el capítulo 2, como el modelo computacional del cerebro permite la emergencia de ciertas capacidades, lo que le posibilita realizar ciertas tareas complejas, como las de reconocimiento de patrones, entre otras. Algunas de las propiedades/capacidades, que emergen a partir del comportamiento colectivo de las neuronas, son [21]:

- *La de generalización*: entendida como la posibilidad de generalizar una información, de tal manera de constituir patrones alrededor de ella. Así, un grupo de información será caracterizada por ese patrón genérico constituido desde él
- *La de asociación*: entendida como la posibilidad de asociar información que se encuentre almacenada, ya sea porque pertenezca al mismo grupo (patrón), o porque tengan algún tipo de relación
- *La de robustez a fallos*: entendida como la posibilidad de mantener sus capacidades funcionales (aunque a veces con cierta degradación), a pesar de fallar algunos de sus componentes.

También, en el ámbito de la computación evolutiva se modela uno de los fenómenos emergente más interesantes de la biología, como lo es el evolutivo. En general, la programación evolutiva define un tipo de programa informático, basado en la sucesión de etapas (generaciones) de alteración aleatoria de cromosomas (individuos), acoplado a un mecanismo de selección de los más aptos entre ellos [21]. Básicamente, la computación evolutiva codifica las reglas de interacción entre los individuos, a través de los operadores de reproducción y mecanismos de selección, y durante las generaciones van emergiendo patrones genéricos más aptos a los requeri-

mientos definidos/codificados en la función de aptitud. Esa emergencia de patrones genéricos, es lo que va quedando plasmado en los cromosomas de los individuos que van sobreviviendo a través de las generaciones.

Finalmente, los autómatas celulares son una herramienta eficiente para experimentar y visualizar fenómenos emergentes. A través de ellos, es muy fácil modelar situaciones con agentes simples distribuidos espacialmente. Reglas simples de interacción entre ellos, pueden dar nacimiento a fenómenos emergentes de gran complejidad. Dichos agentes articulan sus interacciones en sus vecindades. La evolución de estado de dichos agentes, respeta un conjunto de reglas simples que determinan el estado siguiente. Un ejemplo es el juego de la vida, cuyas reglas son [21]:

- Si el color actual de la casilla es negro, y 2 ó 3 de sus 8 casillas vecinas son negras, su siguiente color es negro
- Si el color actual de la casilla es blanco, y 3 de sus 8 casillas vecinas son negras, ella cambia a negro
- En el resto de casos cambia a blanco

Basada en esas reglas, se genera un comportamiento por pantalla impresionante (animaciones). A nivel micro es fácil explicar las reglas de base, pero a nivel macro se necesita mucho tiempo, para analizar los fenómenos gráficos que van apareciendo. Por ejemplo, no es fácil explicar por qué el juego de la vida oscila en todas las animaciones, entre las dos posibles figuras, mostradas en la figura 5.22.

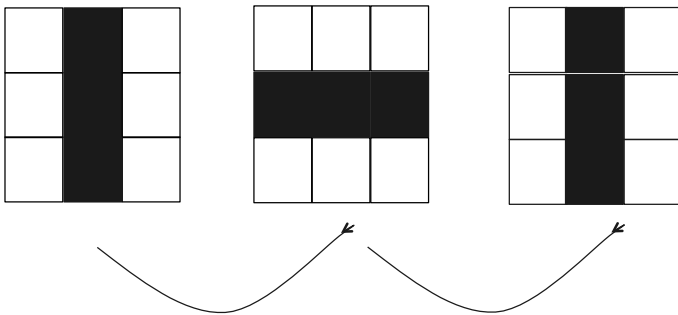


Figura 5.22. Ejemplo de una Simulación de un Autómata Celular en el caso del Juego de la Vida, basado en las 3 reglas simples antes enunciadas, que generan ese efecto de oscilación.

El observador logra verlo en su sistema perceptivo, realizando un análisis espacial y temporal del fenómeno. En general, los autómatas celulares permiten la emergencia de patrones muy variados, por la siguiente premisa: las reglas de propagación generan un efecto colectivo.

5.1.5 Robótica Colectiva

En general, en estos últimos años, la robótica colectiva (enjambre de robots, etc.) ha experimentado un considerable desarrollo. Ese es uno de los ámbitos prometedores de aplicación de la emergencia, donde algoritmos de hormiga han sido usados de diferentes maneras, como forma de inspiración. Aspectos interesantes que se han querido explotar, tienen que ver con el comportamiento de animales que viven en grupo, en específico, sus formas de agregación, de interacción y de intercambio de información, las cuales permiten el surgimiento de complejos comportamientos colectivos. Por ejemplo, el proyecto *Swarm-bots* (www.swarm-bots.org) está dedicado al estudio de los algoritmos de hormigas, para aplicaciones de robótica colectiva.

Lo que se busca es explotar las estrategias que ha desarrollado la naturaleza, para resolver problemas colectivos, a través de la organización descentralizada y la coordinación de muchos agentes autónomos, que se auto-organizan [106, 198]. Entre todos estos comportamientos auto-organizados, la agregación es una de las más simples, pero también de las más útiles. De hecho, la agregación es un primer paso hacia muchos más complejos comportamientos colectivos, ya que favorece las interacciones e intercambios de información entre los individuos, dando lugar a la aparición de complejos comportamientos colectivos auto-organizados [106, 198]. [106] mostró que un agrupamiento basado en el paradigma de estigmergia, da lugar a grupos diferentes de robots. En [69] fue implementado un modelo de agregación de cucarachas, usando un grupo de micro-robots *Alice*, reproduciendo con éxito la dinámica de agregación observada en cucarachas reales. Ese proceso de agregación, basado en un conjunto pequeño de sencillas reglas de comportamiento de interacción, es utilizado por el grupo de robots, para seleccionar colectivamente un sitio entre dos refugios. Cuando los refugios son de diferentes tamaños, los robots prefieren elegir el mayor de los dos, pero sin ser en forma individual capaces de medir su tamaño. El mecanismo de agregación, le permite a los robots como

grupo, “estimar” el tamaño de cada sitio, durante el proceso de toma de decisiones colectivas, una capacidad que no está explícitamente codificado a nivel individual.

En [69] demuestran que, robots con capacidades sensoriales y cognitivas limitadas, son capaces de tomar una decisión colectiva de agregación auto-organizada. El modelo de agregación auto-organizada, está inspirado en un modelo biológico estocástico de las cucarachas *Blattella germanica* [69]. El modelo establece que la tasa de parada de un individuo aumenta, y la tasa de dejar el grupo disminuye, cuando el número de cucarachas que se detuvo en ese vecindario aumenta. La dinámica de la agregación se caracteriza por tres parámetros: tamaño del grupo/refugio, número de grupos y número de individuos aislados. En los experimentos que realizaron, concluyeron que el grupo de robots elige preferentemente un sitio, que es lo suficientemente grande para albergar a todos sus miembros. Esto implica que el grupo de los robots es capaz de “sentir” y “comparar” el tamaño de los sitios, durante el proceso de decisión colectiva.

Este es un ejemplo de emergencia en robótica colectiva interesante, a partir de mecanismos auto-organizados y una plantilla ambiental, dando lugar a la aparición de un comportamiento colectivo complejo, y de nuevas capacidades colectivas, no explícitamente codificados en el modelo básico de agregación. Otras perspectivas interesantes en robótica colectiva, desde mecanismos auto-organizados y/o conductas biológicamente inspirados, para efectuar tareas complejas en una forma eficiente y robusta, con numerosos grupos de pequeños robots autónomos, deben ser estudiadas.

5.2 Constatación de la emergencia

5.2.1 La emergencia en los SMA cognitivos

Hoy en día, el desafío es diseñar sistemas complejos, que estén en ambientes cambiantes. Los SMA son una respuesta para modelarlos [20]. Por otro lado, la emergencia es un paradigma prometedor para hacer estos sistemas adaptables. El reto consiste en encontrar comportamientos correctos en el nivel de agentes, para hacer que la función global adecuada emerja. Por lo tanto, el diseño es ascendente, y la dificultad es encontrar el comportamiento correcto en el micro-nivel (es decir, en los

agentes), para obtener un comportamiento coherente, o función adecuada, en el macro-nivel (es decir, a nivel del sistema). En los SMA, las interacciones entre los agentes del sistema modifican la función global, y hacen que el sistema se adapte a los cambios en su ambiente. Para ello, los agentes tienen que ser dotados de características que localmente cambien esas interacciones. Las interacciones entre los agentes, deben depender de su opinión local, y de sus capacidades de “cooperar” con otros. Esto permite que se adapten permanentemente a las situaciones imprevisibles.

Lo fundamental en estos sistemas es que los agentes deben tener una actitud social de cooperación en sus relaciones, para encontrar la organización del sistema correcta, y por consiguiente, la función colectiva correcta. La cooperación en el nivel del agente es realizada de manera prescriptiva¹⁰³. El punto principal para los diseñadores de tales sistemas, es encontrar y enumerar todas estas situaciones no cooperativas. La mayoría de las metodologías de desarrollo de SMA se concentran en especificar los elementos microscópicos del agente, el desafío es cómo caracterizar esos aspectos microscópicos del agente, que dejen fluir las características emergentes macroscópicas [150].

Otro aspecto interesante de los SMA es la noción de los roles de los grupos, como abstracciones para caracterizar la actividad de los agentes [149]. Los roles describen los comportamientos normativos de un agente (permite clasificar los comportamientos de un agente). En [149] plantean un modelo de Agente-Grupo-Rol (AGR), para expresar el comportamiento cambiante de los grupos de individuos. En general, el modelo consiste en un grafo dirigido $G = (V, E)$, donde V denota el conjunto de nodos, los cuales representan valores acumulativos de cuatro tipo: tipo de rol (indica el número de agentes ejecutando un específico rol), miembros de grupo (denota los agentes que son miembros de grupos específicos), contador del grupo (es cuando los grupos se crean dinámicamente, este nodo sirve para llevar el número de grupos de un tipo específico) y característica del ambiente. Los arcos (E) entre los nodos describen las contribuciones a los valores acumulativos de los nodos, pudiendo ser de sustracción (-) o adición (+). Además, cuando hay un ciclo, representa una retroalimentación que puede ser para balancear (B) o reforzar (R). Un ejemplo de ese modelo es dado en la figura 5.23, para un SMA que modela el problema productor-consumidor.

¹⁰³ Un agente intenta evitar las situaciones que juzgue, desde su punto de vista, no cooperativas.

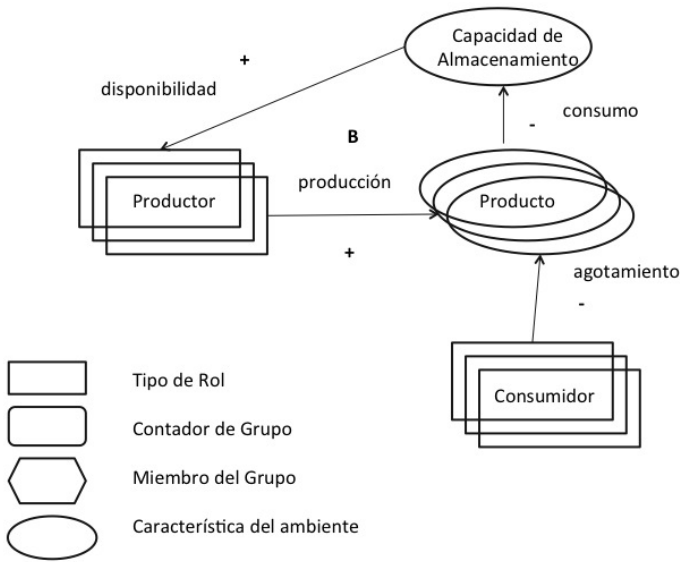


Figura 5.23. Ejemplo de Modelo de un SMA (basado en [149]).

En [150] presentan los principios de la estigmergia, en el contexto de los SMA con agentes inteligentes, es decir, sociedades de agentes que interactúan en el nivel cognitivo, para alcanzar sus objetivos. Tales agentes no son, por lo tanto, reactivos, como en el caso de las hormigas, pudiendo ser racionales, heterogéneos, con capacidades de adaptación y de aprendizaje. Ese enfoque ha sido referido en la literatura como *estigmergia cognitiva*, distintos a los enfoques existentes de estigmergia en SMA, que se basan normalmente en sociedades de agentes, cuyas capacidades y comportamientos son similares a los de los insectos. Al igual que en el caso de la estigmergia clásica, el medio ambiente es un concepto central para la estigmergia cognitiva, como facilitador y mediador del trabajo de los agentes, y de sus interacciones.

El conjunto de agentes tendrá sus propias tareas y objetivos específicos, así como actividades sociales, en el entorno de su trabajo, compartiendo el mismo campo de trabajo con otros. La interacción entre los agentes es indirecta, desacoplada en el tiempo y en el espacio. Además, los agentes son conscientes (i) de su campo de trabajo, (ii) de que es compartido con otros agentes, y (iii) de sus funcionalidades y posibilidades, que deben ser

posiblemente explotadas para lograr sus objetivos. Entonces, como en el caso de la estigmergia clásica, el punto principal es que el ambiente no es una mero “contenedor” pasivo, sino que incorpora mecanismos que promueven la aparición de comportamientos coordinados locales y globales.

Para ello, usan el concepto de artefactos, como abstracción que representa las herramientas u objetos (dispositivos) que los agentes pueden, de forma individual o colectivamente, utilizar para apoyar sus actividades, diseñados para encapsular y proporcionar diferentes tipos de funcionalidades o servicios [72, 94]. Los artefactos son las entidades de modelado de un sistema, o partes de un sistema, que caracterizan los recursos o herramientas utilizadas por los agentes, para alcanzar algunas metas. En particular, y diferente a los agentes, los artefactos no tienen ni objetivos internos, ni un comportamiento pro-activo, no tienen capacidades sociales, ni son autónomos, simplemente proporcionan algún tipo de funcionalidad. Los artefactos se caracterizan por: (i) una función, ya que tienen su finalidad prevista, es decir, el objetivo establecido por el diseñador/programador del artefacto, (ii) una interfaz, conjunto de las operaciones que los agentes pueden invocar para utilizar el artefacto y explotar su funcionalidad; (iii) una especie de manual de instrucciones, que contienen una descripción de cómo usar el artefacto (su estructura y comportamiento) y los aspectos internos del artefacto.

Entre sus principales propiedades tenemos: (i) capacidad de ser inspeccionados y controlados, (ii) capacidad de cambiar de acuerdo a las nuevas exigencias o eventos imprevisibles que ocurren en el ambiente (iii) capacidad de vincularse a otros artefactos. Además, a diferencia de los agentes, los artefactos pueden tener una extensión espacial, en otras palabras, un artefacto individual puede ser tanto conceptual como físicamente distribuido. Por ejemplo, un artefacto pizarra puede cubrir los diferentes nodos de Internet, donde los agentes lo utilizan mediante la explotación de una interfaz local.

Teniendo en cuenta esta noción de artefacto, podemos reformular la idea de estigmergia cognitiva, en términos de un conjunto de agentes que comparten un conjunto de artefactos que representan su entorno de trabajo. Este conjunto se dividirá en dos niveles: (i) un nivel de dominio: son los artefactos que representan el objetivo de trabajo del agente; (ii) un nivel de herramientas: son los artefactos que representan las herramientas de trabajo que pueden ayudar a los agentes a hacer su trabajo.

El reto es a nivel de las herramientas, vistas como una red de artefactos vinculados, que se pueden utilizar para mejorar el trabajo colectivo de los agentes que comparten el mismo entorno de trabajo. En el nivel sistémico, estos artefactos están destinados a ser utilizados, tanto para mejorar el conocimiento sobre el uso de los artefactos en el nivel de dominio y, además, para apoyar la construcción social y evolución y adaptación de tales artefactos hacia direcciones que sean útiles para el colectivo de agentes. Para apoyar esta función, los artefactos pertenecientes al nivel de herramienta encapsulan mecanismos estigmérgicos similares a los mecanismos que se encuentran en el caso de sistemas basados en hormigas (sus estructuras de feromonas).

En los enfoques clásicos de estigmergia, la noción de topología y de localidad es típicamente física: la parte del medio ambiente, que puede ser directamente afectada por sus acciones o puede ser percibida. En el caso de la estigmergia cognitiva, esa noción se reformula con la noción de espacio de trabajo: conjunto de artefactos directamente disponibles (utilizables) para un agente.

Las áreas de trabajo desempeñan el papel de “conjuntos abiertos”, que puede cruzar cada agente, donde comparte artefactos. En cada área los artefactos son accesibles y utilizables de diferentes maneras, de acuerdo a los permisos que los agentes tengan en ese espacio, para tales artefactos. La naturaleza y funcionalidad de los artefactos podría conllevar a situaciones donde el principio de localidad física es violado. Esto es evidente en nuestra sociedad, donde artefactos como el teléfono celular, la televisión o Internet, permiten observar e interactuar en forma directa con otras entidades - por ejemplo, los seres humanos - ubicados en otros lugares del mundo. Conceptualmente, la acción de un agente sobre un artefacto de su área de trabajo (su localidad), puede tener un efecto “instantáneo” en un espacio de trabajo completamente diferente, donde ese artefacto también pueda ser usado.

Ahora hablemos de las feromonas. En todos los sistemas estigmérgicos, el efecto de las acciones del agente en el medio ambiente se entiende como signos, que una vez creados persisten, independientemente de su creador, y son observables por los demás agentes, destacándose que desde el punto de vista físico un artefacto (en contra de un agente), se puede distribuir a

través de sitios múltiples. Además, es un objeto manipulado por el propio entorno, de acuerdo a las leyes que caracterizan los procesos estigmérgicos - por ejemplo, la difusión y la evaporación. A diferencia de las feromonas en el caso de la estigmergia basada en hormigas, en el caso de la estigmergia cognitiva, tales signos son típicamente simbólicos, una pieza de conocimiento general, que puede tener información de calidad y cantidad, con una semántica formal o informal (son anotaciones).

Volviendo a los dos niveles previamente introducidos, las anotaciones son útiles, en primer lugar, para expresar algún tipo de comentario o conocimiento de los artefactos (por ejemplo, sobre el uso del artefacto), para objetivar los comentarios o reflexiones sobre una práctica de trabajo, etc. Además, las anotaciones se pueden utilizar para expresar un comentario sobre las mismas anotaciones. El conocimiento proporcionado por una anotación es, a la vez explícito (el contenido de la anotación), como implícito (la “forma” y el contexto de la anotación). El concepto de anotaciones puede considerarse análogo al concepto de actos de habla.

Algunos de los artefactos en el espacio de trabajo en estigmergia cognitiva se dedican a la gestión de las anotaciones (agregación, difusión, etc.). Hay dos tipos básicos de anotaciones: (i) anotaciones explícitas creadas intencionalmente por los agentes (estas incluyen, por ejemplo, comentarios del agente sobre la evaluación de un artefacto, comentarios acerca de una anotación específica, etc.), (ii) anotaciones creadas automáticamente por los artefactos para apoyar sus actividades de trabajo (ejemplos incluyen anotaciones de presentación de informes sobre la cantidad de un artefacto utilizado, cuántos agentes explotan un artefacto para sus fines, número de agentes que consideran útil una anotación para sus fines, etc.).

Como se mencionó antes, la estigmergia cognitiva está destinada a ser útil para modelar sistemas sociales complejos, con el fin de analizar la emergencia social desde comunidades de agentes, con miras a lograr algún tipo de comportamiento social fructífero, a pesar de las actividades individuales de los agentes.

En general, muchos otros modelos de SMA se han propuesto en la literatura, basados en los mecanismos de sincronización del vuelo en las aves, en los procesos de migración en los animales, etc. [199]. Los modelos suponen que los individuos se alinean y se atraen entre sí, y

que la interacción, por lo general está relacionada con la distancia entre los individuos. Un gran número de modelos adopta una definición de interacción métrica, tal que cada agente interactúa con todos los agentes dentro de una métrica de distancia.

En [199] analizan teóricamente la topología de interacción de un SMA. El modelo consta de n agentes autónomos $(1, \dots, n)$. Cada agente se mueve en el plano con la misma velocidad absoluta v , con la dirección actualizada por la dirección media de sus vecinos (la vecindad son los m individuos más cercanos). Sea $(x_i(t), y_i(t)) \in \mathbb{R}^2$ la posición del agente i , $\theta_i(t) \in (0, 2\pi)$ su dirección. La dinámica del agente i puede ser descrita por:

$$\begin{cases} x_i(t+1) = x_i(t) + v \cos \theta_i(t) \\ y_i(t+1) = y_i(t) + v \sin \theta_i(t) \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\theta_i(t+1) = \frac{1}{m+1} \left(\sum_{j \in N_i(t)} \theta_j(t) + \theta_i(t) \right) \quad (5.7)$$

Donde, $N_i(t)$ es el conjunto de vecinos definido como [200]:

$$N_i(t) = \left\{ j, \text{uno de los } m \text{ agentes mas cercanos a } i, m \leq n-1 \right\} \quad (5.8)$$

Dado que la topología de interacción no es simétrica, la relación de vecino entre los agentes es asimétrica. Las relaciones de vecindad entre los agentes se pueden representar por grafos dirigidos. Un grafo dirigido (digrafo) $G = (V, E)$, consiste en un conjunto de vértices $V = \{1, \dots, n\}$ y un conjunto de arcos $E = \{(i, j)\}$ (un arco $(i, j) \in E$, significa que el agente i es un vecino del agente j). Un camino que conecta i y j es una secuencia de vértices distintos i_0, \dots, i_m , donde $i_0 = i$; $i_m = j$, y $(i_l, i_{l+1}) \in E$; $0 \leq l \leq m-1$. Un digrafo se llama fuertemente conexo, si para cada par de vértices distintos existe un camino que los conecta. Un digrafo tiene un árbol de expansión, si y sólo si existe un vértice $i \in V$, llamado raíz, de tal manera que hay un camino desde i a cualquier otro vértice.

Se puede definir una matriz del sistema $P(t) = [P_{ij}(t)]$ con

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{1}{m+1} & \text{para } j = i \text{ o } j \in N_i(t) \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (5.9)$$

el sistema se sincroniza con el tiempo, si existe una constante $\eta > 0$, tal que

$$\lambda + \alpha \varepsilon < 1 \quad (5.10)$$

$$v \alpha \Delta \theta(0) \frac{1}{1 - (\lambda + \alpha \varepsilon)} < \frac{\eta}{2} \quad (5.11)$$

Donde $\lambda = r(P(0)^\alpha)$, $\Delta \theta(0) = \max_{ij} |\theta_i(0) - \theta_j(0)|$, $\varepsilon = 2$, α es un entero pequeño, y $r(B)$ para una matriz B es: $r(B) = 1/2 \max_j \sum_{i=1}^n |b_{is} - b_{js}|$.

Como se puede ver, las condiciones de sincronización son sólo impuestas a los estados iniciales. Algunos comentarios se pueden deducir a partir del modelo de sincronización anterior, entre la velocidad v , los valores iniciales, y la densidad del grupo:

- Si todos los agentes tienen la misma dirección, entonces la velocidad v puede ser arbitrariamente grande,
- Si la densidad del grupo es baja, entonces h podría ser elegido grande, lo que podría permitir una alta velocidad para los agentes,
- Si la densidad es alta y hay diferencias grandes en las direcciones, entonces una velocidad grande conlleva a la formación de grupos aislados (los agentes vecinos entre sí, forman un grupo).

Con el fin de garantizar la sincronización del grupo, los agentes deben comunicarse entre sí constantemente. Si el grupo se divide en varios grupos pequeños, y los agentes en un grupo no tienen comunicación con agentes en otros grupos, cada grupo se moverá por sí mismo. Por lo tanto, el número de vecinos de cada agente debe ser suficiente como para evitar la existencia de grupos aislados. La pregunta natural que surge, es cuantos vecinos se necesitan para la sincronización. En estudios experimentales hechos en [199], proponen que $m = 5 \log n$.

Ahora bien, en general, el número necesario de vecinos debe aumentar a medida que aumenta la densidad. En el caso de las aves, ellas necesitan su propio espacio para evitar colisiones, la densidad de ellas tienen un límite superior, en este caso, el número de agentes en una unidad es el límite superior. Ahora, desde una perspectiva teórica, de seis a siete vecinos podrían ser suficientes para la coordinación de los movimientos.

Así, este es un estudio teórico sobre los SMA, para analizar su interacción topológica, y establecer las condiciones suficientes para la sincronización del grupo, basada en la relación entre la velocidad, la ubicación inicial y la densidad del grupo. El número de vecinos necesario para la sincronización, en aras de la conectividad, debe aumentar a medida que la densidad del grupo sea mayor. Esto permite realizar coordinados movimientos, a través de la interacción con otros vecinos, ya que la densidad es limitada por el espacio necesario para que cada agente evite colisiones.

En [176] estudian cómo modelar, simular y analizar la dinámica de formación de opiniones en las sociedades, usando agentes, donde los individuos pueden beneficiarse de las fuentes de información: opinión pública en Internet; sistemas de difusión de información, etc. El estudio de tales procesos es de gran importancia, particularmente en sistemas emergentes, para entender la creación de consensos a gran escala. El modelo de *Confianza Limitada* es uno de los modelos de formación de opinión más famosos. Se basa en que el agente ajusta su opinión, cuando el acumulado de una opinión está por debajo de un umbral determinado. El modelo de *Confianza Limitada* se puede extender, con una forma de comportamiento colectivo de un gran número de agentes que interactúan, con un objetivo común del grupo [176]. Veamos la descripción detallada de ese modelo:

Supongamos una población de N agentes, donde cada agente i tiene x_i opiniones. Cada agente tiene un radio de vista r_i , una función de confianza $w_i(j, t)$ con respecto al agente j , y una función de distancia $d(i, j, t)$. Además, tiene un umbral de confianza ϵ . Cuando cada agente se mueve en el espacio, sólo puede influir en los agentes en su área de vista. Esto significa que la comunicación de los agentes es local, y limitada por el área de vista. El conjunto de los vecinos del agente i , es definido por

$$\text{Vecino}_i(j, t) = \left\{ j \mid d(i, j, t) \leq r_j, 1 \leq j \leq n, j \neq i \right\} \quad (5.12)$$

Adicionalmente, los vecinos que pueden influir en él conforman el conjunto:

$$Influyen_i(j,t) = \left\{ j \mid |x_i - x_j| < \varepsilon_i, 1 \leq j \leq m, j \neq i \right\} \quad (5.13)$$

Donde, m es el número de vecinos de i. Cuando el proceso de ajuste de opinión comienza, cada agente i se comunica con cada agente en su conjunto de $Vecino_i(j,t)$. Si se supone que el agente i tiene varios vecinos que influyen en él, su función de confianza cumple que:

$$\sum_{j=1}^k w_i(j,t) + w_i(i,t) = 1 \quad (5.14)$$

Donde, k es el número de elementos de $influyen_i(j,t)$. La opinión x_i del agente i cambia en el tiempo t, ponderando cada opinión recibida en el tiempo t con la confianza correspondiente:

$$x_i(t+1) = w_i(i,t)x_i(t) + \sum_{j=1}^k w_i(j,t)x_j(t) \quad (5.15)$$

Cuando el proceso de ajuste de opinión termina, los agentes eligen sus nuevas direcciones de movimiento usando las siguientes ideas: cada agente tiene un valor repulsivo r_radio_i y un valor de gravitación g_radio_i . Cuando los agentes se mueven en el espacio, pueden ser influidos por los otros agentes en su radio de gravitación.

$$ind_i(j,t) = \left\{ j \mid d(i,j,t) \leq g_radio_i, 1 \leq j \leq n, j \neq i \right\} \quad (5.16)$$

Por otro lado, un agente i tiene la dirección de movimiento $cabecera_i(t)$ en el tiempo t, la cual no cambia si $ind_i(j,t) = 0$. De lo contrario, cambia de la siguiente manera: el agente i elige el vecino h cuyo $d(i,h,t)$ es mínimo. Si $d(i,h,t)$ se encuentra entre r_radio_i y g_radio_i , el agente i va a cambiar la dirección según las fórmulas:

$$dir_a(t) = \arctan \frac{\sum_{j=1}^k \sin(cabecera_j(t))}{\sum_{j=1}^k \cos(cabecera_j(t))} \quad j \in ind_i(j,t) \quad (5.17)$$

$$dir_i(t) = \arctan \frac{\sum_{j=1}^k \sin(cabecera_j(t) - cabecera_i(t))}{\sum_{j=1}^k \cos(cabecera_j(t) - cabecera_i(t))} \quad j \in ind_i(j, t) \quad (5.18)$$

La ecuación 5.17 garantiza la sincronización de las velocidades en el grupo, y la ecuación 5.18 garantiza la regla de cohesión. La dirección final es calculada como:

$$cabecera_i(t+1) = cabecera_i(t) + dir_a(t) + dir_c(t) \quad (5.19)$$

Pero si $d(i, h, t)$ es menor a r_radio , entonces i y h están demasiado cerca y se deben repeler, por lo que la formula de la dirección final es calculada como:

$$cabecera_i(t+1) = cabecera_i(t) - cabecera_h(t) \quad (5.20)$$

Cada agente ajusta su dirección al mismo tiempo, se mueve un paso y espera para ajustar de nuevo las opiniones. Este modelo puede utilizarse para simular el proceso de opinión pública en Internet, etc. Es un modelo de emergencia de soluciones, resolviendo los problemas de integración de opiniones [176]. En general, es una forma de la comunidad de agentes de enfrentar un alto nivel de incertidumbre de su entorno, como efecto de la cooperación de todos.

5.2.2 MASOES

Otro interesante aspecto de los sistemas emergentes es poder identificarlos, caracterizarlos, etc. Para ello, la idea es proponer herramientas que puedan caracterizar las propiedades de sistemas reales, y a partir de ellas, intentar determinar cuáles de esos sistemas son emergentes. Ese sería un paso decisivo hacia la generación de sistemas emergentes artificiales. En ese sentido, en [135, 136, 137, 138] se propuso una arquitectura multiagentes para caracterizar sistemas emergentes y auto-organizados llamada MASOES (por sus siglas en inglés, “*Multiagent Architecture for Self-Organizing and Emergent Systems*”). MASOES es una herramienta para el estudio no formal de sistemas, para determinar si son sistemas emergentes y auto-organizados. Además, en dichos trabajos se propone una metodología para

modelar sistemas reales usando MASOES, a fin de estudiar sus propiedades auto-organizativas y emergentes. A continuación pasamos a presentar un resumen de los trabajos [135, 136, 137, 138].

5.2.2.1. Aspectos Generales Acerca de MASOES

En MASOES, cada agente puede cambiar su comportamiento dinámicamente, guiado por su estado emocional, para satisfacer dinámicamente los objetivos del sistema, a través de la auto-organización de sus actividades. Un agente tiene un modelo afectivo, que permite a MASOES lograr un compromiso entre el comportamiento individual y colectivo, en la sociedad de agentes. Esta capacidad del modelo afectivo para caracterizar las interacciones sociales, lo diferencia de otros modelos emocionales, que se centran normalmente en el estudio de la relación cognición-emoción.

El proceso de aprendizaje y de adquisición de conocimiento que se lleva a cabo en MASOES, se presenta en la figura 5.24: un agente incrementa su conocimiento a través de un proceso de aprendizaje individual, éste interactúa (socializa) con su entorno y con otros agentes usando información local, entonces, a través de un mecanismo “*Bottom-Up*” (que va de lo individual a lo colectivo), el conocimiento explícito colectivo comienza a emerger. Para esto es necesario un proceso de retroalimentación “*Top-Down*” (que va de lo colectivo a lo individual), que promueva el aprendizaje individual (o internalización) de este conocimiento colectivo. Las fases involucradas en el proceso circular causa-efecto de la gestión del conocimiento, que refleja el proceso de creación, conversión, integración y difusión del conocimiento, son las siguientes (ver figura 5.25):

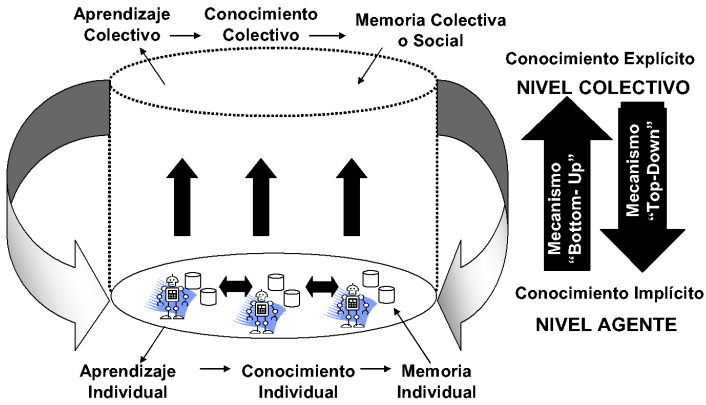


Figura 5.24. Tipos de Conocimiento y Aprendizaje en MASOES (tomado de [136, 138]).

- **Socialización:** La primera fase involucra el proceso de compartir experiencias, a través de las interacciones locales. Esta fase requiere la conversión del conocimiento implícito, a conocimiento explícito, que pueda ser transferible/comunicado a los otros.

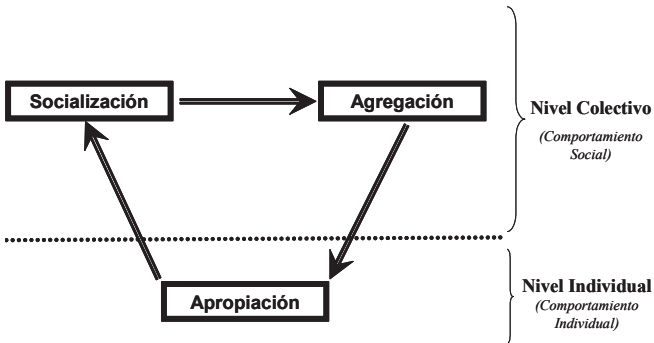


Figura 5.25. Fases involucradas en la Gestión General del Conocimiento en MASOES (tomado de [136, 138]).

- **Agregación:** Es el proceso para crear conocimiento explícito más confiable, a partir del filtrado, fusión, clasificación y ampliación del conocimiento explícito, que viene de diversas fuentes, a través del intercambio de puntos de vista, reuniones, conversaciones, correos, entre otros.

- **Apropiación:** Esta última fase consiste en la traducción del conocimiento explícito en conocimiento implícito. Para la generación del conocimiento implícito individual, será requerido un proceso de aprendizaje individual.

5.2.2.2 Descripción de MASOES

MASOES se divide en dos niveles: *individual* y *colectivo* (ver figura 5.26) y la emergencia cognitiva colectiva es obtenida a través de tres diferentes tipos de interacción:

- **Interacción Local.** Es la influencia (*interdependencia*) entre agentes (directa, a través de alguna forma de comunicación, o indirecta, usando un campo de acción que delimita un área común).
- **Interacción Grupal.** Es originada por el dinamismo de las interacciones locales, que favorece la creación de redes sociales o grupos estructurados, de acuerdo a un objetivo colectivo, conllevando a la gestión del conocimiento de una manera comunitaria y colaborativa.
- **Interacción General.** Es el resultado de la interacción de los agentes, involucrados en el sistema.

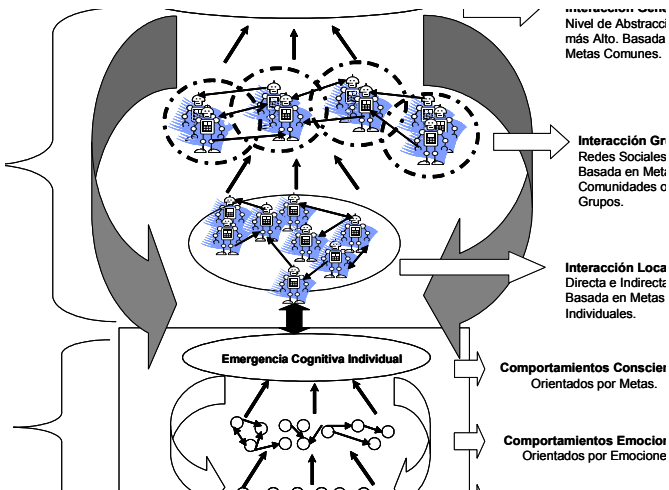


Figura 5.26. Arquitectura Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-Organizados (tomado de [136, 138]).

5.2.2.3 Componentes de la Arquitectura a Nivel Colectivo o Social

Los componentes de la arquitectura a nivel colectivo, son mostrados en la figura 5.27. Para generar un comportamiento emergente, es necesario un conjunto de reglas que especifiquen las interacciones entre los agentes, usando solamente información local. El entorno es un elemento importante para las interacciones indirectas entre los agentes, y para la recolección de la información generada por los agentes. Para este propósito, hay un Campo de Acción y/o una Base de Conocimiento (BC) Colectivo en el sistema. El campo de acción es definido por los agentes, a través de marcas dejadas en el entorno, generalmente, para coordinar sus comportamientos. De esta manera, existen dos tipos de coordinación entre agentes: *coordinación por comunicación directa* y *coordinación dentro de campos de acción* (comunicación indirecta). Con respecto a la Base de Conocimiento Colectivo, es la memoria social o colectiva, a la que todos los agentes tienen acceso. En cuanto a las interacciones entre los componentes en un sistema, podrían generar una retroalimentación positiva, para promover la creación de estructuras y cambios en el sistema, y una retroalimentación negativa, para compensar la retroalimentación positiva, y ayudar a estabilizar el patrón de comportamiento colectivo.

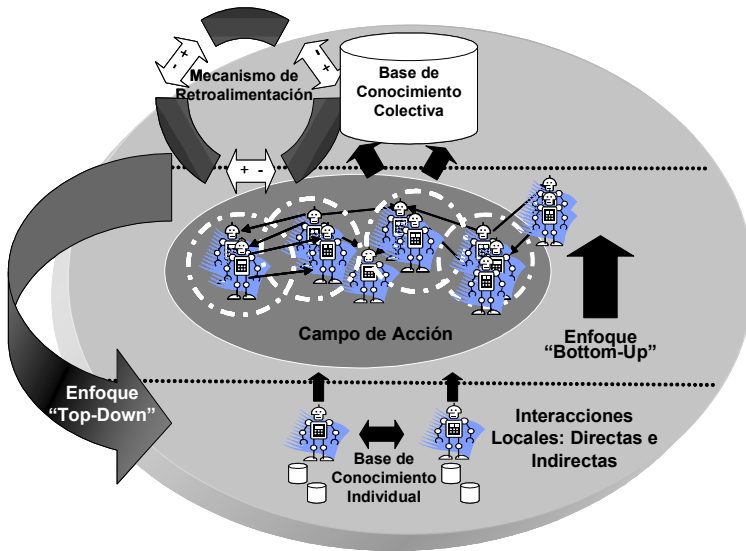


Figura 5.27. Componentes de MASOES a Nivel Colectivo (tomado de [136, 138]).

5.2.2.4 Componentes de la Arquitectura a Nivel Individual

Para posibilitar la emergencia cognitiva individual, se imita la forma en que los seres humanos van de un comportamiento inconsciente a un comportamiento consciente [71]. La caracterización a nivel individual, es conocida como enfoque “Bottom-Up”, y consiste en la caracterización de los comportamientos reactivos, cognitivos, emocionales y sociales, de cada tipo de agente en el sistema. La arquitectura a nivel individual tiene 4 componentes: (ver figura 5.28): Reactivo (procesos reactivos o comportamientos inconscientes); Cognitivo (procesos deliberativos o comportamientos conscientes); Conductual (procesos emocionales y de cambio de comportamiento, o comportamientos orientados por emociones) y Social (procesos sociales o comportamiento social). Para explotar la diversidad, y favorecer la aparición de la emergencia cognitiva, cada agente puede tener diversos comportamientos: reactivo, emocional-reactivo, cognitivo-reactivo, entre otros. A continuación describiremos cada componente de la arquitectura, a nivel individual.

- *Componente Conductual.* Favorece la adaptación de cada agente con su entorno, ya que crea un modelo interno del mundo exterior, que regula su comportamiento de una manera consciente y emocional. Cada proceso de toma de decisiones en el agente, está basado en sus objetivos individuales y colectivos, su estado emocional, y el conocimiento adquirido de manera individual y colectiva. Los tipos de comportamiento a considerar son imitar, reaccionar y razonar, los cuales están enlazados a los componentes social, reactivo y cognitivo, respectivamente (ver figura 5). Entre los elementos que lo conforman está el *Configurador Emocional*, encargado de manipular las emociones del agente. En este caso, las emociones son consideradas como señales y evaluaciones que informan, es en este sub-componente donde está el modelo afectivo. También está el *Manejador de Comportamiento*, que se encarga de activar, inhibir y priorizar algunos comportamientos en el agente, basado en el estado emocional actual, las metas del agente, su situación social (situación de sus vecinos más cercanos), y el entorno en general. Además, maneja todos los mecanismos responsables del cambio dinámico de comportamiento, ya que su objetivo principal es determinar y sugerir un único tipo de comportamiento cada vez, para evitar conflictos en tiempo de ejecución. El conocimiento asociado con la gestión de las emociones, comportamientos y experiencias emocionales pasadas, es almacenado en la *BC Conductual*. El rol de las emociones es determinar el comportamiento del agente según su estado emocional, para ello se asocian las clases de emociones a considerar, con los tipos de comportamiento que puede presentar el agente.

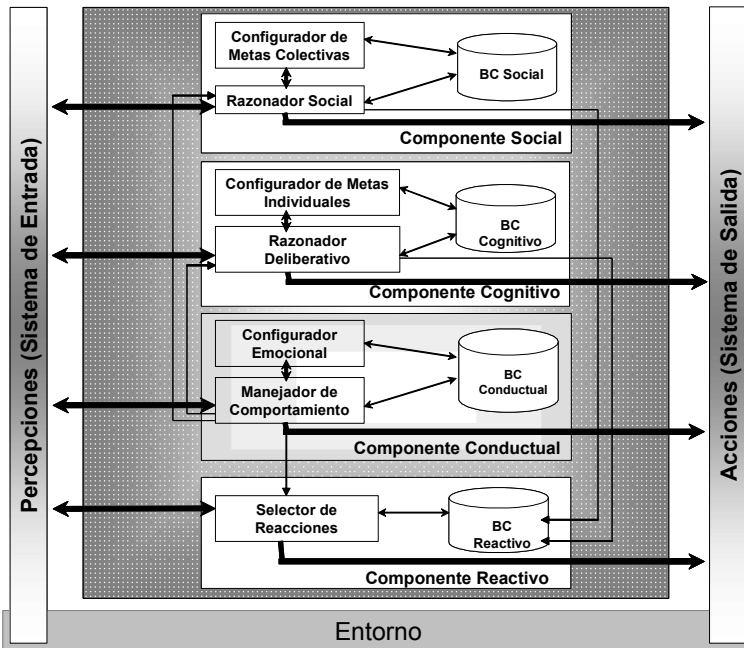


Figura 5.28. Componentes de MASOES a Nivel Individual (tomado de [136, 138]).

- *Componente Reactivo.* Encargado de producir el comportamiento reactivo del agente. Las reacciones son reglas asociadas a los estados emocionales ya que, se quiere tener algunas reglas activas y otras no, de acuerdo al estado emocional del agente, y a la actividad que desarrolla en un momento determinado. Para ello, tiene un Selector de Reacciones, que selecciona entre las diferentes rutinas de comportamiento existentes, es decir, las que serán ejecutadas por el componente reactivo, de acuerdo con el estado emocional del agente. Además, posee una BC Reactivo, para almacenar el conjunto de reglas gestionadas por el componente reactivo.
- *Componente Cognitivo.* Es el responsable de producir el comportamiento cognitivo, a través de diversos mecanismos cognitivos (aprendizaje y razonamiento) y procesos de toma de decisión (intencional o deliberativa¹⁰⁴, entre otras). Posee un Configurador de Metas Individuales, para la configuración de los objetivos individuales y las

¹⁰⁴ Esto significa que las decisiones son tomadas vía razonamiento lógico [137].

prioridades del agente; un Deliberador, responsable de los mecanismos cognitivos (aprendizaje, razonamiento) y de la toma de decisión intencional o deliberativa, entre otras; y una BC Cognitivo, para almacenar un tipo de conocimiento mucho más complejo que el de la BC reactiva, ya que en este caso, se refiere, por ejemplo, al almacenamiento de conocimiento semántico, lógico, procedural, declarativo, episódico [76].

- *Componente Social.* Debe promover conciencia en los agentes, sobre el trabajo y la experiencia de los otros agentes. Específicamente, aprovecha la experiencia de los otros (aprendizaje social), es decir, evita el aprendizaje de cosas que ya han aprendido sus vecinos. Este componente conecta el aprendizaje colectivo colaborativo, con el aprendizaje individual. Para ello, tiene un Configurador de Metas Colectivas, para la configuración de los objetivos colectivos y las prioridades de los agentes. También tiene una BC Social, para almacenar, entre otras cosas, el conocimiento sobre las decisiones tomadas por sus vecinos, es decir, los agentes más cercanos. Finalmente, posee un Razonador Social, para seleccionar que acción debe ser imitada y de cual agente, basado en las metas colectivas y la utilidad obtenida en casos anteriores. La idea principal es que cada agente pueda aprender del colectivo.

Así, se divide los comportamientos realizados por el agente en diferentes tipos, y las emociones serán usadas como un mecanismo indirecto, en el proceso de toma de decisiones, para evaluar si el comportamiento reactivo, cognitivo o social o conductual es más conveniente o no, para una situación dada, de acuerdo a los intereses individuales y colectivos

5.2.2.5. Metodología para el Modelado de Sistemas Emergentes y Auto-Organizados, a través de MASOES

Para modelar un sistema real usando MASOES, es necesario describir los elementos involucrados, así como los procesos y mecanismos, a nivel individual y colectivo. Para esto, se propone en [136, 138], una metodología que consiste en cuatro pasos:

I) Fase de Análisis: Las características básicas del sistema modelado son descritas, tales como: agentes, tareas y niveles de interacción.

II) Fase de Diseño: En esta etapa se diseña, tanto el nivel individual como colectivo, del sistema modelado.

II.1. Nivel individual

a) Describir y representar los componentes individuales del sistema, que deben ser considerados en el sistema modelado, según MASOES: reactivo, cognitivo, social y conductual.

b) Asociar un comportamiento, o un conjunto de comportamientos (reactivo, cognitivo o imitativo), a cada tipo de agente definido en el sistema modelado.

II.2. Nivel colectivo

a) Describir los componentes colectivos del sistema, esto incluye: Conjunto de reglas de interacción, Campo de acción, Bases de conocimiento, Objetivos colectivos.

b) Describir los procesos colectivos, incluyendo: Formación de redes sociales, mecanismos de realimentación.

III) Fase de Integración: En esta etapa, el conocimiento individual y colectivo de la sociedad de agentes, es integrado. Esta integración es modelada instanciando, para el sistema real, las fases de gestión del conocimiento descritas antes: socialización, agregación y apropiación.

IV) Fase de Comprobación: El modelo del sistema real basado en MASOES, debe ser verificado. Esto es, para los casos donde se conoce que el sistema posee propiedades emergentes o auto-organizativas, es necesario verificar si los modelos basados en MASOES, pueden determinar sus propiedades, del mismo modo observado en los sistemas reales. Esto es realizado a través de un método de verificación propuesto en [135]. Esta herramienta permite determinar lo que sucede con las propiedades emergentes y auto-organizativas del sistema, cuando dicho sistema o su

entorno, sufre cambios. También, ella permite estudiar los sistemas reales con un comportamiento desconocido, con el objetivo de determinar sus capacidades emergentes y auto-organizadas.

5.2.2.6. Bases Teóricas del Método de Verificación para MASOES

Como se dijo antes, se requiere de un método de verificación de propiedades propuesto para MASOES, el mismo se basó en el paradigma de la sabiduría de las multitudes (PSM) [178] y los mapas cognitivos difusos (MCD) [6, 7].

De acuerdo al Paradigma de la Sabiduría de las Multitudes, la inteligencia colectiva (sabiduría global) emerge de los conocimientos de los individuos dentro de un grupo, tal que eventualmente cada individuo dispone de poca información. En la práctica, la inteligencia colectiva tiene más que ver con lo que el grupo desea como un todo, que con la evaluación de la opinión de un experto [178]. Según J. Surowiecki, hay tres tipos de problemas que pueden ser resueltos por la inteligencia colectiva [178]:

- *Problemas Cognitivos*: Se refiere a problemas que siempre tienen una solución. Y si no existe una única solución, hay unas mejores que otras. Un problema cognitivo requiere mucho conocimiento, difícil que esté concentrado en un experto. Estos tipos de problemas producen una solución, que “promedia” el proceso de pensamiento de las personas involucradas.
- *Problemas de Coordinación*: En estos tipos de problemas, los miembros de un grupo se ven en la necesidad de armonizar sus comportamientos. Estos problemas suponen tomar en cuenta lo que uno piensa, y lo que piensan y hacen los demás.
- *Problemas de Cooperación*: Se refiere a cómo los grupos de personas pueden formar redes de confianza, sin que un sistema central controle sus comportamientos, o directamente obliguen un acatamiento. Las personas que buscan satisfacer su propio interés, se ven en la necesidad de lidiar con los demás, para obtener una solución, que sea buena para todos.

MASOES debe enfrentar estos tipos de problemas, porque intenta modelar, por ejemplo, sistemas sociales. De ahí que se utilicen los principios que se han establecido en el PSM, para la emergencia de la inteligencia colectiva [178]:

- *Diversidad de Opinión*: Los individuos deben poseer opiniones, lo suficientemente diversas, como para poder abarcar todo el espectro de posibles opiniones.
- *Independencia de Opinión*: cada persona debe sentirse verdaderamente libre para expresar su opinión, tratando que esta última no sea influenciada por los demás.
- *Descentralización*: supone que cada quien ponga a prueba su propio punto de vista, en vez de responder a directrices que vengan desde arriba.
- *Agregación*: debe haber un mecanismo que exprese, resuma, y convertida, los aportes individuales (conocimiento individual) en aportes colectivos (conocimiento de grupo).

Según los estudiosos del PSM, las situaciones en que la emergencia de la inteligencia colectiva falla es porque hay demasiada homogeneidad, o centralización, o división/dispersión, o imitación, o emotividad.

5.2.2.7 Descripción del Método de Verificación para MASOES

Para la verificación del modelado realizado con MASOES, se definen dos tipos de conceptos:

- *Conceptos Arquitectónicos*: son los conceptos asociados a los componentes a nivel individual y colectivo propuestos en MASOES, tales como: agentes, interacciones directas e indirectas, mecanismos de aprendizaje, de retroalimentación y de agregación, entre otros.
- *Conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas*: son los conceptos asociados a los criterios de verificación, que se espera garanticen la emergencia y auto-organización, en un sistema complejo modelado con MASOES: densidad, diversidad, independencia, síntesis/agregación, emotividad, auto-organización y emergencia. Son conceptos, que una vez instanciados en una aplicación, deberían

asegurar la existencia de ciertos fenómenos emergentes auto-organizados, tales como: calidad del contenido, formación de grupos, generación de reglas, entre otros.

5.2.2.7.1 Definición de los Criterios de Verificación

En este caso, se supone que la emergencia y auto-organización en un sistema complejo, podrían surgir de los conceptos vinculados a sus propiedades, tales como: densidad, diversidad, independencia, agregación y emotividad. Estos conceptos serán los criterios de verificación a utilizar (se definen en la tabla 5.5). Estos criterios de verificación, miden cada una de las fases establecidas en MASOES, para la gestión de conocimiento (ver tabla 5.4).

Fase de MASOES	Nivel en la arquitectura	Criterio de verificación asociado
Socialización	colectivo	Densidad, diversidad
Agregación	colectivo	síntesis
Apropiación	individual	Independencia, emotividad

Tabla 5.4 Asociación de las fases para la gestión de conocimiento propuestas en MASOES, y los criterios de verificación definidos

5.2.2.7.2 Mapas Cognitivos Difusos Propuestos

Los MCD propuestos (ver figuras 5.29, 5.30, 5.31) para la verificación de MASOES, establecen las relaciones establecidas entre los conceptos arquitectónicos (componentes del nivel individual y colectivo de MASOES), y los vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas; de esta manera, se tiene un MCD para cada nivel de abstracción considerado: Nivel I (propiedades emergentes y auto-organizadas), Nivel II (conceptos arquitectónicos del nivel colectivo de MASOES), y Nivel III (conceptos arquitectónicos del nivel individual de MASOES). La definición de los conceptos involucrados en cada nivel, es presentado en las tablas 5.5, 5.6, y 5.7, respectivamente.

Concepto	Descripción
Densidad	Mide el grado de complejidad existente en la sociedad de agentes. Se mide a través de la cantidad de agentes y el número de interacciones directas e indirectas, y puede ser: Alta, Media y Baja Densidad.
Diversidad	Mide el grado de homogeneidad o heterogeneidad de la sociedad de agentes. Se mide por la cantidad de agentes de cada tipo de agente definido en el sistema, y pueden ser: Alta, Media y Baja Heterogeneidad. Un sistema homogéneo es más fácil de controlar y comprender. Un sistema heterogéneo será capaz de enfrentarse a más complejidad, y de adaptarse más rápidamente a cambios repentinos.
Síntesis	Mide el grado de agregación en el sistema. Se mide por la calidad del mecanismo de agregación en relación a la calidad del conocimiento colectivo generado, los mecanismos de retroalimentación empleados en el sistema, y el grado de demarcación del campo de acción, que favorece la formación de grupos y la coordinación de las actividades a nivel colectivo. Puede ser: Mala, Regular y Buena Calidad.
Independencia	Mide el grado de autonomía y apropiación de los agentes. Los agentes deben ser capaces de emitir sus opiniones de manera independiente. Se mide por la calidad del mecanismo de aprendizaje empleado por el agente, en función de las decisiones que tomen sin imitar o consultar a los demás, basados en sus comportamientos cognitivo y reactivo, y en el uso de las emociones individuales más que sociales. Puede ser: Alta, Media y Baja Dependencia.
Emotividad	Mide el grado de emotividad en el agente. El estado emocional del agente es determinado, en función de su grado de satisfacción, de acuerdo a los éxitos y fracasos que tenga en el logro de sus metas, de su actitud, y grado de activación/relajación. Puede ser: Alta, Media y Baja Emotividad.
Auto-Organización	Mide el grado de adaptabilidad en el sistema. La adaptación (aprendizaje, evolución) permite al sistema cambiar su comportamiento para enfrentarse al cambio. De ahí que la auto-organización sea un proceso adaptativo y dinámico. Es medida a través del grado de satisfacción del sistema, la anticipación y la robustez.
Emergencia	Mide el grado de evolución del sistema a través de la posibilidad de la aparición de alguna(s) propiedad(es) emergente(s). Algunas cosas que pueden emerger tienen que ver con patrones temporales y/o espaciales. Puede ser: Alta, Media y Baja Emergencia.

Tabla 5.5. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación) involucrados en el MCD del nivel I

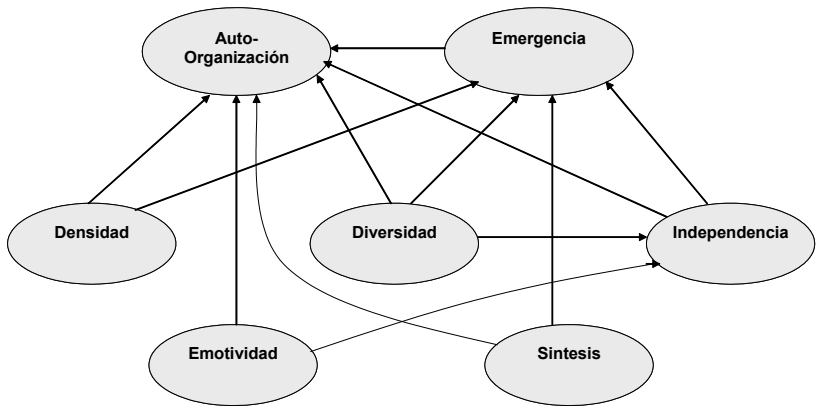


Figura 5.29. MCD del Nivel I para la verificación de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (criterios de verificación) (tomado de [135, 138])

Concepto	Descripción
Nro. de Agente	Se refiere a la cantidad de agentes en el sistema. Puede ser: Alta, Media y Baja.
Tipo Comportamiento Agente	Se refiere a los diferentes tipos de comportamiento que pueden tener los agentes: Reactivos, Cognitivos e Imitativos.
Interacción Directa	Se refiere a la cantidad de interacciones entre los agentes del sistema: Alta, Media o Baja.
Interacción Indirecta	Se refiere a la cantidad de interacciones entre los agentes del sistema a través del entorno: Alta, Media y Baja Densidad.
Mec. Retroalim. +	Es un mecanismo de reforzamiento que afecta la agregación, contribuye al comportamiento imitativo o social, y actúa localmente [135, 136, 137, 138]. Puede ser: de Alta, Media o Baja calidad.
Mec. Retroalim. -	Es un mecanismo para estabilizar los procesos y autorregularlos, evitando las fluctuaciones indeseables. Conduce a un comportamiento adaptativo y emergente, favorece la robustez ante nuevas situaciones y actúa globalmente [135, 136, 137, 138]. Puede ser: de Alta, Media o Baja calidad.

<p>Mecanismo de Agregación</p>	<p>Representa la calidad del mecanismo encargado de obtener la información pertinente de cada individuo, y combinarla de manera que pueda hacerla útil al colectivo. Puede ser de Alta, Media o Baja calidad los mecanismos de agregación (para más detalle sobre este criterio ver [135, 136, 137, 138]).</p>
--------------------------------	--

Tabla 5.6. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel I

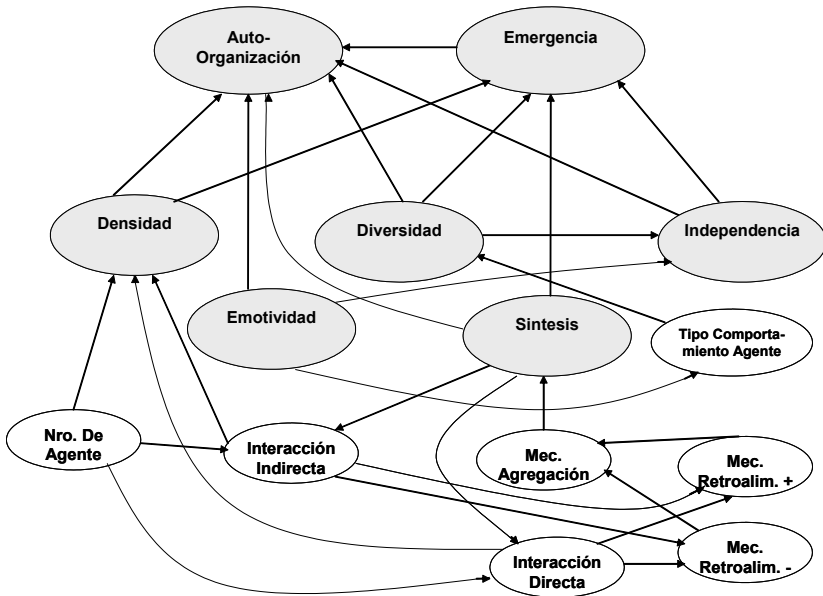


Figura 5.30. MCD del nivel II para verificar los conceptos arquitectónicos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas del nivel I (tomado de [135, 138])

Concepto	Descripción
Componente Reactivo	Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Cognitivo	Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Conductual	Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.
Componente Social	Es el encargado de promover conciencia en los agentes sobre el trabajo y la experiencia de los otros agentes. Puede ser medido en relación a que tan correctamente funciona este componente: Alta, Media y Baja Calidad.

Tabla 5.7. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III

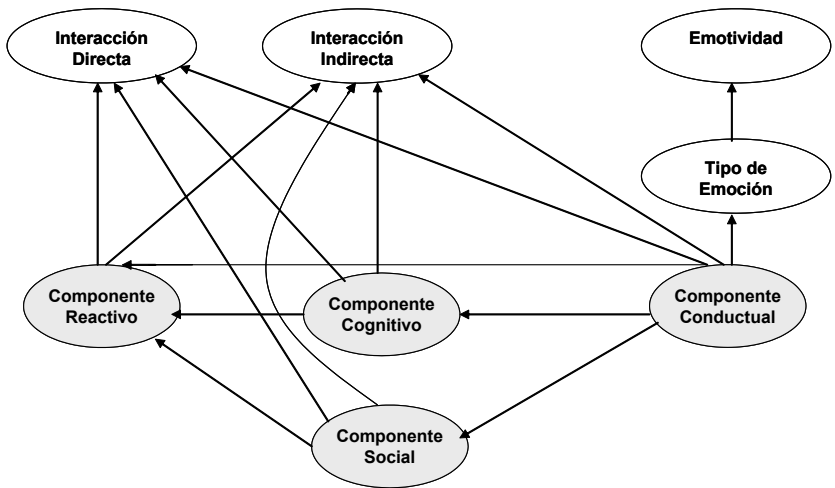


Figura 5.31. MCD del Nivel III para verificar los conceptos arquitectónicos del nivel II y III (tomado de [135, 138]).

5.2.2.8. Metodología para usar el Método de Verificación para MASOES

La aplicación del método de verificación se realiza a través de 3 fases, descritas a continuación:

I. Fase de Inicialización

De acuerdo a [6, 7, 135, 138], esta fase consiste en asignar un peso a cada relación establecida por los expertos, para cada mapa propuesto. Para la asignación de los pesos, se utiliza una escala del 1 al 10, donde 1 representa que el concepto antecedente influye poco sobre el concepto consecuente, mientras que un peso de 10 indica que el concepto consecuente es más sensible a los cambios del concepto antecedente. Además, el signo negativo indica que la relación causal es negativa. Las relaciones son establecidas usando una función de ajuste basada en las reglas definidas más abajo, y los valores que se muestran en la tabla 9. Además, se asume que el estado de los conceptos en un sistema modelado, se puede encontrar en tres zonas: alta, media o baja. Así,

- Se dice que un concepto tiene un estado alto (entre 2/3 y 1), cuando funciona correctamente y contribuye de manera importante con el funcionamiento del sistema modelado.
- Se dice que un concepto tiene un estado medio (entre 1/3 y 2/3), cuando su funcionamiento debe ser validado y/o contribuye de manera no tan importante con el funcionamiento del sistema.
- Se dice que un concepto tiene un estado bajo (entre 0 y 1/3), cuando no funciona y/o no contribuye con el funcionamiento del sistema.

Para el cálculo final del peso de las relaciones, se utiliza la siguiente fórmula, a fin de normalizar los valores [6, 7]:

$$P_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^N w_{kj}} w_{ij} \quad (5.21)$$

Donde, w_{ij} es el peso asociado por el experto a la relación entre los conceptos C_i y C_j , P_{ij} es el peso final asociado a dicha relación, y N es el número de conceptos. Los valores de las relaciones se obtienen por la siguiente tabla:

Valor	Variable Lingüística
1.00	Completa+
0.75	Alta+
0.50	Media+
0.25	Baja+
0.00	Nula
-0.25	Baja-
-0.50	Media-
-0.75	Alta-
-1.00	Completa-

Tabla 5.8. Valores posibles para las relaciones

De acuerdo a los tres estados considerados, y los posibles valores planteados en la tabla 5.8, se podrían construir las siguientes reglas, según [6, 7, 11]:

- Si el concepto antecedente es Alto y el consecuente es Alto, entonces la relación es Completa+ (1.0).
- Si el concepto antecedente es Alto y el consecuente es Medio, entonces la relación es Alta+ (0.75).
- Si el concepto antecedente es Alto y el consecuente es Bajo, entonces la relación es Baja+ (0.25).
- Si el concepto antecedente es Medio y el consecuente es Alto, entonces la relación es Alta+ (0.75).
- Si el concepto antecedente es Medio y el consecuente es Medio, entonces la relación es Media- (-0.5).
- Si el concepto antecedente es Medio y el consecuente es Bajo, entonces la relación es Alta- (-0.75).
- Si el concepto antecedente es Bajo y el consecuente es Alto, entonces la relación es Alta- (-0.75).
- Si el concepto antecedente es Bajo y el consecuente es Medio, entonces la relación es Media- (-0.5).

- Si el concepto antecedente es Bajo y el consecuente es Bajo, entonces la relación es Completa- (-1.0).

Estas reglas se utilizan para calcular todas las relaciones entre los distintos conceptos, pero cada una de ellas tendría un peso asociado por los expertos, que puede variar de relación en relación. Por ejemplo, si se toma la relación entre el Concepto 1 y el Concepto 2, y se supone que el Concepto 2 tiene un estado Alto y el Concepto 1 tiene un estado Medio, entonces la relación resultante obtenida por las reglas tendrá un valor de alta+ (es decir 0.75). Este valor es multiplicado por el peso de la relación, si se asume que el peso de esta relación es de 0.5, entonces el resultado final de la relación será de 0.375 [11].

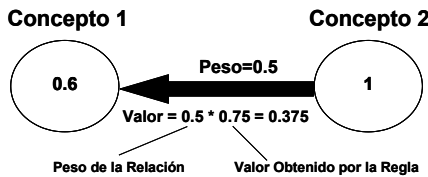


Figura 5.32. Ejemplo para establecer las relaciones entre los distintos conceptos dinámicamente (tomado de [135, 138]).

II. Fase de Ejecución

El algoritmo de ejecución, de acuerdo a los MCD propuestos y la función de ajuste, es el siguiente:

1. Obtener los estados iniciales para todos los conceptos, según el sistema a modelar y el escenario a evaluar ($C_0 = [c_0, \dots, c_n]$).
2. Mientras el sistema no converja a un estado estable:
 - a. Obtener los valores de las relaciones causales a través de $w_{ij} = df_{ij}(C^{t-1})$, donde df_{ij} es la función de ajuste para la relación w_{ij} .
 - b. Obtener los estados actuales a través de $C_j^t = \sum_{i=0}^n (w_{ij} c_i^{t-1})$.

III. Fase de Análisis e Interpretación de los Resultados

Este algoritmo es hecho a través de una herramienta llamada FCM

Designer, que permite crear y ejecutar un MCD (más detalles en [6, 7, 11]). Así, el MCD genérico es diseñado e integrado, con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos del sistema real modelado (ver figura 5.33).

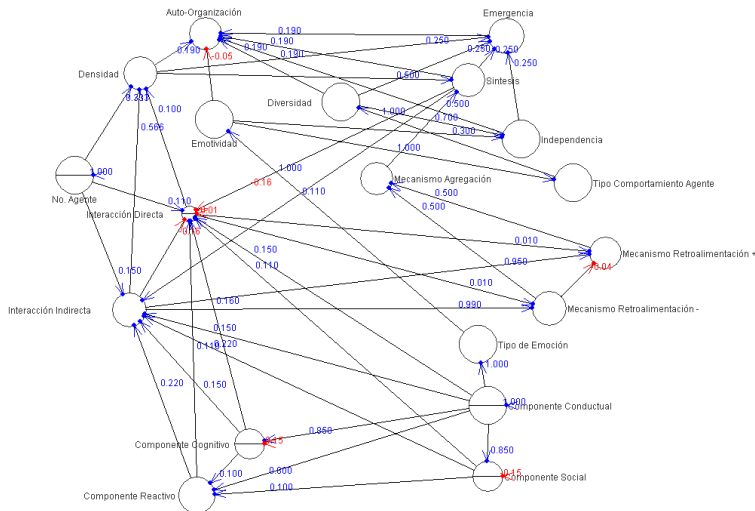


Figura 5.33. MCD integrado con los valores asignados a cada una de las relaciones definidas por los expertos (tomado de [135, 138])

Con MASOES se ha estudiado el comportamiento de grupos de peato- nes, de Wikipedia y de la comunidad desarrolladora del sistema operativo Linux, para estudiar los comportamientos emergentes que se dan en la misma, y que sucede en ciertas situaciones en que se producen cambios en sus comportamientos o entorno [135, 138]. Veamos una descripción breve del uso de MASOES en el caso de Wikipedia, una descripción amplia se encuentra en [138].

Wikipedia es una enciclopedia de contenido libre, que todos por In- ternet pueden editar, por consiguiente, es el resultado de un trabajo colectivo, donde cada artículo es el producto de muchas contribucio- nes. Para usar MASOES para estudiar a Wikipedia, sus componentes y procesos involucrados a nivel individual y colectivo, deben ser caracterizados para verificar si se comporta como un sistema emergente y auto-organizado.

5.2.2.9. Modelado de Wikipedia con MASOES

En esta sección, Wikipedia es descrita a través de MASOES, siguiendo la metodología propuesta antes.

I) Fase de análisis:

I.1. Agentes y Tareas en Wikipedia

Se deben considerar siete tipos de actores de Wikipedia como agentes, con diversos roles y tareas, con una jerarquía definida [201]: anónimo, de software (“bot”), registrado, burócrata, operador del sistema (“Sysop”), administrador (“Steward”) y desarrollador. Los wikipedistas (agentes) interactúan en un espacio común (entorno Web), usando el mismo editor y obedeciendo el mismo conjunto de reglas (ver tabla 5.9).

I.2. Niveles de Interacción

Hay tres niveles de interacción [201]:

- *Local.* Cada agente actúa en concordancia con la información local que tiene, y de acuerdo con sus objetivos. Esas interacciones locales pueden ser indirectas (artículo, páginas de discusiones, portales, etc.) o directas (correo electrónico, chat, etc.).
- *Grupal.* los wikipedistas interactúan recíprocamente, según las normas y los objetivos de la comunidad a la que ellos pertenecen, es decir, los wikipedistas de la comunidad en inglés siguen las normas y los objetivos de Wikipedia en inglés. Este grupo es variable, no predefinido, y es mantenido por sus propios miembros. Además, los wikipedistas se agrupan dentro de la comunidad, por tópicos o áreas de interés, o en comités, para resolver problemas específicos.
- *General.* las interacciones se dan entre las comunidades multilingüe existentes (inglés, español, alemán, etc.), y con otros proyectos de la Fundación Wikimedia (Wikiversity, Wikibooks, etc.). A través de esta interacción, las comunidades y proyectos existentes son capaces de imitar las políticas y acciones que han sido exitosas en alguna de ellas.

Agente	Descripción	Algunas tareas
Desarrollador	Es un agente implicado en el mantenimiento de los servidores y usuarios del sistema, y el desarrollo del software de Wikipedia.	Desarrollar código para mejorar MediaWiki. Hacer páginas de documentación o tutoriales. Mantener los Servidores. Conceder privilegios a administradores y burócratas. Crear portales sobre tópicos específicos.
Administrador	Estos agentes poseen las mismas responsabilidades que los agentes burócratas, además, son capaces de cambiar el rol de cualquier agente y árbitros en cualquier conflicto	Nombrar y eliminar a otros administradores, operadores del sistema y burócratas.
Burócrata	Es una clase especial de administrador que es capaz de nombrar o eliminar a otros administradores y burócratas.	Nombrar y eliminar a otros burócratas y operadores del sistema.
Operador del Sistema (Sysop),	Es un wikipedista que puede acceder a algunas funciones restringidas del software de Wikipedia. Casi todos los poderes de estos administradores son completamente reversibles por cualquier otro sysop	Bloquear y desbloquear IP de usuarios anónimos. Editar en páginas protegidas o bloqueadas. Revertir páginas rápidamente. Editar el espacio de nombres de MediaWiki. Combatir el vandalismo. Borrar páginas e imágenes. Ver y recuperar páginas borradas e imágenes.

<p>Usuario Registrado</p>	<p>Es un agente que ha creado su nombre de usuario con su contraseña. Puede tener una lista con sus contribuciones. También puede tener una página con información personal, tener “una página de discusión” desde donde otros usuarios pueden comentarle cosas o establecer diálogos, etc.</p>	<p>Adquirir experiencia en el empleo de técnicas para la sintaxis y edición de artículos. Mantener su página personal. Demostrar su buena fe, haciendo contribuciones útiles durante un tiempo. Vigilar ciertos artículos (incorporados a su propia lista de seguimiento) para comprobar los cambios introducidos en ellos y participar cuando él lo considere necesario. Participar en la votación por candidatos a artículos sobresalientes, país de la semana y operadores del sistema.</p>
<p>Usuario “Bot”</p>	<p>Estos agentes son como “robots de software” que funcionan tanto autónomamente como manualmente para hacer tareas repetitivas.</p>	<p>Actualizar y mejorar las páginas por tópicos para reducir los enlaces redundantes. Creación de nuevas páginas basadas en información ya desarrollada, y revisión de ortografía.</p>
<p>Usuario Anónimo</p>	<p>Estos agentes no se han registrado en el sistema con un nombre de usuario y una contraseña. Pueden editar casi cualquier artículo o página de discusión pero no tiene algunas funcionalidades.</p>	<p>Editar página de discusión o artículo. Combatir vandalismo. Verificar Derechos de autor.</p>

Tabla 5.9. Agentes con algunas de sus tareas en Wikipedia

II) Fase de diseño:

II.1. Componentes y Procesos de Wikipedia a Nivel Individual

De acuerdo con las tareas desarrolladas por los wikipedistas, es conveniente que los agentes desarrollen los tres tipos de comportamiento propuestos en MASOES (reactivo, cognitivo e imitativo), y que lo puedan cambiar dinámicamente según su estado emocional, como sucede en la realidad (ver [135, 138], donde se explica en específico como usar

MASOES para ello). Para ello, cada agente wikipedista tendrá los cuatro componentes individuales de MASOES (ver tabla 5.10).

Componentes individuales en MASOES	Representación en Wikipedia
Conductual	Los agentes en Wikipedia activan su comportamiento dependiendo de la situación que ellos enfrentan y del estado emocional que tengan en un momento dado. El estado emocional permitirá al componente conductual llevar a cabo el cambio de comportamiento del agente dinámicamente.
Reactivo	Existen mecanismos de supervisión en Wikipedia para asegurar que una página, o un conjunto de ellas, mantengan su calidad. Una persona que desea mantener esas páginas será notificada en caso de cambios, permitiéndole reaccionar en caso de vandalismo. Tendrá un comportamiento reactivo. Igualmente, cuando un wikipedista comete un error, tal como violación de derechos de autor, y es castigado por la comunidad, un comportamiento reactivo puede surgir.
Cognitivo	Es representado por el mecanismo cognitivo de cada agente y sus objetivos individuales. Cuando se producen cambios en el contenido publicado, el wikipedista hace uso de su conocimiento y experiencia para editar, evaluar, discutir y mejorar el contenido.
Social	Almacena el conocimiento importante sobre objetivos, acciones y resultados de las actividades colectivas. Aparte de esto, almacenará por medio de un conjunto de reglas el conocimiento necesario sobre cómo usar la tecnología Wiki. De esta manera, los wikipedistas intentarán no violar los estándares de la comunidad como están descritos en las políticas y términos, persuadir a aquellos que estén incurriendo en faltas, y colaborar en el proceso de aprendizaje de nuevos colaboradores.

Tabla 5.10. Componentes Individuales de MASOES en Wikipedia

II.2. Componentes y Procesos de Wikipedia a Nivel Colectivo

Los componentes y procesos colectivos involucrados en Wikipedia pueden ser vistos en las tablas 5.11 y 5.12, respectivamente.

Componente colectivo en MASOES	Representación en Wikipedia
Conjunto de Reglas	Este conjunto de reglas está formado por todas aquellas reglas establecidas colectivamente, tales como: reglas para la edición de artículos, reglas para la interacción social entre Wikipedistas, etc. En el año 2007 Wikipedia contaba con 20 reglas generales, 21 reglas acerca de cómo trabajar con otros, y 42 políticas [138, 202].
Campo de Acción	es conformado por las páginas de la comunidad donde cada miembro participa, contribuye y comparte su conocimiento.
Base de Conocimiento Colectivo	Aquí se encuentra el contenido de los artículos generados por el colectivo, así como el conjunto de reglas comunes o colectivas para la edición, comunicación, promoción y administración.
Objetivo Colectivo	Generar contenido confiable, abierto, libre y verificable en un idioma específico, según las normas y políticas del proyecto.

Tabla 5.11. Componentes Colectivos de MASOES en Wikipedia

Proceso colectivo en MASOES	Representación en Wikipedia
Formación de Redes Sociales	La interacción social en Wikipedia se da de manera espontánea, autónoma, y se formaliza en redes sociales, a través de la creación de comunidades (grupos de Wikipedistas por idioma) y comités (pequeños grupos de Wikipedistas, basados en objetivos colectivos, creados para cumplir tareas específicas dentro de una comunidad determinada) Las redes sociales en Wikipedia son auto-organizativas, se auto-diagnostican y auto-evalúan.
Mecanismos de Retroalimentación	Con respecto a la generación de contenido, hay mecanismos para promover su generación y depuración: <ul style="list-style-type: none"> • Mecanismo de Aprendizaje Colaborativo • Mecanismo para la Difusión y Obtención de la Calidad. • Mecanismo de Recompensa. • Mecanismo de Castigo.

Tabla 5.12. Procesos Colectivos de MASOES en Wikipedia.

III) Fase de integración:

III.1. Fases para el manejo del conocimiento en Wikipedia

La siguiente tabla presenta las tres fases de MASOES, para la gestión del conocimiento en Wikipedia.

Fase	Representación en Wikipedia
Socialización	Los wikipedistas deben hacer explícito su conocimiento al resto de su comunidad a través de la creación, modificación y eliminación de artículos, entre otras contribuciones. Además, cada wikipedista edita siguiendo una estructura predefinida (plantilla), que facilita la transformación del conocimiento implícito a formas estructuradas y transferibles.
Agregación	Involucra procesos colectivos para la revisión, depuración, eliminación y publicación de las contribuciones. Las revisiones colectivas apoyan: la clasificación de artículos por área, la conexión a otros artículos relacionados, etc.
Apropiación	Los wikipedistas deben registrarse en una comunidad, leer artículos, y aprender sobre las políticas, cómo usar el editor de Wikipedia, y cómo interactuar o comunicarse con los otros miembros a través de los recursos de Wikipedia. Este aprendizaje ocurre por ensayo y error.

Tabla 5.13. Wikipedia a través de las fases de gestión general del conocimiento

Por medio de la representación de las fases de análisis, diseño e integración en Wikipedia, puede afirmarse, de acuerdo con MASOES, que el sistema modelado cuenta con los componentes y procesos claves, tanto a nivel individual como colectivo, para generar un comportamiento emergente y auto-organizativo a nivel macro.

IV) Fase de Comprobación:

En las secciones previas la Wikipedia en inglés es modelada usando MASOES. Para ello, los conceptos arquitectónicos y los enlazados a las propiedades emergentes y auto-organizados, son instanciados en las tablas 5.14, 5.15 y 5.16.

¹⁰⁵ El término wiki, derivado del hawaiano *wiki wiki* (rápido), hace referencia a la tecnología que permite que múltiples usuarios puedan crear y modificar páginas web, de manera conjunta [201].

Concepto	Descripción
Densidad	En Wikipedia, cada artículo es producto de múltiples contribuciones de una gran masa crítica de participantes, que garantizan la calidad del contenido generado.
Diversidad	La diversidad en Wikipedia se observa en los diferentes agentes que participan, tanto en la creación, revisión y mantenimiento del contenido, como en la gestión de la plataforma que soporta a Wikipedia.
Síntesis	La formación de redes sociales en Wikipedia, sus normas y reglas, y el contenido logrado con altos niveles de calidad, es el resultado de un proceso de agregación y depuración colectiva generado a partir de la participación intensa de un gran número de agentes, y del uso de la tecnología wiki ¹⁰⁵ como mecanismo de agregación [201].
Independencia	Cada wikipedista que participa en el proceso de generación de contenido en Wikipedia, se integra inicialmente de acuerdo a sus conocimientos, capacidades, objetivos, e intereses particulares.
Emotividad	Es medida por el grado de satisfacción de los wikipedistas de acuerdo a la actividad realizada, y es influida por los reconocimientos o sanciones obtenidas por sus contribuciones.
Auto-Organización	Wikipedia posee la capacidad de auto-organizarse. Esto es posible, gracias a la supervisión constante del contenido.
Emergencia	La Wikipedia es posible gracias al esfuerzo colectivo de colaboradores en todo el mundo, que de forma voluntaria han contribuido con la redacción de miles de artículos que pueden ser modificados por cualquier persona con acceso a Internet. Esto ha dado paso a la generación de normas, estándares y políticas, que permiten decidir qué información debe o no incluirse, contribuyendo así con la calidad del contenido.

Tabla 5.14. Definición de los conceptos vinculados a las propiedades emergentes y auto-organizadas (Criterios de Verificación), involucrados en el MCD del nivel I, para Wikipedia

Concepto	Descripción
Numero de Agente	El número de agentes que intervienen en la elaboración de un artículo depende de la complejidad del tema planteado. La participación en Wikipedia también es diferente para cada comunidad por idioma, pero en general, la versión en inglés es la que tiene más usuarios. La participación en Wikipedia no es directamente proporcional a la población existente en cada idioma.
Tipo de Comportamiento Agente	Los wikipedistas experimentan diversos tipos de comportamientos en función de las tareas desarrolladas y el rol desempeñado, lo que permite encontrar comportamientos reactivos, cognitivos e imitativos.
Interacción Directa	La interacción directa en Wikipedia es poco común con respecto a las interacciones indirectas. Se presenta cuando surgen conflictos sobre el contenido y edición de un artículo. Algunas herramientas usadas para establecer este tipo de interacciones son el correo electrónico y los chats, entre otros.
Interacción Indirecta	Son las interacciones más comunes dentro de Wikipedia, y se establecen a través del conocimiento generado, entre quién lo produce y quién lo corrige, complementa o usa, para satisfacer sus propias necesidades de información.
Mecanismo Retroalimentación Positiva	Los mecanismos de retroalimentación positiva promueven la creación de estructuras y cambios en la Wikipedia. Dichos mecanismos pueden ser: mecanismo de aprendizaje colaborativo, mecanismos de recompensa, etc.
Mecanismo Retroalimentación Negativa	La aplicación de normas de comportamiento y participación dentro de Wikipedia evidencia la búsqueda de equilibrio en el sistema. Por otro parte, están las reversiones, que se refiere a una situación en la que un usuario cambia un artículo a la versión previamente escrita.

Mecanismo de Agregación	Wikipedia usa una herramienta llamada wiki que permite a cualquiera editar un documento por medio de un sistema de texto estructurado. Todos los tipos de página existentes son agregados a través de esta herramienta. Además, permite llevar un control de versiones de documentos, de modo que generalmente están accesibles todas sus versiones con su respectivo historial. También se pueden comparar con facilidad, y tienen mecanismos de búsqueda por nombre de página y por palabra contenida, entre otras.
-------------------------	---

Tabla 5.15. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel II para Wikipedia

Concepto	Descripción
Componente Reactivo	Representa las reacciones generadas a partir de estímulos dejados por otros miembros de la Wikipedia.
Componente Cognitivo	En Wikipedia es posible lograr un buen nivel de aprendizaje a través del trabajo colaborativo, generado a partir del esfuerzo individual de un gran número de agentes, que siguiendo metas comunes del grupo de trabajo, hacen posible el logro de artículos de alta calidad.
Componente Conductual	Las decisiones tomadas por cada wikipedista determinan el tipo de comportamiento asumido ante una situación dada.
Componente Social	El seguimiento de reglas y políticas dentro de un grupo de trabajo colaborativo como Wikipedia, resulta indispensable para el manejo de las interacciones sociales dadas dentro de las comunidades y grupos formados.

Tabla 5.16. Definición de los conceptos arquitectónicos involucrados en el MCD del nivel III para Wikipedia

5.2.2.9.1 Escenarios y Resultados Aplicados en la Wikipedia en Inglés y Español

Para el desarrollo de los diversos escenarios, se usa el análisis realizado en [129], acerca de las diez primeras Wikipedias a nivel mundial, del que se extrae la información mostrada en las tablas 5.17 y 5.18 para la Wikipedia

en inglés y en español, hasta diciembre 2007. Específicamente, en la tabla 5.17 se muestran las estadísticas generales para ambas Wikipedias, y en la tabla 5.18, se presenta la proporción existente de los tres tipos de páginas más significativas en ambas Wikipedias: las páginas de artículos (“main pages”, en inglés), de discusión de artículos (“talk pages”, en inglés), y de discusión de usuarios (“talk user pages”, en inglés).

Escenario 1: Wikipedia en Idioma Inglés. Es la primera Wikipedia, la más desarrollada, la más visitada, y la que posee más artículos y usuarios registrados [129, 138], de ahí que la instanciación de esta Wikipedia representa el caso ideal, es decir, casi todos los conceptos se cumplen a cabalidad. Por tal razón, la inicialización de los conceptos arquitectónicos del método de verificación para MASOES se hace con un estado alto (ver figura 5.34). Hay dos excepciones: las interacciones directas son inicializadas en un valor bajo (0.25), ya que no ocurren con la misma frecuencia que las interacciones indirectas, y el comportamiento social en un valor medio (0.5), ya que predomina un comportamiento más individual que social entre los participantes de esta Wikipedia [140]. Con respecto a los conceptos asociados a las propiedades auto-organizativas y emergentes, son inicializados en cero, para ver qué valores alcanzan al estabilizarse el sistema.

Total	Artículos	Páginas de discusión de artículos	Usuarios registrados	Nro. de ediciones
Inglés	2.183.496	1.764.252	1.824.439	167.464.014
Español	338.792	73.562	132.239	14.198.257

Tabla 5.17. Estadísticas Generales para las dos Wikipedias

Total	A %	B %	C %	D %	E %	F %	G %	H %	I %	J %	K %	L %	M %	N %	O %	P %
Inglés	40	14	4	27	2	0	7	0	0	0	0	0	2	0	4	0
Español	60	7	3	20	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	6	0

Tabla 5.18. Proporción del número total de páginas para las dos Wikipedias

Donde,

- A: Páginas de Artículos.
- B: Páginas de Discusión de Artículos.
- C: Páginas de Usuarios.
- D: Páginas de Discusión de Usuarios.
- E: Páginas de Wikipedia.
- F: Páginas de Discusión de Wikipedia.
- G: Páginas de Imágenes.
- H: Páginas de Discusión de Imágenes.

- I: Páginas de MediaWiki.
- J: Páginas de Discusión de MediaWiki.
- K: Páginas de Plantillas (“Template”).
- L: Páginas de Discusión de Plantillas.
- M: Páginas de Ayuda.
- N: Páginas de Discusión de Ayuda.
- O: Páginas de Categoría.
- P: Páginas de Discusión de Categoría.

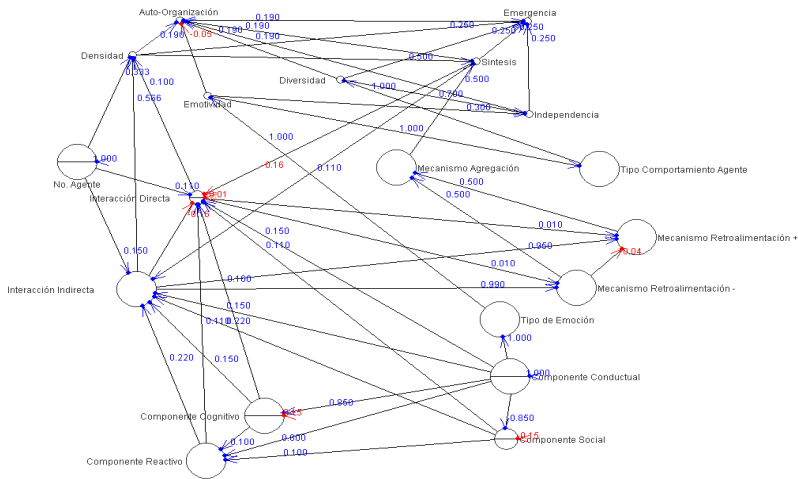


Figura 5.34. MCD Inicial para Wikipedia en Inglés (tomado de [135, 138]).

Según los resultados obtenidos, al estabilizarse el MCD instanciado para la Wikipedia en inglés (ver figura 5.35), el sistema alcanza un nivel de auto-organización de 82% y de emergencia de 93%. Cabe señalar que el número de interacciones directas está en un estado bajo (0.29), las interacciones indirectas (0.87), el componente reactivo (0.95), cognitivo (0.74) y social (0.74) en un estado alto, pero con mayor valor el componente reactivo. Estos resultados coinciden con el estudio cultural realizado en [140], y los resultados obtenidos en [129] (ver tabla 5.18), donde se indica que en la Wikipedia en inglés se prioriza el comportamiento

individual más que el social¹⁰⁶. También, la calidad de los mecanismos de retroalimentación negativa (0.87) es mayor a los de retroalimentación positiva (0.79), esto también coincide con el estudio cultural realizado en [140] y los resultados obtenidos en [104] (ver tabla 5.18), donde se indica que en la Wikipedia en inglés se realizan más acciones correctivas y de borrado (retroalimentación negativa), que acciones de adición o generación de contenidos (retroalimentación positiva). Esto puede ser visto en los resultados de la tabla 5.18, ya que los usuarios registrados de la Wikipedia en inglés se dedican menos a la generación o adición de contenidos (40%) (páginas de artículos), que a las acciones correctivas, de borrado o discusión (60%).

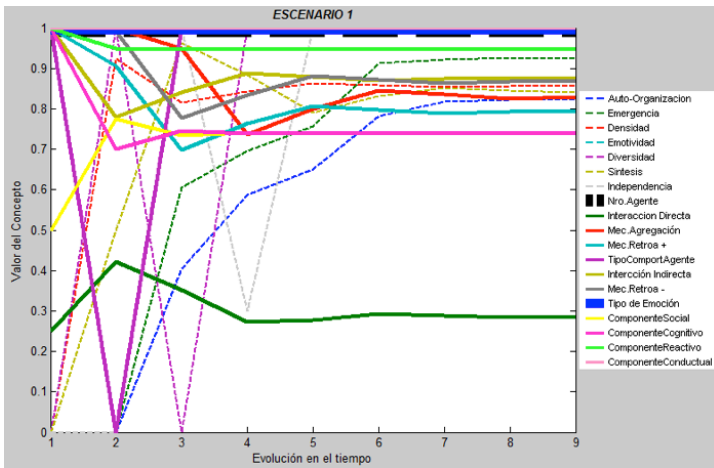


Figura 5.35. Resultados obtenidos para Wikipedia en Inglés (tomado de [135, 138]).

Escenario 2: Wikipedia en Idioma Español. Para la inicialización de los conceptos arquitectónicos del método de verificación para MASOES, utilizamos también la información de las tablas 5.17 y 5.18, y los resultados obtenidos para la Wikipedia en inglés (caso ideal, escenario 1): el número de agentes (0.072) se ajusta en relación al número de usuarios registrados en la Wikipedia en español (132.239) versus los que hay en la Wikipedia en inglés (1.824.439) (ver tabla 5.17), el número de interacciones indirectas (0.085) en relación al número de contribuciones o ediciones en la

¹⁰⁶ En este sentido, los individuos hacen hincapié en el “yo”, y la identidad individual prevalece sobre el “nosotros” de la identidad del grupo [104].

individual¹⁰⁷. Además, la calidad de los mecanismos de retroalimentación positiva (0.68), es mayor a los de retroalimentación negativa (0.65) (ver figura 5.36), contrario a lo que sucede en la Wikipedia en inglés. Los resultados de la tabla 19 muestran que los usuarios registrados de la Wikipedia en español se dedican más a la generación o adición de contenidos (60%) (páginas de artículos, retroalimentación positiva) que a las acciones correctivas, de borrado o discusión (retroalimentación negativa) (40%).

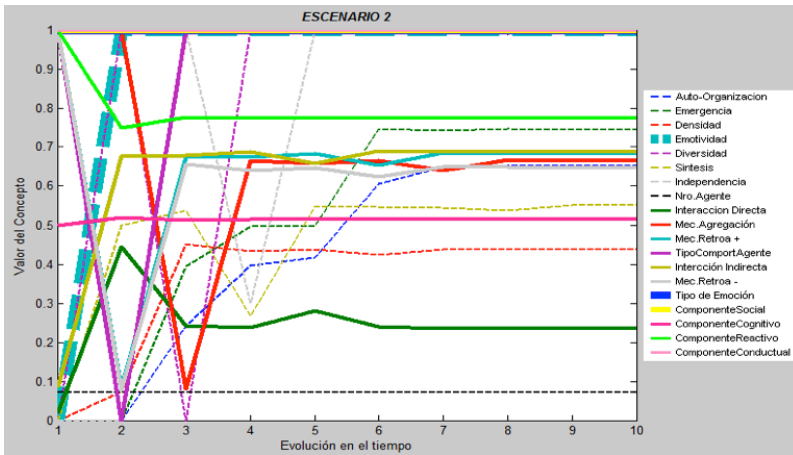


Figura 5.37. Resultados obtenidos para Wikipedia en Español (tomado de [135, 138]).

Más estudios sobre Wikipedia, usando MASOES, pueden verse en [138], por ejemplo, el escenario que evalúa el impacto de las páginas de discusión.

5.3 Algunas ideas finales

Se recurre a la emergencia cuando se trata de dar cuenta de fenómenos complejos, cuando se trata de realizar sistemas capaces de adaptarse a medio-ambientes dinámicos y dudosos, entre otras cosas. Desde la emergencia, hay metodologías concretas de descripción y concepción de sistemas complejos, que permiten visualizar un conjunto de alternativas a los métodos clásicos de resolución de problemas. En general, se pue-

¹⁰⁷ En este sentido, el orden social está basado en la comunidad, y el grupo protege a sus miembros a cambio de lealtad. Normalmente, se evitan los conflictos y enfrentamientos, ya que la armonía y el consenso dentro de un grupo son importantes [104].

de prever la emergencia, como un nuevo paradigma, transversal a varias ramas. La emergencia requiere de la observación, dado que es necesario un observador del fenómeno global para que haya emergencia. El observador debe estar en el exterior del sistema, en cuyo caso, se le pide un esfuerzo de interpretación en una dirección no intrínseca a la dinámica del sistema, pero el observador puede él mismo ser parte de la dinámica global, en cuyo caso es el motor incluso de la emergencia.

La emergencia en informática exige del observador que vea más allá de simples (locales o micro) fenómenos de interacción, para ver el fenómeno global que estas interacciones realizan. Esta clarificación del fenómeno de interpretación en informática, abre una nueva perspectiva para desarrollar herramientas para validar y explotar el concepto de emergencia en aplicaciones concretas [75]. Por ejemplo, imagínese una variedad de componentes (programas, archivos, sitios Web. etc.) obrando recíprocamente, intercambiando información. Asuma que los componentes tienen la capacidad de adaptarse mutuamente (envían mensajes, negocian), para alcanzar un objetivo común. Esto se hace, hasta que un orden global estable se cree. Cualquier cambio (por ejemplo, una avería de un componente), recomenzará el proceso de negociación con sus vecinos inmediatos, hasta alcanzar un estado estable. Para ello, se debe pensar en protocolos de interacción que permitan la auto-organización.

En el ejemplo anterior, la organización resultante se adapta en tiempo real, llevando eventualmente a un orden global. Esto conlleva a una red auto-organizada eficiente, que se adapta continuamente. Esta idea de red se puede usar para modelar el comportamiento de los sitios web, la construcción de ontologías compartidas, etc. La programación orientada a objeto, también podía beneficiarse de este enfoque, con objetos negociando mutuamente, y generando objetos de alto nivel espontáneamente. Igual pasa con la computación ubicua o ambientes inteligentes: varios dispositivos, tales como refrigeradores o teléfonos, conectados en una red, pueden aprender a coordinar mutuamente sus actividades, reduciendo la carga de trabajo del usuario. Las posibilidades parecen sin fin, solamente el tiempo puede decir.

5.3.1. Objetos Comunicantes

Imagínese el futuro: usted transfiere una receta en un mensaje de texto con su celular a su ayudante de cocina “inteligente”, que, con la ayuda de etiquetas, determina la composición de los productos, sus fechas de vencimiento, etc. [72]. El ayudante es capaz de enviar al celular una lista de compras de los productos que faltan, y se necesitan para la receta. Incluso, el ayudante podría enviar una orden a su supermercado, de modo que las compras sean entregadas en su hogar, o estén listas para su recolección. La tecnología para alcanzar esto ya existe. Sin embargo, la integración de los diversos dispositivos para combinar sus capacidades automáticamente, aun es una tarea pendiente. Por otra parte, usando la funcionalidad de algunos dispositivos, podrían explotarse otros (por ejemplo, si mi computadora tiene una interfaz inteligente, quisiera utilizarla para pedir café a una máquina de hacer café). Podríamos construir dispositivos de modo que se coordinen automáticamente, (combinando sus funciones, y posiblemente produciendo nuevas “inesperadas”). La tecnología para alcanzar esto existe ya, pero se carece de una apropiada metodología de diseño, capaz de abordar los problemas vinculados al hecho de ser artefactos autónomos, en un entorno cambiante.

De lo que estamos hablando es de un paradigma, donde los artefactos se auto-organicen, en el sentido que pueden comunicarse y permitir la emergencia de acciones imprevistas, para realizar tareas deseables, con la intervención mínima humana. Esta visión está estrechamente vinculada al concepto de “inteligencia ambiental” (AmI), que considera a la gente rodeada por dispositivos inteligentes. Para ello, se requiere la integración de las siguientes tecnologías: computación ubicua, artefactos autónomos (computación autonómica), e interfaces de usuario inteligentes.

La comunicación ubicua debe permitir el intercambio de información entre los dispositivos. Las interfaces deben permitir una interacción intuitiva, sin esfuerzo, entre los usuarios y los dispositivos. Además, los artefactos deben poder auto-organizarse de manera autónoma. El propósito no debe ser diseñarlos explícitamente, programarlos, o controlarlos. Los componentes deben obrar autónomamente entre sí y con el ambiente. La auto-organización de los artefactos significa que diversos dispositivos, con diversas funcionalidades, en diversas configuraciones,

pueden comunicarse e integrarse, para producir funcionalidades nuevas que los dispositivos solos no podrían alcanzar. Además, deben ser sistemas adaptativos y extensibles. Adaptativos para hacer frente a los cambios inesperados en su ambiente, y flexibles para tolerar acontecimientos para los que no fueron diseñados.

Un primer requisito es la compatibilidad de las plataformas. Los dispositivos deben poder configurarse automáticamente. La tecnología abierta puede responder a esta necesidad, permite resolver los problemas de integración, en un espacio donde se comparte el conocimiento. Por ejemplo, si programo como integrar mi “vieja” tostadora con mi nuevo teléfono móvil, no me cuesta nada hacer disponible en Internet esa solución. Podemos dividir el problema de integración en la emergencia, en tres subproblemas:

- Los dispositivos deben aprender a comunicarse, incluso cuando no tienen ninguna comprensión compartida a priori del problema;
- Los dispositivos deben aprender en quien pueden confiar (otros dispositivos), para cooperar;
- Los dispositivos deben desarrollar una división eficiente del trabajo, de modo que cada uno realice esa parte de la tarea en la que es más competente, mientras que delega las partes restantes a los otros.

Inspirado en los SMA, veamos los mecanismos generales que podrían usarse para abordar los tres subproblemas de aprendizaje. Se requiere aprendizaje para comunicarse con eficacia, tal que los diversos agentes utilicen los mismos conceptos o categorías. Es decir, para alcanzar la coordinación eficaz, los agentes deben alcanzar una comprensión compartida de un concepto, de modo que convengan sobre qué situaciones y acciones pertenecen a esa categoría, y cuáles no. Un grupo de agentes que negocian tal consenso, es un fenómeno de emergencia, tal que una clasificación global compartida emerge desde las interacciones locales entre los agentes. Después de algunas iteraciones, el sistema llega a un estable y coherente conjunto de categorías compartidas por todos los agentes (emerge). En artefactos auto-organizados, un primer agente produce una “locución” que refiere a un fenómeno que pertenezca a una de sus categorías, y encuentra la mejor categoría apropiada para ese fenómeno en su base de conocimiento. El segundo agente, entonces ve si pertenece a esa misma categoría, si es así, ambas clasificaciones son reforzadas. De esa manera, se consolida o

debilita la clasificación correspondiente, dependiendo del grado de acuerdo. Cada agente alternadamente interactúa de esta manera. Esto permite producir un sistema de categorías compartido por todos los agentes. Las investigaciones en SMA donde los agentes negocian su protocolos [72], podrían ser extendidas para artefactos que se auto-organizan posibilitando ese aprendizaje.

Los dispositivos integrados deben no sólo comunicarse, sino cooperar. La cooperación puede parecer evidente en los sistemas programados, donde los componentes deben responder apropiadamente a las peticiones hechas por otros componentes. Sin embargo, éste no es el caso en configuraciones abiertas, extensibles. Por ejemplo, una persona en el aeropuerto quisiera que su teléfono móvil colabore con los dispositivos presentes en el aeropuerto, de modo que aprenda a cooperar y le digan, por ejemplo, cuando el vuelo está programado para salir, cuales son los salones VIP cercanos y su ruta, etc. En general, los dispositivos en el aeropuerto pueden estar listos a ayudar al teléfono móvil¹⁰⁸, pero no otros. Existe una literatura extensa sobre la cooperación en comunidades de agentes, que podría ser estudiada y extendida, para estos casos.

Otro tipo de Aprendizaje es para coordinarse. Después de comprobarse que los dispositivos pueden comunicarse y cooperar, todavía es necesario cerciorarse que las funciones que se realizan satisfagan al usuario. Estas funciones se derivan de un complejo entramado de tareas, que necesitan ser ejecutadas. Muchas de esas tareas son mutuamente dependientes, por lo que deben aprender a coordinarse. Un ejemplo de aprendizaje de este tipo aparece, con la idea de confianza entre el agente que delega una tarea y quien la realiza, lo que puede llevar a procesos de aprendizaje de esa confianza en los agentes, aumentando así, eventualmente, la probabilidad para delegar una tarea similar al mismo agente en el futuro. Esta asunción es suficiente para desarrollar una división del trabajo, donde las tareas se delegan a los agentes “más expertos”. Cuando nuevos dispositivos se agregan al sistema, el sistema y el dispositivo deben adaptarse mutuamente, produciendo una nueva organización.

Veremos así en el futuro, una red de dispositivos especializados, que se auto-organizan, desde un proceso de aprendizaje entre ellos, de cómo efi-

¹⁰⁸ Debido a que sus restricciones de seguridad lo permiten

cazmente cooperar. Estos sistemas deberán ajustar sus capacidades, adaptándose a las tareas, a las situaciones, o a los dispositivos, encontrados. Esta capacidad de adaptarse debe estar ya presente en las reglas de interacción. La adaptación se puede alcanzar usando retroalimentación, tal que los agentes aprendan qué mensajes enviar y en quien pueden confiar. Así, podemos imaginarnos en nuestro futuro, dispositivos inteligentes, aprendiendo a ser más expertos, explorando. Allí subyace un conjunto de sistemas emergentes, por aparecer.

No estamos hablando de la integración de muchas funciones en un solo dispositivo, sino de una red de dispositivos especializados, que se coordinan [72]. Dichos dispositivos, tales como teléfonos móviles, aparatos electrodomésticos, etc., se podrían integrar, para proporcionar una “inteligencia ambiental” que responda a los deseos del usuario. Esos dispositivos, obrando recíprocamente, aprenden sobre cómo comunicarse, con quienes cooperar, y cómo delegar y coordinar tareas especializadas. Así, pueden desarrollar una inteligencia colectiva, capaz de abordar tareas complejas. En esos casos, serán sistemas en que la estructura y la función del sistema, “emergen” de las interacciones entre los dispositivos. Los componentes obran libremente entre ellos y con el ambiente, adaptándose mutuamente, para alcanzar un estado “preferible” o configuración atractora. Ya se están dando los primeros pasos, en el desarrollo de protocolos que permitan esto, adaptables, extensibles, y abiertos.

5.3.2 La Web 2.0 y 3.0: Redes sociales virtuales (facebook, Twitter, etc.) y las nuevas relaciones sociales (publicidad, social gaming (zynga), social media, etc.)

¿Cuál es el futuro de la computación? una variedad de componentes, todos obrando recíprocamente, intercambiando información [85]. Los componentes tendrán la capacidad de adaptarse mutuamente, hasta que un orden global estable se cree. El ejemplo de Internet es crucial. Algoritmos de aprendizaje que refuercen las trayectorias en que viajan los usuarios con frecuencia, es un ejemplo. Esto lleva eventualmente a un orden global: páginas web que son más relevantes para los usuarios se enlazan directamente, caminos más recorridos identifican patrones de enlaces a optimizar, documentos que cubren el mismo tema consiguen

agruparse, etc. Esto puede llevar a decisiones como, que el conjunto de páginas agrupadas se pueden ahora representar por un documento de alto nivel (un índice o un resumen de un tema). Componentes de alto nivel pueden ellos mismos combinarse en categorías y fomentar super-categorías, y así sucesivamente. Eventualmente, la red en conjunto puede auto-organizarse en una red eficiente, jerárquica, de asociaciones, que se adapta continuamente a los cambios de demanda del usuario, etc.

Otro ejemplo es la minería Web. Ella se ha vuelto fundamental para la gestión de sitios Web que se adapten, personalicen, etc. [1, 146]. Precisa información sobre el uso de la web, podría ayudar a mejorar los sitios web. Por ejemplo, los perfiles de usuario se pueden construir mediante la combinación de las rutas de navegación con otros datos, como el tiempo que duran viendo una página, la estructura del hipervínculo, el contenido de la página, etc. Abraham y Ramos [1, 146, 147] han utilizado una colonia de hormigas, como un algoritmo para descubrir patrones de Sitios Web, usando la ubicación geográfica, el tipo de información solicitada, el tiempo de acceso, y otros datos más. En general, en este ámbito hay todo un mundo por explorar, a partir del cual nuevas aplicaciones deberán emerger, desde las dinámicas que permite la Web 2.0 y 3.0. Las interacciones bidireccionales, son un elemento fundamental que posibilita la auto-organización de la web.

Referencias

- [1] A. Abraham, H. Guo, H. Liu. “Swarm Intelligence: Foundations, Perspectives and Applications”. In *Studies in Computational Intelligence*, Springer-Verlag, Vol. 26, pp. 3–25. 2006.
- [2] M. Abraham, J. Pasteels. “Social behaviour during nestmoving in the ant *Myrmica rubra*”, *Insectes Soc*, Vol. 27, pp. 127–147, 1980.
- [3] J. Aguilar, J. Cardozo, C. González, B. Rengifo “Una aproximación a los Juegos Emergentes. Metropolis, Simulador de Ciudades Autogestionadas”, *Actas de XXXXVII Conferencia Latinoamericana de Informática*, Ecuador, 2011.
- [4] J. Aguilar J. Ríos, M. Cerrada, F. Hidrobo, “Sistemas Multiagentes y sus aplicaciones en Automatización Industrial”, *Talleres Gráficos, Universidad de Los Andes*, 2012.
- [5] J. Aguilar, F. Rivas (Editores), “Introducción a las Técnicas de Computación Inteligente”, *Meritec*, Junio 2001.
- [6] J. Aguilar, “Dynamic Fuzzy Cognitive Maps for the Supervision of Multiagent Systems”. In *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Application* (Ed. M. Glykas), Springer, pp. 307-324, 2010.
- [7] J. Aguilar, “Different Dynamic Causal Relationship Approaches for Cognitive Maps”, *Applied Soft Computing*, Elsevier, Vol.13, No. 1, pp. 271–282, 2013.
- [8] J. Aguilar, J. Rada, “Morphology and Behavior Evolution of Virtual Creatures based on Swarm Intelligence”, *IEEE Latinoamerica Transactions*, Vol.10, No. 2, 2012.
- [9] J. Aguilar, “The combinatorial ant system for dynamic combinatorial optimization problems”, *Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones* Vol. 12, pp. 51–60, 2005.

- [10] J. Aguilar, “Hacia una Tecnología Democrática para Mérida: bases para un nuevo Paradigma Universitario en la creación de una Facultad en Tecnologías Informáticas“, Revista de la Academia de Mérida, Vol. 14, No. 22, pp. 17-80, 2009.
- [11] J. Aguilar, J. Contreras, “The FCM Designer Tool”. In *Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications* (Ed. Glikas Mixalis), Springer, pp. 71-88, 2010
- [12] S. Alexander. “Space, Time, and Deity”, The Humanitarian Press, 1920
- [13] J. Ame, C. Rivault, J. Deneubourg, “Cockroach aggregation based on strain odour recognition”, *Animal Behaviour*, Vol. 68, pp. 793–801, 2004.
- [14] C. Anderson, F. Ratnieks, “Worker allocation in insect societies: coordination of nectar foragers and nectar receivers in honey bee (*Apis mellifera*) colonies”, *Behav Ecol Sociobiol* Vol. 46 pp. 73-81, 1999.
- [15] C. Anderson, “Self-Organization in Relation to Several Similar Concepts: Are the Boundaries to Self-Organization Indistinct?”, *Biol. Bull.* Vol. 202, pp. 247–255, 2002.
- [16] C. Anderson, F. Ratnieks, “Task partitioning in insect societies. Effect of colony size on queueing delay and colony ergonomic efficiency”. *Am Nat*, Vol. 154, pp. 521–535, 1999.
- [17] R. Beckers, J. Deneubourg, S. Goss, J. Pasteels, “Collective decision making through food recruitment”. *Insectes Soc* Vol. 37, pp. 258–267, 1990.
- [18] D. Lucio-Arias, L. Leydesdorff, “The dynamics of exchanges and references among scientific texts, and the autopoiesis of discursive knowledge”. *Journal of Informetrics*, 2009.
- [19] M. Artzrouni, J. Komlos, “The formation of the European state system: a spatial ‘predatory’ model”, *Hist. Methods*, Vol. 29, pp. 126–134, 1996.

-
- [20] C. Bernon, M. Gleizes, G. Picard, “Enhancing Self-organising Emergent Systems Design with Simulation”, *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer, Vol. 4457, pp. 284–299, 2007.
- [21] H. Bersini, “Qu’est-ce que l’émergence?“, *Ellipses*, 2007
- [22] M. Bitbol, “Ontology, Matter and Emergence”, *Phenomenology & Cognitive Sciences* Vol. 6, No. 3, pp. 293-307. 2007.
- [23] F. Bolici, J. Howison, K. Crowston, “Coordination without discussion? Socio-technical congruence and Stigmergy in Free and Open Source Software projects” (Conferencia), 2nd International Workshop on Socio-Technical Congruence, 2009
- [24] G. Buttazzo, “Artificial Consciousness: Utopia or Real Possibility?“, *IEEE Computer*, Vol. 34, No. 7, pp. 24-30, 2001.
- [25] E. Bonabeau, G. Theraulaz (ed), “Intelligence Collective”, *Hermes*, 1994.
- [26] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz. “Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems”, *Oxford University Press*, 1998.
- [27] E. Bonabeau, G. Theraulaz, “Fixed Response Thresholds and the Regulation of Division of Labor in Insect Societies”, *Bulletin of Mathematical Biology*, Vol. 60, pp. 753–807, 1998.
- [28] E. Bonabeau, G. Theraulaz, J. Deneubourg, S. Aron, S. Camazine, “Self-organization in social insects”. *Trends Ecol Evol*, Vol. 12, pp.188–193, 1997.
- [29] K. Brunner, “What’s Emergent in Emergent Computing?”, *Actas de 16th European Meeting on Cybernetics and Systems Research*. Austria, 2002.
- [30] M. Bunge, “Emergence and the mind”, *Neuroscience*, Vol. 2, pp. 501-509, 1977.
- [31] T. Burk, W. BellSource, “Cockroach Aggregation Pheromone: In-

- hibition of Locomotion (Orthoptera: Blattidae)", *Journal of the Kansas Entomological Society*, Vol. 46, No. 1, pp. 36-41, 1973.
- [32] S. Camazine, "Self-organizing pattern formation on the combs of honey bee colonies", *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 28, pp. 61-76, 1991.
- [33] S. Camazine, J. Deneubourg, N. Franks, J. Sneyd, G. Theraulaz, E. Bonabeau. "Self-Organization in Biological Systems", Princeton University Press, Princeton, NJ. 2003..
- [34] S. Camazine, P. Visscher, J. Finley, R. Vetter, "House-hunting by honey bee swarms: collective decisions and individual behaviors", *Insectes soc.* Vol. 46, pp. 348-360, 1999.
- [35] A. Cardon, "Conscience artificielle et systèmes adaptatifs", Editions Eyrolles, Paris, 2000.
- [36] P. Clayton, "Mind & Emergence: From Quantum to Consciousness", Oxford University Press, Oxford/New York, 2004.
- [37] P. Clayton, "Natural Law and Divine Action: The Search for an Expanded Theory of Causation", *Zygon*, Vol. 39, No. 3, pp. 615-635, 2004.
- [38] P. Clayton, "Emergence from Physics to Theology: toward a Panoramic View", *Zygon*, Vol. 41, No. 3, pp. 675-688, 2006.
- [39] P. Clayton, Z. Simpson (eds.), "The Oxford Handbook on Science and Religion", Oxford University Press, 2006.
- [40] R. Collins, "Some Principles of Long-term Social Change: the Territorial Power of States", in *Research in Social Movements, Conflicts, and Change* (L. Kriesberg ed.), JAI Press, pp. 1-34, 1978
- [41] J. Crutchfield, D. Feldman, C. Shalizi, "Comment on: Simple measure for complexity". *Physical Review*, Vol. 62, pp. 2996-2997, 2000.
- [42] R. Cummins, "The nature of Psychological Explanation", MIT Press, 1983.

- [43] T. Czaczkes, P. Nouvellet, F. Ratnieks, "Cooperative food transport in the Neotropical ant, *Pheidole oxyops*", *Insect. Soc.* Vol. 58, pp. 153–161, 2011.
- [44] P. Davies, "Emergent biological principles and the computational properties of the universe". *Complexity*, Vol. 10, pp. 1-9, 2004.
- [45] P. Davies. "Teleology without Teleology", in *Evolutionary and Molecular Biology: Scientific Perspectives on Divine Action* (R. Russell, W. Stoeger, F. Ayala eds.), Vatican Observatory Publications, pp. 151-162, 1998
- [46] Y. Demazeau, "La Plate-forme PACO et ses Applications", *Actas de las 2das Jornadas Nacionales de PRC-IA sobre los Sistemas Multi-Agentes*, 1993
- [47] M. Dempster, "A Self-Organising Systems Perspective on Planning for Sustainability". Tesis de Maestría, University of Waterloo, School of Urban and Regional Planning (1998)
- [48] J. Deneubourg, A. Lioni, C. Detrain, "Dynamics of Aggregation and Emergence of Cooperation", *Biol. Bull.* Vol. 202, pp. 262–267, 2002.
- [49] S. Depickere, D. Fresneau, J. Deneubourg, "A Basis for Spatial and Social Patterns in Ant Species: Dynamics and Mechanisms of Aggregation", *Journal of Insect Behavior*, Vol. 17, No. 1, pp. 81-97, 2004
- [50] C. Detrain, J. Deneubourg, "Self-organized structures in a superorganism: do ants "behave" like molecules?", *Physics of Life Reviews*, Vol. 3, pp. 162–187, 2006.
- [51] J. de Biseau, J. Deneubourg, J. Pasteels, "Collective flexibility during mass recruitment in the ant *Myrmica sabuleti* (Hymenoptera: Formicidae)". *Psyche*, Vol. 98, No. 4, pp. 323–336, 1991.
- [52] J. de Biseau, Y. Quinet, L. Deffernez, J. Pasteels, "Explosive food recruitment as a competitive strategy in the ant *Myrmica sabuleti* (Hymenoptera, Formicidae)", *Insectes soc.* Vol. 44, pp. 59 – 73, 1997.

- [53] T. de Wolf, T. Holvoet. "Using UML 2 activity diagrams to design information flows and feedback-loops in self-organising emergent systems". *Actas de Second Intl. Workshop on Engineering Emergence in Decentralised Autonomic Systems*, 2007.
- [54] T. de Wolf, T. Holvoet, "Emergence Versus Self-organisation: Different Concepts but Promising When Combined". *Lecture Notes on Artificial Intelligence*, Vol. 3464, pp. 1–15, 2005.
- [55] M. Dorigo, E. Bonabeau, G. Theraulaz, "Ant algorithms and stigmergy", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 16, pp. 851–871, 2000.
- [56] M. Dorigo, T. Stützle, "Ant Colony Optimization", The MIT Press, 2004
- [57] C. El-Hani, C. Emmeche, "On Some Theoretical Grounds for an Organism-centered Biology: Property Emergence, Supervenience, and Downward Causation", *Theory Biosci.*, Vol. 119, pp. 234-275, 2000.
- [58] N. Fernández, J. Aguilar, C. Gershenson, O. Terán "Sistemas Dinámicos como Redes Computacionales de Agentes para la evaluación de sus Propiedades Emergentes", *Actas de II Simposio Científico y Tecnológico en Computación*, pp. 181-188, 2012.
- [59] N. Fernández J. Aguilar, O. Terán "Conceptual Modeling of Emergent Processes in Dynamic Complex Systems", *Actas de 9th WSEAS Intl. Conference on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics*, pp. 75-82, 2010.
- [60] M. Fleischer, "Foundations of Swarm Intelligence: From Principles to Practice". *Reporte Técnico*, University of Maryland, 2003.
- [61] S. Forrest, "Emergent computation: Self-organizing, Collective, and Cooperative Phenomena in Natural and Artificial Computing Networks", *Actas de ninth annual Conference in Emergent computation*, MIT Press, pp 1-11, 1991.
- [62] S. Forrest, J. Miller, "Emergent behavior in classifier systems", *Phy-*

- sica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 42, No. 1–3, pp. 213–227, 1990.
- [63] S. Forrest (ed.) “Emergent Computation” MIT Press edition, 1991.
- [64] N. Franks, J. Deneubourg, “Self-organizing nest construction in ants: individual worker behaviour and the nest’s dynamics”, *Anim. Behav.*, Vol. 54, pp. 779–796, 1997.
- [65] N. Franks, A. Sendova, “Brood sorting by ants: distributing the workload over the work-surface”. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, Vol. 30, pp. 109–123, 1992.
- [66] N. Franks, A. Wilby, B. Silverman, C. Tofts, “Self-organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing”. *Anim Behav.* Vol. 44, pp. 357–375, 1992.
- [67] J. Fromm, “Types and Forms of Emergence”, Informe Técnico, Distributed Systems Group, Electrical Engineering & Computer Science, Universität Kassel, Alemania, 2006.
- [68] J. Gabbai, H. Yin, W. Wright, N. Allinson, “Self-Organization, Emergence and Multi-Agent Systems”, *actas de 2005 IEEE International Conference on Neural Networks and Brain*, pp. 1858–1863, 2005
- [69] S. Garnier, C. Jost, R. Jeanson, J. Gautrais, M. Asadpour, G. Caprari, G. Theraulaz, “Aggregation Behaviour as a Source of Collective Decision in a Group of Cockroach-Like-Robots”, *Lecture Notes on Artificial Intelligence*, Vol. 3630, pp. 169–178, 2005.
- [70] L. Gaubert, P. Redou, F. Harrouet, J. Tisseau, “A first mathematical model of brood sorting by ants: Functional self-organization without swarm-intelligence”, *Ecological Complexity*, Vol. 4, pp. 234–241, 2007.
- [71] C. Gershenson, F. Heylighen, “When can we call a system self-organizing?”, *Lecture Notes on Artificial Intelligence*, Springer-Verlag, Vol. 2801, pp. 606–614, 2003.
- [72] C. Gershenson, F. Heylighe Protocol Requirements for Self-organizing Artifacts: Towards an Ambient Intelligence, *Unifying Themes*

- in *Complex Systems* (A. Minai, D. Braha, Y. Bar-Yam, eds.), Springer, pp 136-143, 2004.
- [73] C. Gershenson, “Towards Self-organizing Bureaucracies”, *International Journal of Public Information Systems*, Vol. 1, pp. 1-24, 2008.
- [74] C. Gershenson, “A General Methodology for Designing Self-Organizing Systems”, No. 2005-05, ECCO, 2006.
- [75] C. Gershenson, “Computing Networks: A General Framework to Contrast Neural and Swarm Cognitions”, *Paladyn*, Vol. 1, No. 2, pp 147-153, 2010.
- [76] C. Gershenson, “Design and Control of Self-organizing Systems”, Tesis Doctoral, Faculteit Wetenschappen and Center Leo Apostel for Interdisciplinary Studies, Univ. Of Brussels, 2007.
- [77] D. Gordon, N. Mehdiabadi, “Encounter rate and task allocation in harvester ants”. *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 45, pp. 370–377, 1999.
- [78] D. Gordon, B. Goodwin, L. Trainor, “A parallel distributed model of the behaviour of ant colonies”, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 156, No. 3, pp. 293–307, 1992.
- [79] P. Grassé, P. “La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la stigmergie,” *Insectes Sociaux*, Vol. 6, pp. 41–83, 1959.
- [80] N. Gregersen, “The idea of creation and the theory of autopoietic processes”, *Zygon*, Vol. 33, No. 3, pp 333-367, 1998.
- [81] N. Gregersen, “Emergence and Complexity”, En “*The Oxford Handbook on Science and Religion*” (P. Clayton, Z. Simpson, ed.), Oxford University Press, pp. 767-783, 2006.
- [82] J. Halley, D. Winkler, “Classification of emergence and its relation to self-organization”, *Complexity*, Vol. 13: pp. 10–15, 2008.
- [83] J. Harcourt, T. Ang, G. Sweetman, R. Johnstone, A. Manica, “Social

- Feedback and the Emergence of Leaders and Followers”, *Current Biology*, Vol. 19, pp. 248–252, 2009.
- [84] C. Hempel, P. Oppenheim, “Logic of explanation”, *Philosophy of science*, Vol. 15, pp. 135-175, 1948.
- [85] F. Heylighen, “Collective intelligence and its implementation on the web”. *Computational and Mathematical Theory of Organizations*, Vol. 5, No. 3, pp. 253–280. 1999.
- [86] F. Heylighen, C. Gershenson, “The meaning of self- organization in computing”, *IEEE Intelligent Systems*, pp. 72–75, 2003.
- [87] F. Heylighen, “Why is Open Access Development so Successful? Stigmergic organization and the economics of information”, *Open Source Jahrbuch* (B. Lutterbeck, M. Bärwolff, R. Gehring eds.), Lehmanns Media, 2007.
- [88] F. Heylighen. “The Economy as a Distributed, Learning Control System,” *Communication and Cognition- AI*, Vol. 13, No. 2/3, pp. 207–224, 1997.
- [89] F. Heylighen, “Bootstrapping Knowledge Representations: From Entailment Meshes via Semantic Nets to Learning Webs”, *Kybernetes*, Vol. 30, No.: 5/6, pp. 691–725, 2001.
- [90] D. Hillis, “Intelligence as an Emergent Behavior, The Songs of Eden, Daedalus”, Vol. 117, No. 1, *Artificial Intelligence*, pp. 175-189, 1988.
- [91] J. Holland, “Emergence: From Chaos to Order”, Addison-Wesley 1998
- [92] J. Hopfield, “Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities”, *actas. Natl Acad. Sci. USA*, Vol. 79, pp. 2554-2558, 1982.
- [93] T. Ibaab, “An Autopoietic Systems Theory for Creativity”, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, Vol. 2, pp. 6305–6625, 2010.

- [94] M. Jean, “Emergence et SMA“, En IA distribuée et systèmes multi-agents (J. Quinqueton, M. Thomas, B. Trousse eds.), Hermès, pp. 323-341, 1997.
- [95] R. Jeanson, C. Rivault, J. Deneubourg, S. Blanco, R. Fournier, C. Jost, G. Theraulaz, “Self-organized aggregation in cockroaches”, *Animal Behaviour*, Vol. 69, pp. 169–180, 2005.
- [96] S. Johnson, “Emergence: The connected lives of ants, brains, cities, and software”, Scribner, 2002.
- [97] N. Johnson, S. Rasmussen, C. Joslyn, L. Rocha, S. Smith, M. Kantor, “Symbiotic Intelligence: Self-Organizing Knowledge on Distributed Networks Driven by Human Interaction”, *Actas de 6th Int. Conference on Artificial Life*, MIT Press, 1998.
- [98] I. Kant, “Critique of Judgment”, Hafner Publishing Company, New York, 1951
- [99] D. Karaboga, B. Gorkemli, C. Ozturk, N. Karaboga, “A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications”, *Artificial Intelligence Review*, Springer, pp. 1-37, 2012.
- [100] S. Kauffman. “At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-Organization and Complexity”. Oxford University Press, 1998.
- [101] H. Kawamoto. “Autopoiesis: The Third Generation System”. Seidosha Publishers, 1995.
- [102] J. Kennedy, “Swarm intelligence”. In *Handbook of Innovative Computational Paradigms: Biological and Adaptive Computing* (A. Zomaya ed.), Springer-Verlag, pp. 187-220. 2004.
- [103] W. Kirchner, M. Lindauer, “The causes of the tremble dance of the honeybee, *Apis mellifera*”, *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 35, pp. 303-308, 1994.
- [104] A. Kittur, B. Suh, B. Pendleton, E. Chi. “He says, She says: Conflict and Coordination in Wikipedia”. *Actas de ACM Conference on*

- Human-factors in Computing Systems, pp.453-462, 2007
- [105] D. Kosak. "The Future of Games from a Design Perspective". <http://archive.gamespy.com/articles/march04/dice/molyneux/index.shtml>, 2004 (consultado Enero 2013)
- [106] C. Kube, E. Bonabeau, "Cooperative transport by ants and robots Robotics and Autonomous Systems, Vol. 30, pp. 85–101, 2000.
- [107] M. Kuperman, "A model for the emergence of geopolitical division", *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 368, No. 1933, pp. 5695–5706, 2010.
- [108] E. Langridge, N. Franks ·A. Sendova "Improvement in collective performance with experience in ants", *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 56, pp. 523–529, 2004.
- [109] M. Leslie, C. Onof, "Stigmergic epistemology, stigmergic cognition", *Cognitive Systems Research*, Vol. 9, No. 1-2, pp. 136–149, 2008.
- [110] R. Levins, R. Lewontin, "The Dialectical Biologist", Harvard University Press, 1985.
- [111] G. Lewes, "The Problems of Life and Mind", Vol. 1, Houghton, Osgood and company, 1879.
- [112] N. Luhmann, "The autopoiesis of social systems", En *Sociocybernetic Paradoxes* (F. Geyer, J. van der Zouwen Eds.), Sage Publications, 1986.
- [113] N. Luhmann, "Social systems". Stanford University Press, 1995.
- [114] N. Luhmann. "How can the mind participate in communication?" En "Theories of distinction: Redescribing the descriptions of modernity" (W. Rasch Ed.). Stanford University Press, pp. 169–184, 2002.
- [115] N. Luhmann, "The modern sciences and phenomenology". En "Theories of distinction: Redescribing the descriptions of modernity"

(W. Rasch Ed.). Stanford University Press, pp. 33–60, 2002.

- [116] E. Mallon, S. Pratt, N. Franks, “Individual and collective decision-making during nest site selection by the ant *Leptothorax albipennis*”. *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 50, pp. 352–359, 2001.
- [117] L. Markus, A. Majchrzak, L. Gasser, “A Design Theory for Systems That Support Emergent Knowledge Processes”. *Management Information Systems*, Vol. 26, No. 3, pp. 179-212, 2002.
- [118] H. Maturana, “The Organization of the Living: A Theory of the Living Organization”, *International Journal of Man-Machine Studies*, Vol. 7, pp. 313- 332, 1975.
- [119] H. Maturana, F. Varela, “Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living”, En *Boston Studies in the Philosophy of Science* (R. Cohen, et al., Eds.), Dordrecht, Vol. 42, 1980.
- [120] Y. Meng, J. Gan, “LIVS: Local Interaction via Virtual Stigmergy Coordination in Distributed Search and Collective Cleanup”, *Actas de la 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1371-1376, 2007.
- [121] M. Minsky, “Matter, Mind and Models”, *Actas de IFIP Congress in Semantic Information Processing*, pp. 45-49, 1965.
- [122] J. Millor, M. Pham-Delegue, J. Deneubourg, S. Camazine, “Self-organized defensive behavior in honeybees”, Vol. 96, No. 22, pp. 12611–12615, 1999.
- [123] C. Morgan, “Emergent Evolution”, Williams and Nothgate, 1923.
- [124] J. Müller, “Vers une méthodologie de conception de systèmes de résolution de problèmes par émergence”, *Actas de Journées françaises sur les systèmes multi-agents*, Hermès, pp 355-371, 1998.
- [125] D. Newman, “Emergence and strange attractors”. *Philosophy of Science*, Vol. 36, pp. 245–261, 1996.

- [126] T. Nomura, “Category Theoretical Formalization of Autopoiesis from Perspective of Distinction between Organization and Structure”, Informe Técnico, Ryukoku University, Japón, 2005.
- [127] T. O’Connor, J. Churchill, “Nonreductive Physicalism or Emergent Dualism? The Argument from Mental Causation”, En *The Waning of Materialism: New Essays* (G. Bealer, R. Koons, eds.), Oxford, 2010.
- [128] T. O’Connor, “Emergent properties”. *American Philosophical Quarterly*, Vol. 31, No. 2, pp. 91-104, 1994.
- [129] F. Ortega, “Wikipedia: A Quantitative Analysis”. Tesis PhD, Universidad Rey Juan Carlos, España, 2009. Disponible en <http://libre-soft.es/Members/jfelipe/thesis-wkp-quantanalysis>. [Consulta: 2013, Febrero]
- [130] R. Parker, A. Melathopoulos, R. White, S. Pernal, M. Guarna, L. Foster, “Ecological Adaptation of Diverse Honey Bee (*Apis mellifera*) Populations”, *PLOS ONE*, Vol. 5, No. 6 | e11096, 2010.
- [131] J. Parrish, S. Viscido, D. Nbaum, “Self-Organized Fish Schools: An Examination of Emergent Properties”, *Biol. Bull.*, Vol. 202, pp. 296–305, 2002.
- [132] A. Peacocke, “The Sound of Sheer Silence”, En *Neuroscience and the Person: scientific Perspectives on Divine Action* (R. Russell, N. Murphy, T. Meyering, M. Arbib. eds.), Vatican Observatory Publications/Center for Theology and the Natural Sciences, pp. 215-248, 1999.
- [133] A. Peacocke. “Paths from Science Towards God: The End of all our Exploring”, *One World*, 2001.
- [134] F. Peinado, M. Santorum, “De cómo la Realidad puede tomar parte en Juegos Emergentes”, *Revista de Comunicación y Nuevas Tecnologías*, No. 8, pp. 1-14, 2006.
- [135] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán, H. Molina, “A Verification Method for MASOES”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part B*, IEEE Society, Vol. 43, No. 1, pp. 64-76, 2013.

- [136] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán, “Proposal for a Multiagent Architecture for Self-Organizing Systems (MA-SOS)”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Vol. 5075, pp. 434-439, 2008.
- [137] N. Perozo, J. Aguilar, O. Terán, , H. Molina. “Un Modelo Afectivo para la Arquitectura Multiagentes para Sistemas Emergentes y Auto-organizados (MASOES)”, *Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia*, Vol. 35, No. 1, pp. 80-90, 2012.
- [138] N. Perozo, “Modelado Multiagente para Sistemas Emergentes y Auto-organizados”, Tesis Doctoral, Universidad de los Andes-Venezuela y Université Paul Sabatier-Francia, 2011.
- [139] G. Peterson, “Species of Emergence”, *Zygon*, Vol. 41, No. 3, pp. 689-712, 1991.
- [140] U. Pfeil, P. Zaphiris, C. Ang. “Cultural Differences in Collaborative Authoring of Wikipedia”. *Journal of Computer-Mediated Communication*, Vol. 12, Nro.1, pp. 88–113, 2006.
- [141] F. Polack, S. Stepney, “Emergent Properties Do Not Refine”, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, Vol. 137, pp. 163–181, 2005.
- [142] S. Pratt, E. Mallon, J. Sumpter, N. Franks, “Quorum sensing, recruitment, and collective decision-making during colony emigration by the ant *Leptothorax albigipennis*”, *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 52, pp. 117–127, 2002.
- [143] J. Quinqueton, “Emergence et Sémantique des Mondes Possibles pour des Agents Appris En Systèmes Multi-Agents (S. Pesty, C. Sayetat-Fau, eds.), Hermès, 2000.
- [144] J. Quinqueton, Y. Hamadi, “Communication et Emergence!: une épidémie chez les termites“, *Actas de las Journées françaises sur les systèmes multi-agents*, Hermès, pp 225-235, 1999.
- [145] D. Ramirez-Cano, J. Pitt. “Follow the leader: profiling agents in an

- opinion formation model of dynamic confidence and individual mind-sets”, *Actas de IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology*, 2006.
- [146] V. Ramos, J. Merelo, “Self-Organized Stigmergic Document Maps: Environment as a Mechanism for Context Learning”, *Actas del Primer Congreso Español de Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (AEB’02)*, pp. 284-293, 2002.
- [147] V. Ramos, A. Abraham, “Evolving a Stigmergic Self-Organized Data-Mining”, *Actas de la Fourth Int. Conf. on Intelligent Systems, Design and Applications*, pp. 725-730, 2004.
- [148] F. Ratnieks, C. Anderson, “Task Partitioning in Insect Societies. II. Use of Queuing Delay Information in Recruitment”, *The American Naturalist*, Vol. 154, No. 5, pp. 536-548, 1999.
- [149] W. Renz, J. Sudeikat, “Modeling Feedback within MAS: A Systemic Approach to Organizational Dynamics”, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 5368, pp. 72-89, 2009.
- [150] A. Riccia, A. Omicinia, M. Virolia, L. Gardellia, E. Olivaa, “Cognitive Stigmergy: A Framework Based on Agents and Artifacts” *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Vol. 4389, pp. 124-140, 2007.
- [151] F. Robin, S. Moritz, “Organization of honeybee colonies: characteristics and consequences of a superorganism concept apidologie”, Vol. 29, pp. 7-21, 1998.
- [152] M. Rodriguez, D. Steinbock, J. Watkins, C. Gershenson, J. Bollen, V. Grey, B. deGraf, “Smartocracy: Social Networks for Collective Decision Making”, *Actas de 40th Hawaii International Conference on System Sciences*, pp 1-10, 2007.
- [153] A. Rollings, E. Adams. *Fundamentals of Game Design*. Prentice Hall. 2006.
- [154] F. Saffre, R. Furey, B. Krafft, J. Deneubourg, “Collective Decision-making in Social Spiders: Dragline-mediated Amplification Pro-

- cess Acts as a Recruitment Mechanism”, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 198, pp. 507-517, 2000.
- [155] J. Sanjuan, “adaptación del algoritmo de la colonia artificial de abejas para resolver problemas de diseño en ingeniería”, Tesis en licenciado en informática, Facultad de Estadística e Informática, Universidad Veracruzana, 2009.
- [156] M. Scaglione, “L’intentionnalité dans les systèmes artificiels. Emergence et réalisation: deux côtés de la même pièce”, Tesis Doctoral, Université de Neuchâtel, Suiza, 1996.
- [157] J. Searle, “La redécouverte de l’esprit“, Gallimard, 1995.
- [158] T. Seeley, S. Camazine, J. Sneyd, “Collective decision-making in honey bees: how colonies choose among nectar sources”. *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 28, pp. 277-290, 1991.
- [159] T. Seeley, S. Buhrman, “Group decision making in swarms of honey bees”, *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 45 pp. 19-31, 1999.
- [160] T. Seeley, “When Is Self-Organization Used in Biological Systems?” *Biol. Bull.* Vol. 202, pp. 314–318, 2002.
- [161] T. Seeley, S. Kühnholz, A. Weidenmüller, “The honey bee’s tremble dance stimulates additional bees to function as nectar receivers”, *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 39, pp. 419–427, 1996.
- [162] T. Seeley, P. Visscher, “Group decision making in nest-site selection by honey bees”, *Apidologie*, Vol. 35, pp. 101–116, 2004.
- [163] T. Seeley, S. Buhrman, “Nest-site selection in honey bees: how well do swarms implement the “best-of-N ” decision rule?”, *Behav Ecol Sociobiol*, Vol. 49, pp. 416–427, 2001.
- [164] T. Seeley, “The honey-bee as a super-organism”. *Am Sci*, Vol. 77, pp. 546–553, 1989.
- [165] T. Seeley, “Social foraging in honey bees: how nectar foragers as-

- sess their colony's nutritional status". Behav Ecol Sociobiol, Vol. 24, pp. 181–199, 1989.
- [166] T. Seeley, "The tremble dance of the honey bee: message and meanings". Behav Ecol Sociobio, Vol. 31, pp. 375–383, 1992.
- [167] T. Seeley, "Wisdom of the hive". Harvard University Press, 1995.
- [168] T. Seeley, S. Buhrman, "Group decision making in swarms of honey bees". Behav Ecol Sociobiol, Vol. 45, pp. 19–31, 1999.
- [169] T. Seeley, "Self-assembly, self-organization and division of labour", Philosophical Transactions of the Royal Society, Series B- Biological Sciences, Vol. 354, pp. 1395-1405, 1999.
- [170] A. Sendova, N. Franks "Division of labour in a crisis: task allocation during colony emigration in the ant *Leptothorax unifasciatus*". Behav Ecol Sociobiol, Vol. 36, pp. 269–282, 1995.
- [171] A. Sendova, N. Franks, "Task Allocation in Ant Colonies within Variable Environments (A Study of Temporal Polyethism: Experimental)", Bulletin of Mathematical Biology Vol. 55, No. I, pp. 75-96, 1993.
- [172] C. Shalizi, J. Crutchfield, "Computational Mechanics: Pattern and Prediction, Structure and Simplicity", *Journal of Statistical Physics*, Vol. **104**, pp. 816—879, 2001.
- [173] K. Sharpe, J. Walgate. "The Emergent Order", *Zygon*, Vol. 38, pp. 411–433, 2003.
- [174] T. Shelhorn, D. O'Sullivan, M. Haklay, M. Thurstain, "STREETS: an agent based pedestrian model". Actas de Computers in Urban Planning and Urban Management, 1999.
- [175] J. Scherkenbeck, G. Nentwig, K. Justus, L. Lenz, D. Gondol, G. Wendler, M. Dambach, F. Nischk, C. Graef, "Aggregation agents in german cockroach *Blatella germanica*: examination of efficacy". Journal of Chemical Ecology, Vol. 25, pp. 1105–1119, 1999.

- [176] L. Shusong, H. Huang, L. Chen, "A Multi-agents System Based Bounded Confidence and Flocking", *Journal of Information & Computational Science*, Vol. 9, No 15, pp. 4373–4380, 2012
- [177] Sims, Will Wright. Maxis Electronic Arts. 1999.
- [178] J. Surowiecki, "Wisdom of Crowds". Random House, 2005.
- [179] P. Sweetser, P. "Emergence in Games". *Actas de IEEE Symposium on Computational Intelligence in Games*, 2008.
- [180] P. Sweetser, "Emergence in Games", Charles River Media, 2007.
- [181] P. Sweetser, "An Emergent Approach to Game Design - Development and Play". Tesis de Ph.D. University of Queensland, Australia, 2006.
- [182] P. Sweetser, "Environmental Awareness in Game Agents". En *AI Game Programming Wisdom 3* (S. Rabin Ed.), Charles River Media, 2006.
- [183] P. Sweetser, J. Wiles, "Scripting versus Emergence: Issues for Game Developers and Players in Game Environment Design". *International Journal of Intelligent Games and Simulations*, Vol. 4. No. 1, pp. 1-9, 2005.
- [184] A. Tan, "[Indie Treasures: Dwarf Fortress](http://www.alteredgamer.com/other-rpg-games/2471-indie-treasures-dwarf-fortress/)". Disponible en <http://www.alteredgamer.com/other-rpg-games/2471-indie-treasures-dwarf-fortress/>, [Consulta: 2013, Noviembre]
- [185] S. Tarja, T. Ziemke, "Social cognition, artefacts, and stigmergy: A comparative analysis of theoretical frameworks for the understanding of artefact-mediated collaborative activity", *Journal of Cognitive Systems Research*, Vol. 2, pp. 273–290, 2001.
- [186] P. Teller, "A contemporary look at Emergence", En "Emergence or reduction?" (A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim Eds.), Walter de Gruyter, pp. 139-153, 1992.

- [187] G. Theraulaz, E. Bonabeau, S. Nicolis, R. Sole, V. Fourcassie, S. Blanco, R. Fournier, J. Joly, P. Fernandez, A. Grimal, P. Dalle, J. Deneubourg, "Spatial patterns in ant colonies" *Actas de la National Academy of Sciences USA*, Vol. 99, No. 15, pp.9645-9649, 2002.
- [188] G. Theraulaz, E. Bonabeau, J. Deneubourg, "Response threshold reinforcement and division of labour in insect societies", *actas de Royal Society London B*, Vol. 265, No. 1393, pp. 327-332, 1998.
- [189] C. Tofts, N. Franks, "Doing the right thing: ants, honeybees and naked mole-rats". *Trends Ecol Evol*. Vol 10, pp. 346-349, 1992.
- [190] J. Traniello, R. Rosengaus, "Ecology, evolution and division of labour in social insects", *Anim. Behav.*, Vol. 53, pp. 209-213, 1997.
- [191] D. Truex, R. Baskerville, H. Klein, "Growing Systems in Emergent Organizations", *Communications of the ACM*, Vol. 42, No. 8, pp 117-124, 1999.
- [192] S. Trumbo, Z. Huang, G. Robinson, "Division of labor between undertaker specialists and other middle-aged workers in honey bee colonies", *Behav Ecol Sociobiol.*, Vol. 41, pp. 151-163, 1997.
- [193] P. Valckenaers, H. Van Brussel, H. Bochmann, B. Saint Germain, C. Zamfirescu, "On the design of emergent systems: an investigation of integration and interoperability issues", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 16, pp. 377-393, 2003.
- [194] H. Van Dyke, S. Brueckner, "Entropy and self_organization in multiagent systems", *Actas de la fifth international conference on Autonomous agents*, pp. 124-131, 2001.
- [195] F. Varela, "Principles of Biological Autonomy". Elsevier, 1979.
- [196] Y. Visetti, "Constructivismes, Émergences : une Analyse Sémantique et Thématique". *Informe Técnico, Lattice-CNRS*, 2004
- [197] L. Von Bertalanffy, "General system theory: A new approach to unity of science", *Human Biology*, Vol. 23, pp. 303-361, 1951.

- [198] I. Wagner, M. Lindenbaum, A. Bruckstein, “Distributed covering by ant-robots using evaporating traces”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 5, pp. 918-933, 1999.
- [199] L. Wang, X. Wang, X. Hu, “Synchronization of multi-agent systems with topological interaction”, *Actas de la 18th IFAC World Congress*, 2010.
- [200] H. White, “La construcción de las organizaciones sociales como redes múltiples”, *Actas del Coloquio Internacional sobre Análisis de redes sociales*, 1998.
- [201] Wikipedia Foundation. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Wiki>. [Consulta: 2013, Noviembre].