

# **La Inteligencia Colectiva como Sistemas Emergentes: caso colonias de hormigas**

*Jose L. Aguilar C.*

*CEMISID, Dpto. de Computación, Fac. de  
Ingeniería*

*Universidad de los Andes. Mérida, VENEZUELA*

# Sistemas de Hormigas

- Conceptos Introdutorios
- Comportamiento de las Hormigas
- División del Trabajo y Asignación de Tareas
- Ordenamiento y Agrupamiento
- Auto-organización y Patrones
- Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje
- Transporte Cooperativo

# Conceptos Introdutorios

# Sociedades de Insectos

- Las hormigas y las termitas dominan el planeta (30% biomasa del Amazona)
- Las hormigas tienen cerca de 10 mil especies conocidas y gran impacto ambiental
- No hay una clave para el éxito de ellas, pero la inteligencia colectiva desempeña un papel clave
- Hormigas: magro vocabulario de feromonas y habilidades cognitivas mínimas, pero resuelven problemas colectivamente con sutileza e improvisación
- Ninguna Hormiga esta a cargo de la operación:
  - pericia para la ingeniería y coordinación social

# Sociedades de Insectos

- Son sistemas donde los individuos son incapaces de ponderar una situación global, pero sin embargo trabajan de forma coordinada usando solo información local

=> prestan atención a sus vecinos y no esperan ordenes de arriba

- Piensan y actúan localmente, pero su acción colectiva produce comportamiento global
- Variables como: tamaño de la colonia, cantidad de comida almacenada en el hormiguero, presencia de otras colonias; no pueden ser estimadas por una hormiga individualmente

# Sociedades de Insectos

- El procesamiento de la información se hace a través del feromona (papel central en la organización de las colonias)
- La comunicación de las hormigas esta compuesta de no mas de 20 signos basadas casi todas en el feromona.
- Codifican: reconocimiento de tareas, atracción de rastros, alarmas, comportamiento necrofórico, etc.
- Si bien el vocabulario es simple y no permite estructuras gramaticales complejas, tiene formas:
  - binarias,
  - gradientes en el feromona (p.e. intensidad del olor), o
  - frecuencia de ciertos semioquimicos (diferencia entre encontrar 10 a 100 hormigas en una hora)

# Sociedades de Insectos

- Hormigas llevan una muestra estadística del tamaño de la población, basadas en sus encuentros casuales con otras  
*Esta retroalimentación positiva es la base de la planificación descentralizada*

- Basándose en la información de: *señal de feromona y como frecuencia en el tiempo*, pueden adecuar su propia conducta

*Usando probabilidades estadísticas*

- Dado que el proceso de toma de decisiones se distribuye entre miles de hormigas, el margen de error es despreciable. Para cada hormiga que sobreestima el número de hormigas haciendo algo, otra la subestima neutralizándoles.

# Sociedades de Insectos

- Las colonias de hormigas atraviesan ciclos: infancia, adolescencia, madurez a lo largo de sus 15 años de existencia
- Las colonias mas jóvenes son mas inestables
- Las hormigas que la conforman no viven mas de 12 meses (incluso días)

*La conducta global que sobrevive es una de las características que definen a los sistemas complejos: hormigas van y vienen y sin embargo las colonias se vuelven mas maduras, estables y organizadas*

**No somos tan diferentes que de los sistemas de insectos: la relación entre las células del cuerpo es realmente muy parecida a las de abejas en el panal**

# Sociedades de Insectos

Sistema basado en la macrointeligencia y la adaptatividad  
derivada del conocimiento local

Autonomía vs. Control

Emergente vs. Programado

Distribuido vs. Centralizado

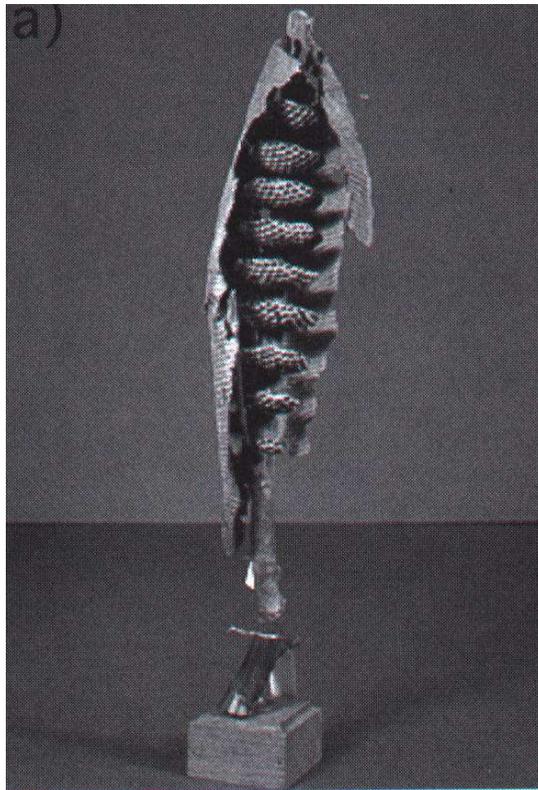
# Sociedad de Insectos

## Comportamiento Individuos vs. Rendimiento Colectivo

- Ejemplos:
  - Buscar alimentos
  - Construir nidos
  - Transporte de objetos

# Ejemplos

- Construcción de nidos
- Transporte de objetos



# Ideas Claves

- Especies Polimorfas
- Plasticidad
- Robustez
- Flexibilidad
- Comportamiento Colectivo

# Objetivo

Modelar sociedades de insectos

=> Sistemas Inteligentes Colectivos

=> Modelar individuos y sus interacciones

=> Colección de simples agentes para resolver problemas

# Mecanismos que Generan Comportamiento Colectivo

## A. Auto-organización

### – Retroalimentación Positiva:

- Reclutar
- Reforzar

### – Retroalimentación Negativa:

- Saturación
- Competición
- Exhausto

# Mecanismos que Generan Comportamiento Colectivo

## A. Auto-organización

- Estructuras espacio-temporales
- Múltiples estados estables
- Bifurcaciones

## B. Interacción indirecta

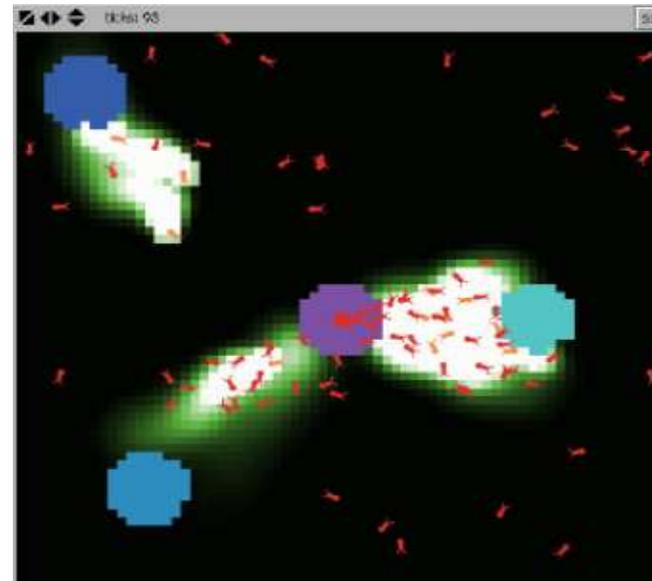
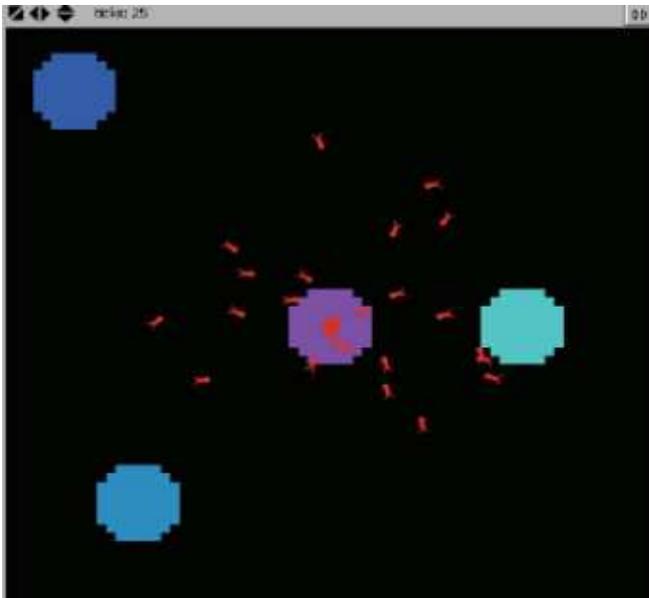
- Mínima comunicación directa entre agentes
- Flexibilidad para responder a perturbaciones

## C. Auto-regulación

## D. Coordinación de actividades a través del ambiente

## Auto-organización de una colonia de hormigas.

- Hormigas recolectan alimentos desde distintas fuentes y segregan feromonas para comunicarse.
- Patrón emergente: explotación secuencial de las fuentes (de la más cercana a las más lejana)



# Algunos retos

- ¿Qué factores explican el orden emergente?
- ¿Qué sucede cuando el número de hormigas en la colonia es relativamente reducido?
- Cuando dos fuentes de alimentos son equidistantes ¿cuál de ellas va a ser explotada en primer término?

# Comportamiento de las Hormigas



# Comportamiento de las Hormigas

- Conexión entre la microconducta de hormigas individuales y el comportamiento general de las colonias
- La reina no es una figura con autoridad: pone huevos y es alimentada y cuidada por las obreras, pero no decide lo que hacen ellas
- Las hormigas que llevan a la reina a su refugio no lo hacen porque se los ordeno un líder, sino porque la reina engrenda a todos los miembros de la colonia, y por tanto es de interés de toda la colonia.

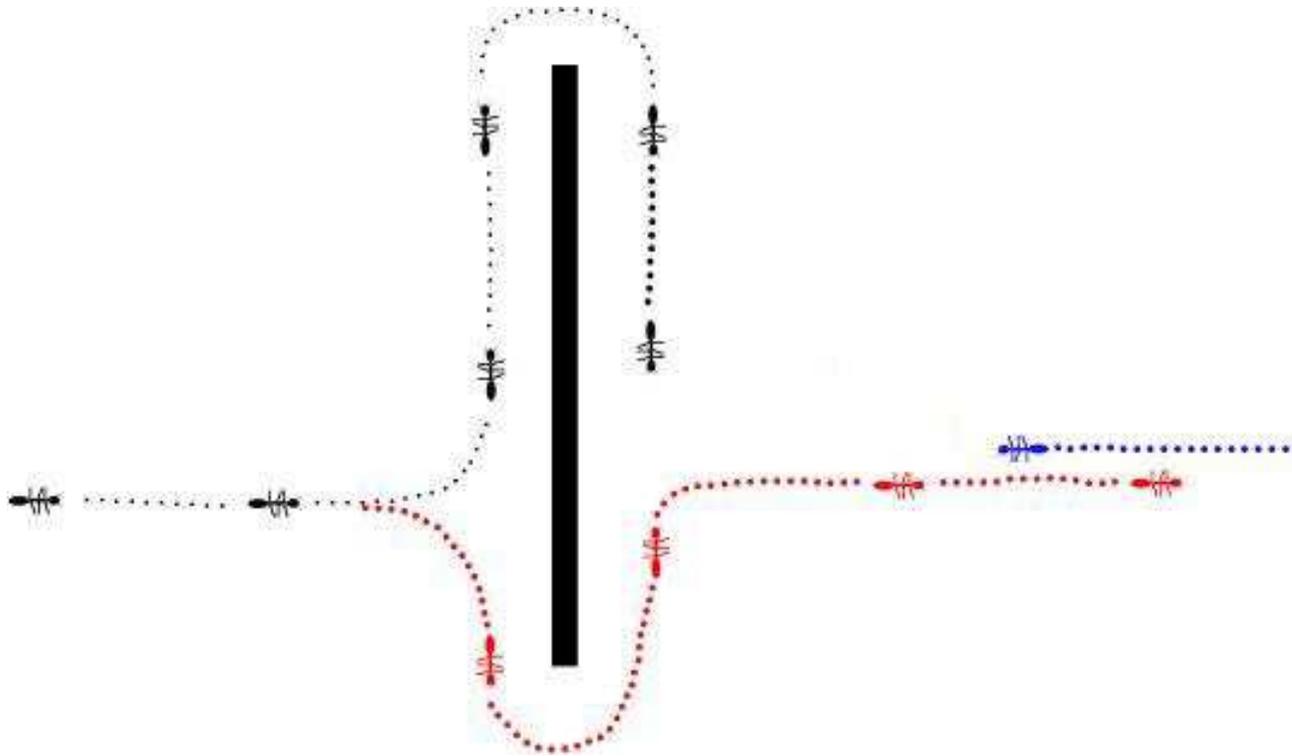
*La matriarca no enseña a sus sirvientes que la protejan, la evolución si*

# Comportamiento de las Hormigas

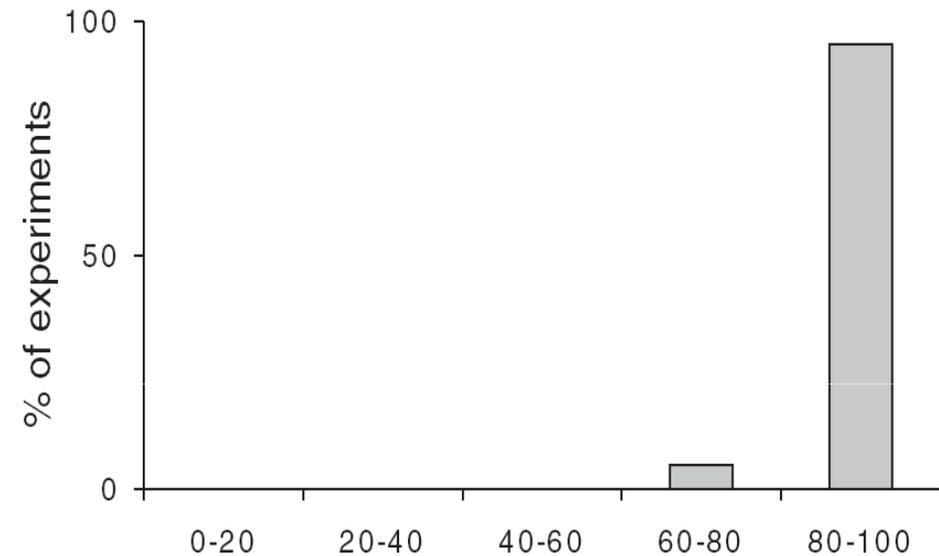
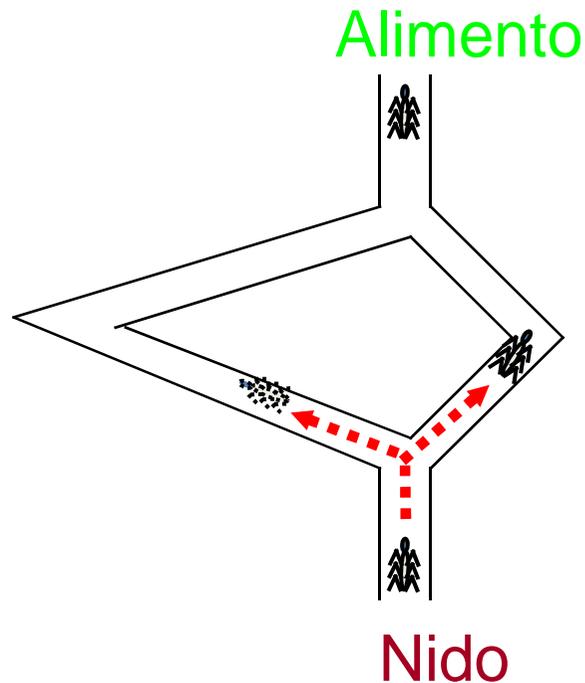
Algunas de las conductas mas extraordinarias descentralizadas de la naturaleza que se plasman en ellas

- Inteligencia
- Personalidad/roles
- Aprendizaje Ascendente

# ACO (Experimentos de base)



# HORMIGAS REALES



LAS HORMIGAS COORDINAN SUS ACTIVIDADES  
EXPLOTANDO LA COMUNICACIÓN INDIRECTA  
MEDIADA POR MODIFICACIONES DEL AMBIENTE EN  
EL CUAL SE MUEVEN = COMUNICACIÓN *STIGMERGY*

# Comportamiento como saqueo- forraje de las Hormigas

Auto-organización:

- Deposito de *feromona*
- Seguimiento de los *feromona*

## Caso 1: Puente Binario

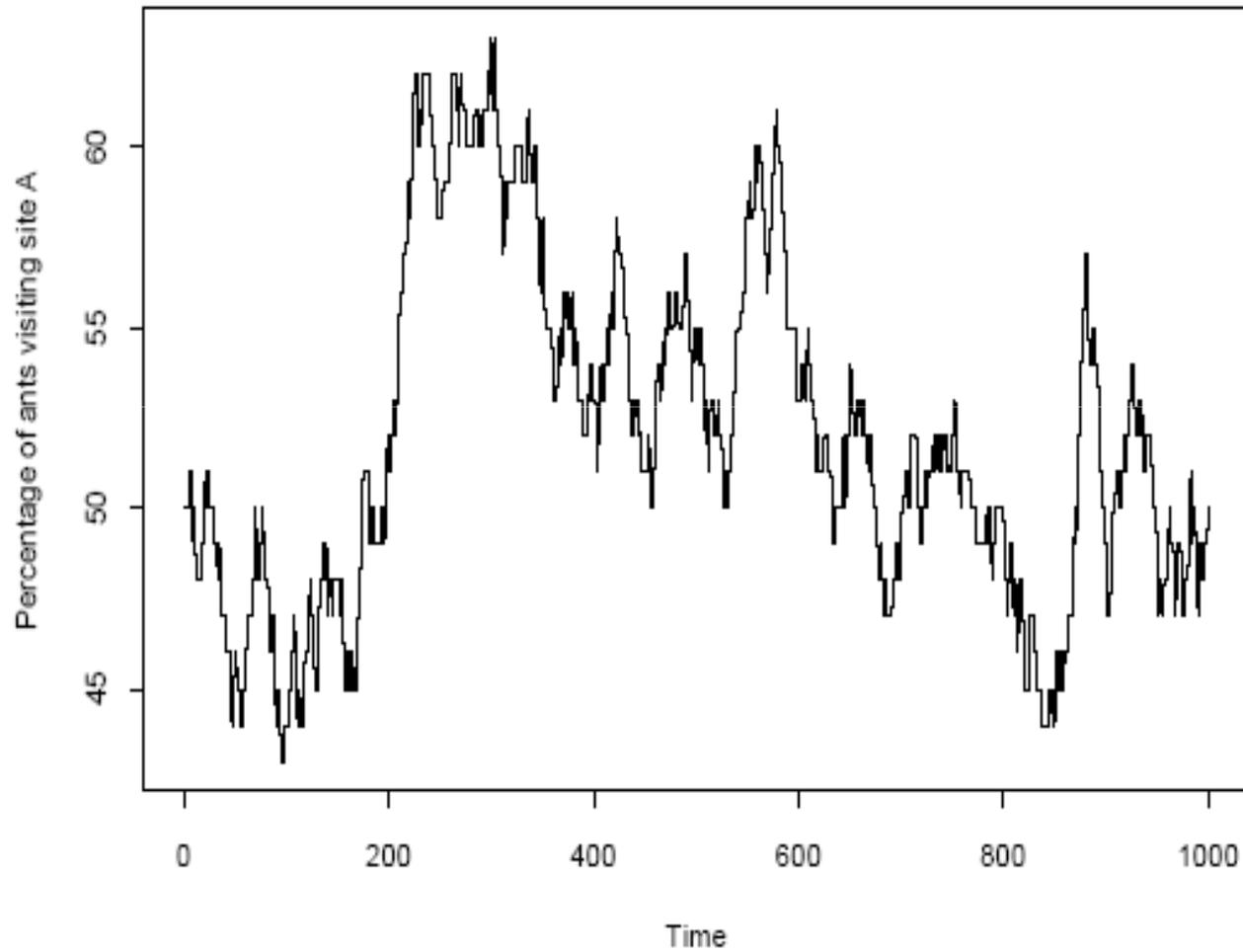
$$P_A = 1 - P_B = \frac{(k + A_i)^n}{(k + A_i)^n + (k + B_i)^n}$$

$A_i$ : Numero de hormigas que toman camino A

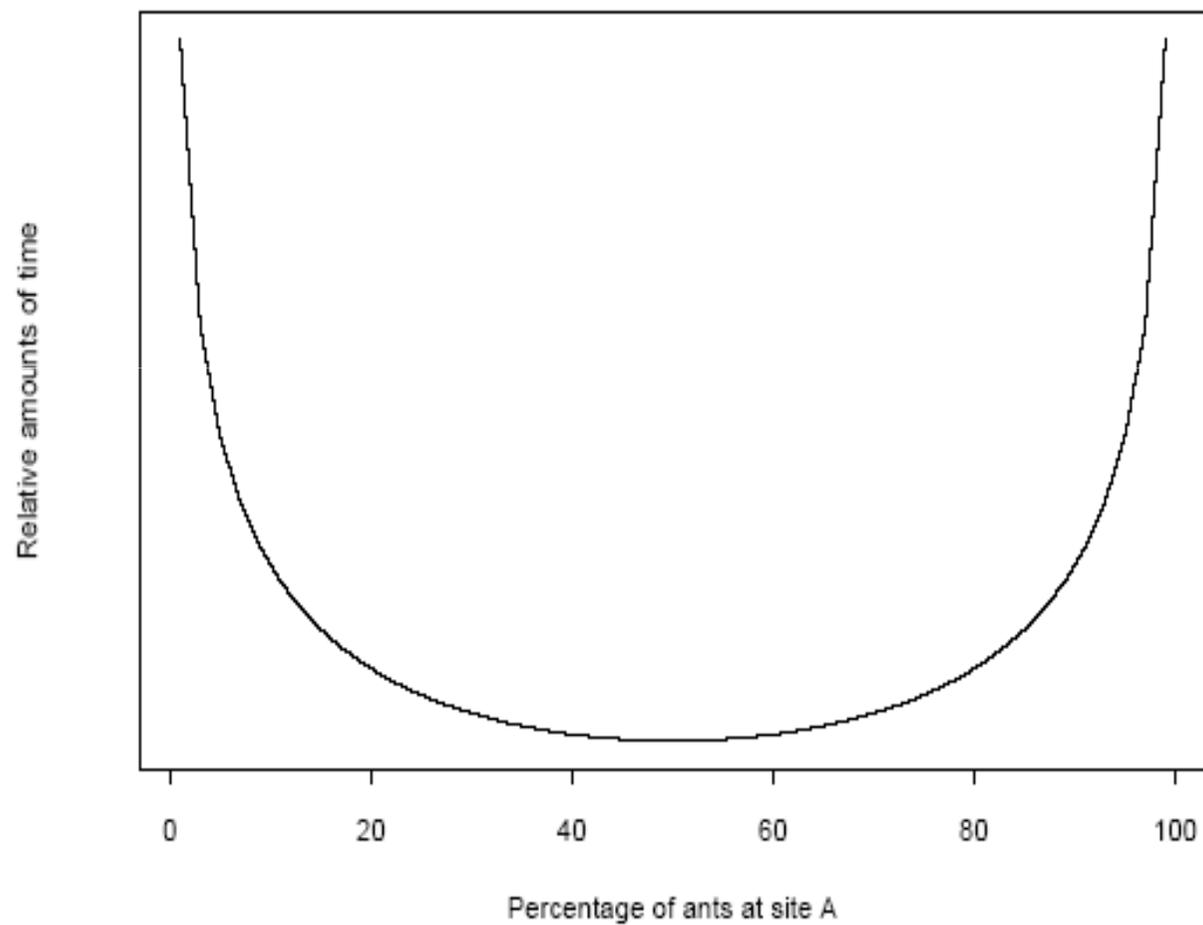
k: grado de atracción

n: grado de no linealidad

# Distribución de la población de hormigas en las fuentes de alimentos



# Frecuencia relativa del porcentaje de hormigas en la fuente A



# Comportamiento como saqueo- forraje de las Hormigas

## Caso 2: Los Patrones de incursión/ataques de grupos/armadas de hormigas

Probabilidad de moverse: 
$$P = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tan g \left( \frac{F_i + F_d}{100} - 1 \right) \right]$$

$F_d(i)$ : cantidad feromona a la derecha (*izquierda*)

Probabilidad de moverse a la izquierda:

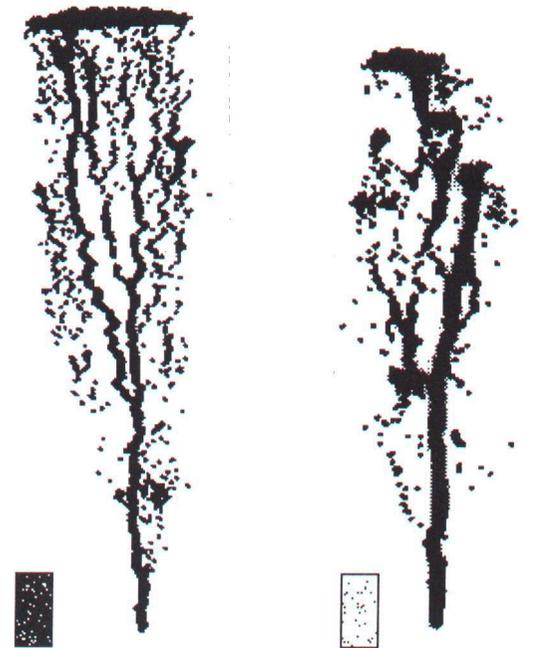
$$P_i = \frac{(4 + F_i)^2}{(4 + F_i)^2 + (4 + F_d)^2}$$

# Comportamiento como saqueo-forraje de las Hormigas

- Sistemas Reales



- Simulaciones



# MODELADO

- Rutas
- Toma de decisiones
- Actualización de los rastros de feromona
- Evaporación

# Sistemas Artificiales de Hormigas

## Regla de Transición:

$$P_{rs}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\gamma_{rs}(t)]^\alpha [\eta_{rs}]^\beta}{\sum_{u \in J_r^k} [\gamma_{ru}(t)]^\alpha [\eta_{ru}]^\beta} & \text{Si } s \in J_r^k \\ 0 & \text{De lo contrario} \end{cases}$$

$\gamma_{rs}(t)$ : Cantidad de feromona,  
 $J_k(r)$ : nodos aun no visitados,

$\eta_{rs}$ : inverso de la distancia  
 $\beta$  y  $\alpha$ : parámetros

## Regla de actualización de las trazas:

$$\gamma_{rs}(t) = (1 - \rho)\gamma_{rs}(t-1) + \sum_{k=1}^m \Delta\gamma_{rs}^k(t)$$

$(1-\rho)$ : tasa de evaporación,  $m$ : numero de hormigas  
 $\Delta\gamma_{rs}^k(t)$ : cantidad de traza que se deja por unidad de longitud

# Sistemas Artificiales de Hormigas

- Retroalimentación Positiva
  - Reforzar buenas soluciones
- Retroalimentación Negativa
  - Evaporación
- Comportamiento Colectivo Paralelo
- Apropiado para problemas dinámicos  
(no convergencia)

# Sistemas Artificiales de Hormigas

## Cantidad dejada de *feromona*

$$\Delta\gamma_{rs}^k(t) = \begin{cases} 1/L_k(t) & \text{Si arco } (r,s) \in \text{tour completado por hormiga } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

## Extensiones

- Exploración vs. Explotación
- Regla Actualización global vs. Local

# Ant Colony Optimization (ACO)

- El enfoque ACO engloba a todos aquellos algoritmos cuyo diseño está basado en el comportamiento de las colonias de hormigas reales.



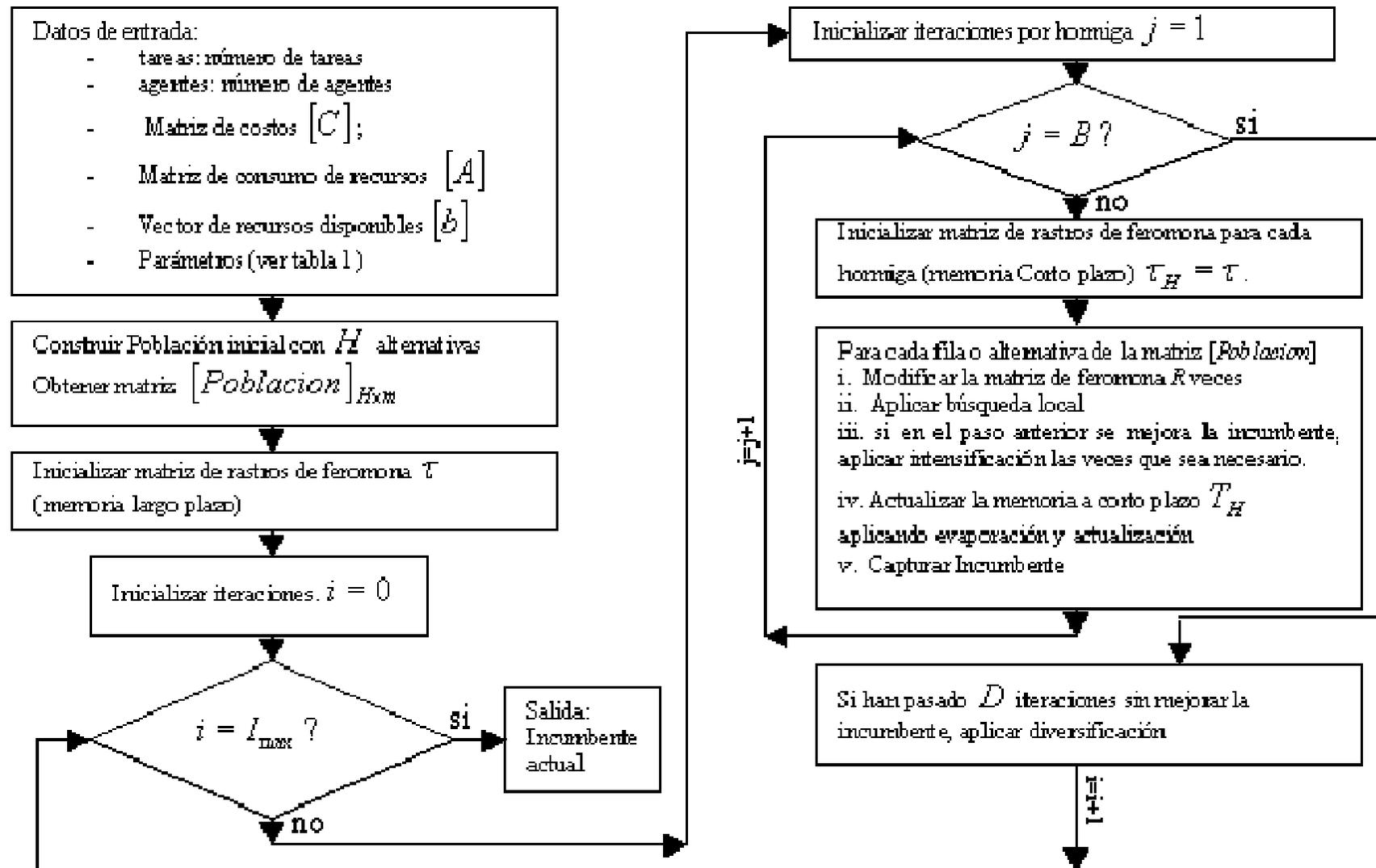
# Ant Colony Optimization (ACO)

- Las hormigas reales (ciertas especies) dejan un rastro (**feromona**) que puede ser detectado por el resto de la colonia (**comunicación indirecta o stigmergy**)
- Un Algoritmo ACO es un proceso distribuido en el que un conjunto de **agentes** (reactivos) actúan en forma independiente, pero cooperan esporádicamente en forma indirecta para llevar a cabo un objetivo común.

# Consideraciones para su aplicación

- El enfoque ACO es particularmente adecuado para ser aplicado a problemas que acepten una **representación vía grafo (necesario para imitar la búsqueda de un camino)**
- **Representación del rastro** de feromona y su asociación a las conexiones entre las componentes del problema.
- Posibilidad de añadir **conocimiento del problema (heurística local)** para guiar junto con el rastro la construcción de las soluciones.

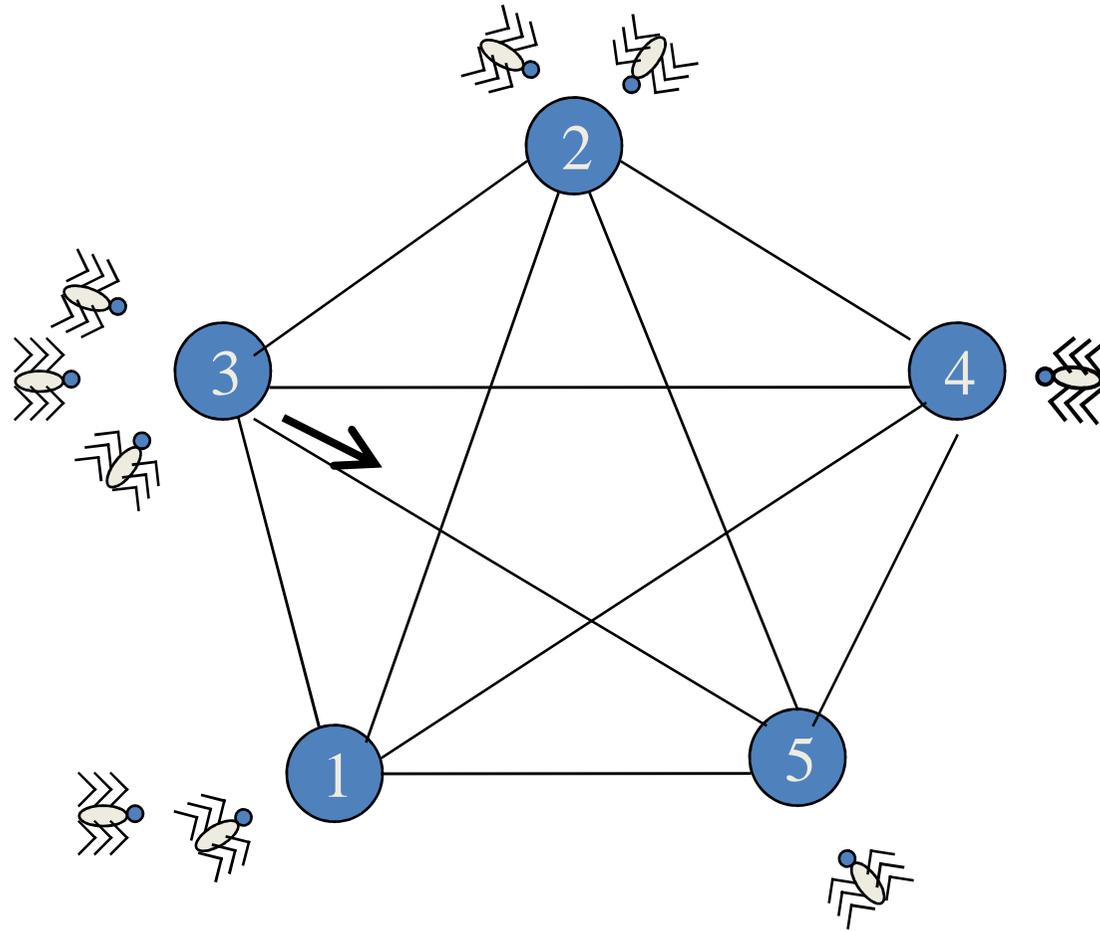
# ALGORITMO



# Consideraciones para su aplicación

- Como ejemplo clásico usaremos el problema TSP
- **Representación del rastro** de feromona puede ser realizado a través de una matriz de números reales ( $\tau$ ) de  $n \times n$ .
- **Heurística local:**  $1/d_{ij}$ , es decir, un valor inversamente proporcional a la distancia entre las ciudades  $i$  y  $j$ .

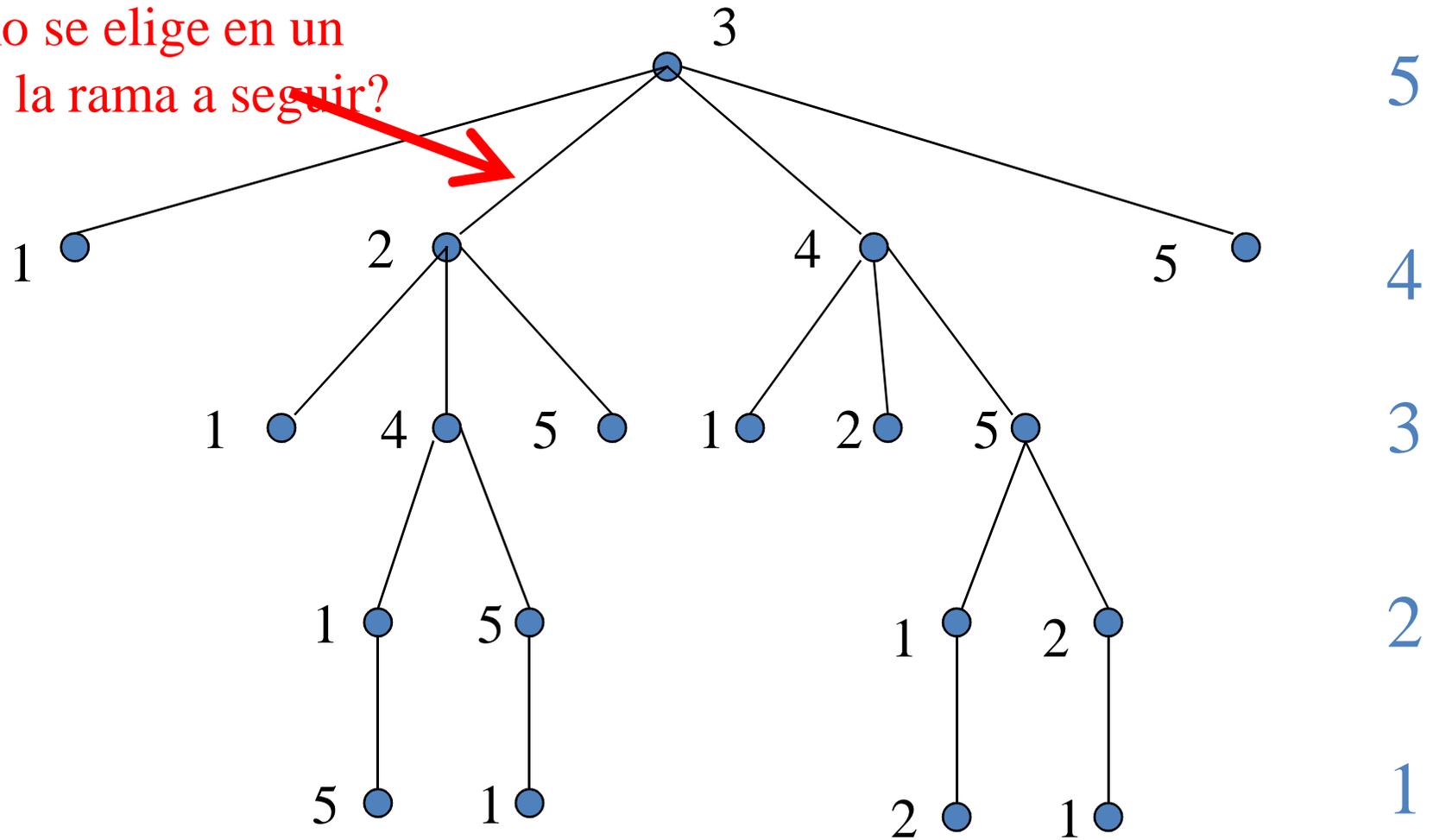
# ACO aplicado a TSP



# Espacio de Búsqueda - TSP

## Algoritmo ACO

¿Cómo se elige en un ACO la rama a seguir?



# El primer algoritmo ACO (Ant System o AS)

```
Inicializar();  
for c=1 to Nro_ciclos  
{  
  for k=1 to Nro_ants  
    ant-k construye solución k;  
  Guardar la mejor solución;  
  Actualizar Rastro (i.e.,  $\tau_{ij}$ );  
  Reubicar hormigas para el próximo ciclo;  
}  
Imprimir la mejor solución encontrada;
```

# El primer algoritmo ACO (Ant System o AS)

```
Inicializar();  
for c=1 to Nro_ciclos  
{  
  for k=1 to Nro_ants  
    ant-k construye solución k;  
  Guardar la mejor solución;  
  Actualizar Rastro (i.e.,  $\tau_{ij}$ );  
  Reubicar hormigas para el próximo ciclo;  
}  
Escoger mejor solución encontrada;
```

La construcción se realiza paso a paso en forma probabilística considerando

$\tau_{ij}$  y  $\eta_{ij}$

# AS - Construcción de una solución para TSP

/\*  $S_k$ : Solución o permutación construida por la hormiga  $k$  \*/  
 $S_k = \text{Ciudad\_Inicial}$ ; (escogida de acuerdo a algún criterio)  
mientras no se haya completado el tour

{

  Seleccionar próx. Ciudad ( $j$ ) con probabilidad  
  ( $i$  es la última ciudad incluida)

$$P_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \cdot \eta_{ij}^\beta}{\sum_{h \in \text{NoVisitadas}} \tau_{ih}^\alpha \cdot \eta_{ih}^\beta} & j \in \text{NoVisitadas} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$S_k = S_k \oplus j$$

}

# El primer algoritmo ACO (Ant System o AS)

```
Inicializar();  
for c=1 to Nro_ciclos  
{  
  for k=1 to Nro_ants  
    ant-k construye solución k;  
  Guardar la mejor solución;  
  Actualizar Rastro (i.e.,  $\tau_{ij}$ );  
  Reubicar hormigas para el próximo ciclo;  
}  
Escoger mejor solución encontrada;
```

Se puede hacer considerando todas las soluciones encontradas o un subconjunto de ellas

# Actualización del Rastro en AS

Acumulación de rastro proporcional a la calidad de las soluciones (i.e.,  $NroAnts$  soluciones):

$$\Delta \tau_{ij}(t+1) = \sum_{k=1}^{NroAnts} \Delta^k \tau_{ij}$$

Este valor es calculado directamente proporcional a la calidad de la solución

Actualización Efectiva ( $\rho$  es el factor de persistencia del rastro)

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t+1)$$

# Sistemas Artificiales de Hormigas

- Viajero de Comercio

<b>Grafo</b>	<b>CAS</b>	<b>ACS</b>	<b>GA</b>	<b>Optimo</b>
<b>ry48p</b>	14430	14422	14422	14422
<b>kro124p</b>	36230	36230	36230	36230
<b>ftv170</b>	2755	2755	2755	2755

- Partición de Grafos

<b>Grafo</b>	<b>Mejor</b>	<b>RRTS</b>	<b>CAS</b>
<b>G500.2.5</b>	49	49 (2)	49 (74)
<b>G500.05</b>	218	218 (2.5)	218 (64)
<b>G1000.05</b>	445	445 (6.5)	445 (73)
<b>G1000.20</b>	3382	3382 (14.7)	3384 (91)
<b>U500.05</b>	2	2 (1.7)	2 (65)
<b>U500.40</b>	412	412 (10.2)	412 (65)

# Importancia de Rastro ( $\tau$ )

- Como todo método heurístico constructivo, un algoritmo ACO tiene su **bloque de construcción** a partir del cual se generan nuevas soluciones del espacio de búsqueda.
- El bloque de construcción depende de  $\tau$  dado que incide directamente en las componentes a seleccionar.

# Sistema Combinatorio de Hormigas

1. Construir el Grafo de las hormigas
2. Definir las ecuaciones de la función de transición y de actualización de *feromona* según función objetivo del problema

$$Tf(\gamma_{rs}(t), Cf_{r \rightarrow s}^k(z)) = \frac{\gamma_{rs}(t)^\alpha}{Cf_{r \rightarrow s}^k(z)^\beta}$$

$$\Delta\gamma_{rs}^k(t) = \begin{cases} \frac{1}{C_f^k(t)} & \text{Si arco (r,s) ha sido visitado por hormiga } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

# Aplicación en Problemas Dinámicos (Enrutamiento)

- Problema Distribuido y Cambiante en el tiempo
- Selección de caminos maximizando objetivos y minimizando costos
- Construir tablas de enrutamiento

$$R_i = [r_{n,d}^i(t)]_{k_i, N-1}$$

$r_{n,d}^i(t)$ : probabilidad de que una hormiga cuyo destino es  $d$  sea enviado desde el actual sitio  $i$  a su sitio vecino  $n$

$k_i$  filas: nodos vecinos a  $i$      $N-1$  columnas: numero de sitios

# Aplicación en Problemas Dinámicos (Enrutamiento)

- *Reforzamiento* de la Probabilidad

$$r_{i-1,d}^i(t+1) = \frac{r_{i-1,d}^i(t) + \delta r}{1 + \delta r}$$

- *Debilitamiento* de la Probabilidad

$$r_{n-1,d}^i(t+1) = \frac{r_{n-1,d}^i(t)}{1 + \delta r}$$

$\delta r$ : parámetro de reforzamiento

Tal que se conserve:  $\sum_n r_{n,d}^i(t) = 1$

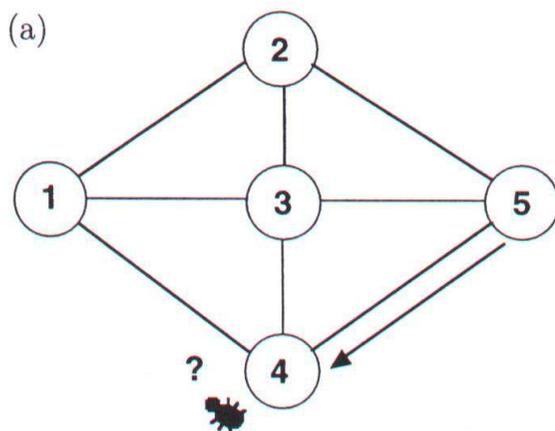
# Aplicación en Problemas Dinámicos (Enrutamiento)

- Calculo de  $\delta r$

$$\delta r = \frac{a}{T} + b$$

a, b: parámetros

T: tiempo pasado en la red



(b)

		Destination nodes			
		1	2	3	5
Neighbor nodes	1	0.8	0.3	0.1	0.1
	3	0.1	0.4	0.8	0.1
	5	0.1	0.3	0.1	0.8

# Otros algoritmos ACO

Surgen como respuesta a ciertos problemas observados en AS y básicamente se diferencian en cómo usan y/o modifican el rastro de feromona.

- MinMax-AS (control sobre los valores del rastro)
- AS-rank (ranking de soluciones)
- AS-elitism (solo la mejor solución)
- Ant Colony System (ACS)
- Ant-Q (basado en Q-Learning)

# Aplicaciones de ACO

- TSP
- Scheduling
- Vehicle Routing Problem (VRP)
- Data Mining (Ant-Miner & Ant-Tree)
- Problemas de Grafos (Clique, Coloreo, etc.)
- Ruteo Dinámico (ANT-Net)
- Problemas con funciones continuas y restricciones
- Geometría Computacional (Algunas ideas)

# División del Trabajo y Asignación de Tareas

# División del Trabajo y Asignación de Tareas

- Elasticidad del comportamiento de los individuos
- Reacción a estímulos asociados a tareas
- Especialización
- Plasticidad
- Robustez/Elasticidad

***Modelo de Umbral de Respuesta y Aprendizaje***

# Mecanismo de División del Trabajo

- Trabajos Temporales (castas por edad)
- Trabajadores Polimorfos (castas morfológicas)
- Variabilidad Individual (castas comportamentales)

# Umbral de Respuesta

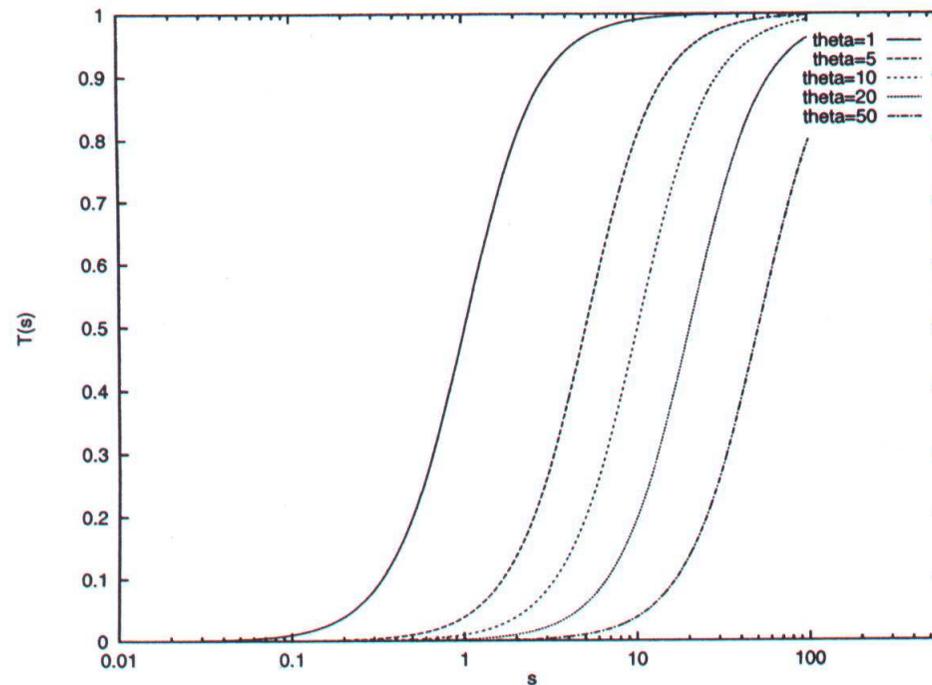
- Cada Individuo:  
*umbral de respuesta por tarea*
- Caso individuo que hace una tarea desaparece:  
*estimulo asociado a la tarea aumenta en intensidad en el resto de los individuos*
- Tarea hecha por un individuo:  
*reduce intensidad del estimulo asociado a esa tarea*

# Umbral de Respuesta

- Función de Respuesta: *probabilidad de realizar la tarea en función de la intensidad del estímulo  $s$*

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

$\theta$ : umbral de respuesta  
 $n$ : grado de no linealidad  
del modelo



# Modelo con $m$ tareas y varios tipos de trabajadores

- Dinámica de los  $x_{ij}$  
$$\partial_t x_{ij} = \frac{s_j^n}{s_j^n + \theta_{ij}^n} \left( 1 - \sum_{k=1}^m x_{ik} \right) - p x_{ij}$$

$p$ : probabilidad que un individuo activo pase a inactivo

$x_{ij}$ : fracción de individuos del tipo  $i$  realizando la tarea  $j$  ( $N_{ij}/n_i$ )

- Dinámica de  $s$  (caso  $i=1, 2$ ) 
$$\partial_t s_j = \delta_j - \alpha_j \sum_{i=1}^N x_{ij}$$

$N$ : Números de tipos de individuos en la colonia ( $N = \sum n_i$ )

$\alpha_j$ : valor escalar que mide la dificultad de la tarea  $j$

$\delta_j$ : aumento de la intensidad del estímulo por unidad de tiempo

# Especialización

Probabilidad que individuo  $i$  haga tarea  $j$

$$T_{\theta_{ij}}(s_j) = \frac{s_j^n}{s_j^n + \theta_{ij}^2}$$

Actualización de  $\theta_{ij}$  es

$\beta$ : tasas de aprendizaje

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

$\lambda$ : tasa de olvido

# Aplicación: Asignación de Tareas Adaptativa

- Probabilidad que individuo  $i$  localizado en la zona  $z(i)$  responda a la demanda  $s_j$  en zona  $j$

$$P_{ij} = \frac{s_j^n}{s_j^n + \alpha\theta_{ij}^2 + \beta d_{z(i),j}^n}$$

$\beta, \alpha$ : coeficientes positivo

$d_{z(i),j}$ : distancia entre la zona  $z(i)$  y  $j$  o cualquier factor como embotellamiento

- Actualización del Umbral de Respuesta

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j} - \xi_0$$

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

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

$\xi_0, \xi_1$ : coeficientes de aprendizaje

$\lambda$ : coeficiente de olvido

$n(j)$ : conjunto de zonas alrededor de  $j$

# Ordenamiento y Agrupamiento

# Ordenamiento y Agrupamiento

- Comportamientos en sociedades de insectos:
  - Agrupar cadáveres para formar cementerios
  - ordenar larvas para formar pilas
- Agentes caminan aleatoriamente y depositan objetos según información local

# Ordenamiento y Agrupamiento

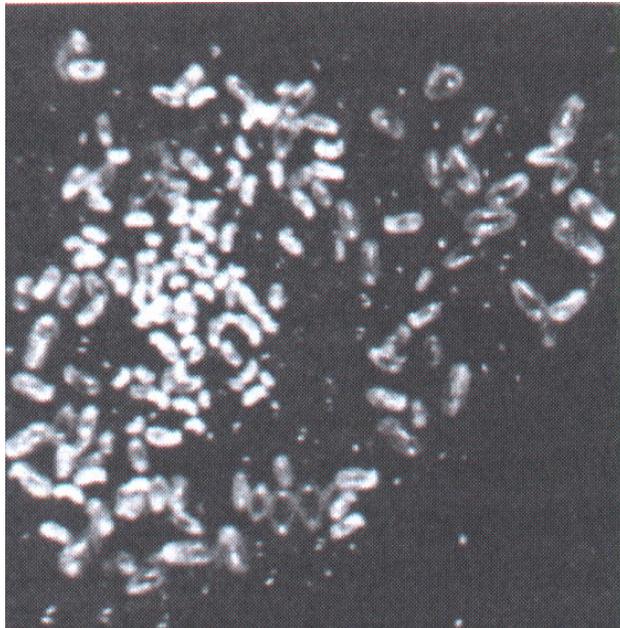
- Hay hormigas que son *basureras*: recogen las sobras del alimento que han recolectado y las colocan en un vertedero
- Pero del otro lado esta el *cementerio*: cientos de cadáveres de hormigas apilados cuidadosamente
- Tanto el vertedero como el cementerio están en un lugar alejado de la colonia, siguiendo una *regla*: colocar las hormigas muertas y el vertedero lo mas lejos posibles, pero separados entre si maximizando la distancia entre los 3
- Quién hace el calculo de este problema de matemática espacial?  
La inteligencia emergente de los sistema de auto-organización

# Ordenamiento y Agrupamiento

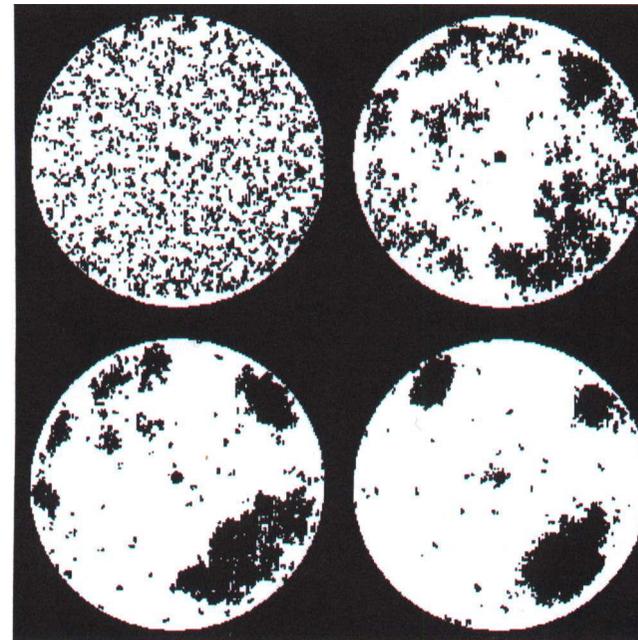
- Agrupar cadáveres
  - cadáveres distribuidos aleatoriamente
  - Retro-alimentación positiva
    - => feromona de agregación
- Ordenar larvas
  - Trabajadores depositan larvas según tamaños:
    - Larvas grandes en la periferia y pequeñas en el centro
  - Diferente cantidad de espacio es asignado a cada tipo de larva

# Ordenamiento y Agrupamiento

- Ordenamiento



- Agrupamiento



# Agrupamiento

- **Objetivo:** Objetos aislados deben ser recogidos y depositados en sitios donde hallan mas del mismo tipo
- **Modelo para un solo tipo de objeto**
  - Probabilidad para un agente sin carga recoja un objeto

$$P_R = \left( \frac{K_1}{K_1 + f} \right)^2$$

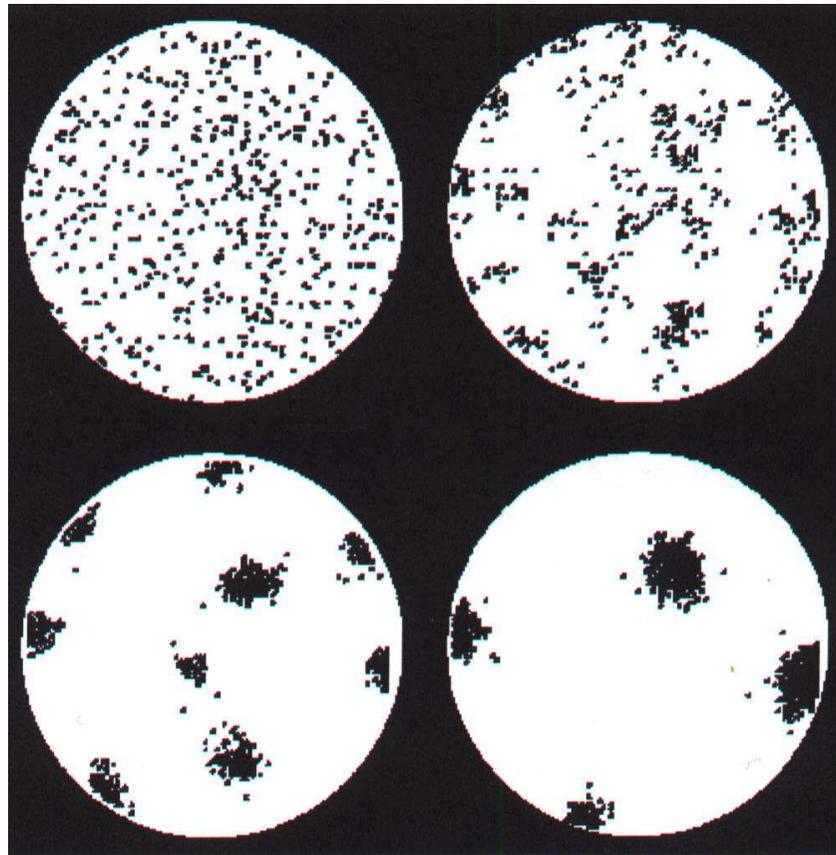
- Probabilidad para un agente con carga deposite un objeto

$$P_d = \left( \frac{f}{K_2 + f} \right)^2$$

$K_1, K_2$ : umbral (constante)

$f$ : fracción de objetos percibidos en la vecindad del agente ( $f$ : numero de objetos durante los últimos  $T$  unidades de tiempo dividido por el numero de objetos máximo que se puede encontrar durante ese lapso de tiempo)

# Agrupamiento: Resultados Simulaciones



# Ordenamiento

- Suponga dos tipos de elementos A y B

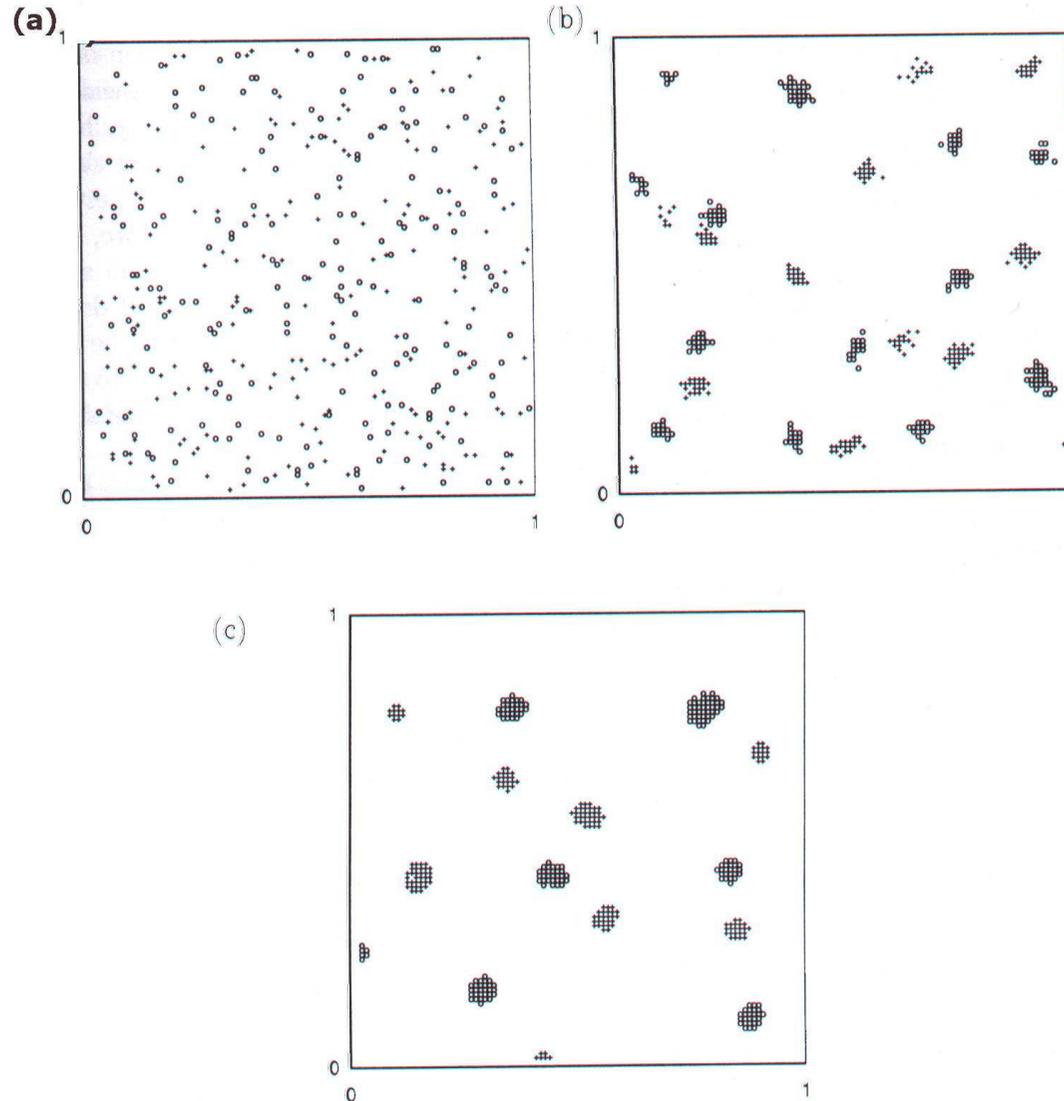
$$P_R(A) = \left( \frac{K_1}{K_1 + f_A} \right)^2$$

$$P_R(B) = \left( \frac{K_1}{K_1 + f_B} \right)^2$$

$$P_d(A) = \left( \frac{f_A}{K_2 + f_A} \right)^2$$

$$P_d(B) = \left( \frac{f_B}{K_2 + f_B} \right)^2$$

# Ordenamiento: Resultados Simulaciones



# Aplicación: Análisis de Datos

- Probabilidad de Recolección y Deposito

$$P_R(o_i) = \left( \frac{K_1}{K_1 + f(o_i)} \right)^2 \quad P_d(o_i) = \begin{cases} 2f(o_i) & \text{si } f(o_i) < k_2 \\ 1 & \text{si } f(o_i) \geq k_2 s \end{cases}$$

$f(o_i)$ : similaridad promedio del objeto  $o_i$  con otros objetos  $o_j$  presentes en la vecindad de  $o_i$  (densidad local)

$$f(o_i) = \begin{cases} \frac{1}{s^2} \sum_{o_j \in \text{Vecino}_{(sxs)}(r)} \left[ 1 - \frac{d(o_i, o_j)}{\alpha} \right] & \text{si } f > 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$d(o_i, o_j)$ : distancia entre objetos  $o_i$  y  $o_j$

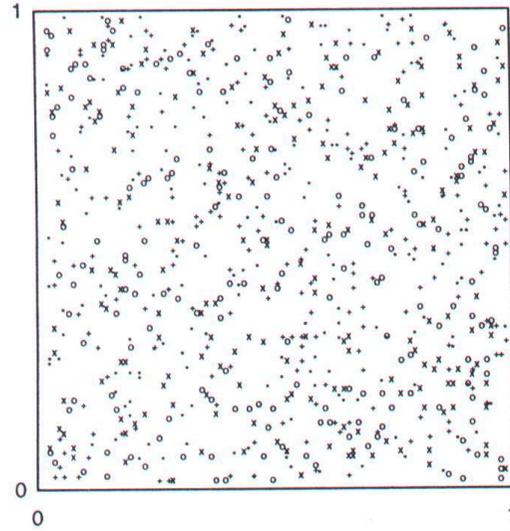
(distancia inter-grupo >> distancia intra-grupo)

$\alpha$ : factor de disimilaridad       $r$ : sitio donde esta agente

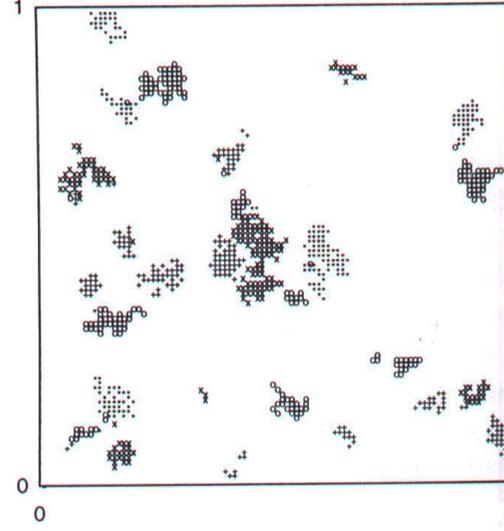
$s^2$ : sitios alrededor de  $r$  ocupados por objetos parecidos a  $o_i$

# Aplicación: Análisis de Datos

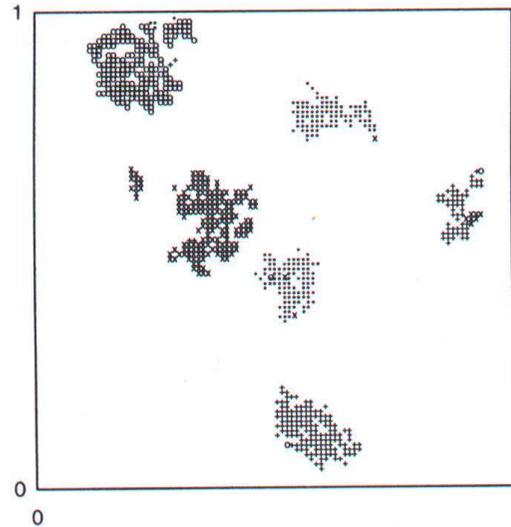
(a)



(b)



(c)



# Aplicación: Partición de Grafos

- Objetivo:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n a_{ij} (x_{im} - x_{jm})$$

$a_{ij}$ : matriz de adyacencia

$x_{im}$ : coordenadas vértice  $i$  en  $\mathbb{R}^n$

- Distancia:

$$d(v_i, v_j) = \frac{\sum_{k=1}^n |a_{ik} - a_{jk}|}{\sum_{k=1}^n |a_{ik}| + \sum_{k=1}^n |a_{jk}|}$$

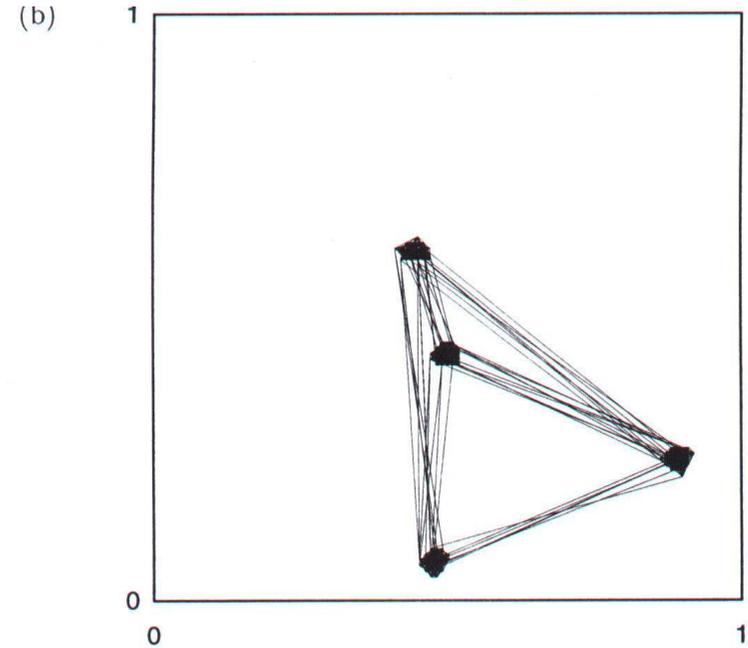
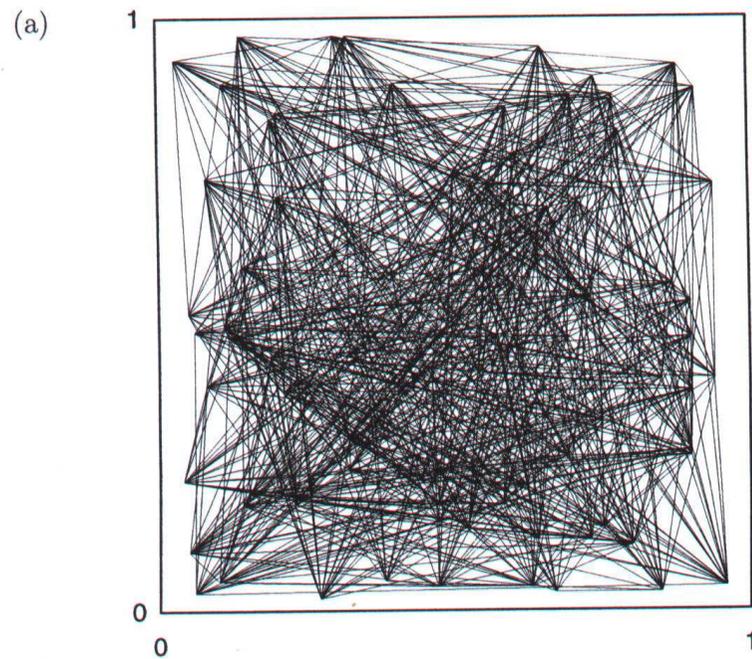
- Densidad Local

$$f(v_i) = \begin{cases} \frac{1}{s^2} \sum_{v_j \in \text{Vecino}_{(sxs)}(r)} \left[ 1 - \frac{d(v_i, v_j)}{\alpha} \right] & \text{si } f > 0 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

- Probabilidad de tomar o depositar

$$P_R(v_i) = \left( \frac{K_1}{K_1 + f(v_i)} \right)^2 \qquad P_d(v_i) = \left( \frac{f(v_i)}{K_2 + f(v_i)} \right)^2$$

# Aplicación: Partición de Grafos



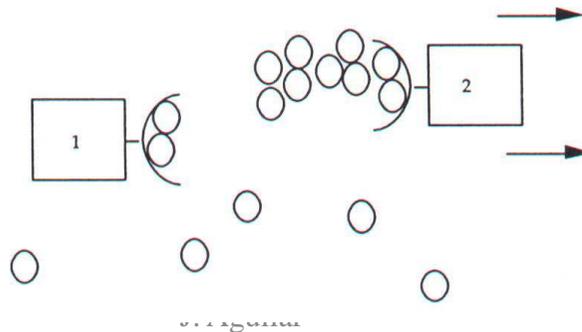
# Aplicación: Robótica

- Agrupamiento Distribuido

=> forma descentralizada

- Movimientos

- Movimiento en línea hasta que conseguir obstáculo
- Al detectar obstáculo, gira aleatoriamente y comienza de nuevo mov. en línea
- Cuando Robot tiene 3 o mas objetos, robot se vacía, retrocede, ejecuta un giro aleatoria y comienza mov. en línea vacío



# Auto-organización y Patrones

# Auto-organización y Patrones

- **Plantilla:** patrón para construir otro patrón. Usado por insectos para organizar sus actividades
- **Dinámica Auto-organizativo restringido por plantilla**
- **Ejemplo en la construcción de muros**
  - Cuerpo de las reinas termitas para el aposento real
  - Camada de hormigas para el nido

# Auto-organización y Patrones

- Mezcla de ambos generan:
  - Efecto bola de nieve
  - Multi-estabilidad
  - Perfecto patrón predecible que sigue al template
- Aplicación
  - Numero de grupos y la localización de los mismos son conocidos desde el inicio

# Auto-organización y Patrones

- **Plantilla:** gradientes (de temperatura, humedad, etc.), cuerpos de un animal
- **Efecto bola de nieve:** mas grande es un grupo, este es mas atractivo para atraer a mas objetos
- **Elementos de reclutamiento, coordinación, orientación y forma:**
  - Ventana de concentración (umbral)
  - Feromona de construcción de la reina (plantilla químico)
  - Estimulo Táctil y rastros de cemento y de seguir el rastro

# Auto-organización en Construcción del aposento de la reina

- $H(r,t)$ : concentración en sitio  $r$  en el momento  $t$

$$\partial_t H = k_2 P - k_4 H + D_H \nabla^2 H$$

$D_H$ : coeficiente difusión       $k_2$ : cant. feromone emitido/unid. dep.

- Dinámica densidad termitas cargadas

$$\partial_t C = \Phi - k_1 C + D_C \nabla^2 C - \gamma \nabla \cdot (C \nabla H)$$

$\gamma$ : intensidad de atractividad

$D_C$ : constante difusión

$k_1$ : taza de descarga por termita

$\Phi$ : flujo constante termitas cargadas

- Dinámica del material depositado

$$\partial_t P = k_1 C - k_2 P$$

# Auto-organización y Patrones

- **Plantilla de feromona creado por reina**

$$T(x, y) = e^{-\left[\left(\frac{x-x_0}{\lambda_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\lambda_y}\right)^2\right]}$$

$x_0, y_0$ : centro geométrico reina     $\lambda_x, \lambda_y$ : distancia para el decaimiento de la plantilla del feromona

.

- **Dinámica densidad termitas cargadas** (efecto de atracción del feromona de cementación)

$$\partial_t P = Fk_1 C - k_2 P$$

$v$ : fuerza de atracción de la plantilla del feromona de la reina     $F((x,y))=1-T(x,y)$

- **Dinámica del material depositado**

$$\partial_t C = \Phi - Fk_1 C + D_C \nabla^2 C - \gamma \nabla \cdot (C \nabla H) - v \nabla \cdot (C \nabla T)$$

# Aplicaciones

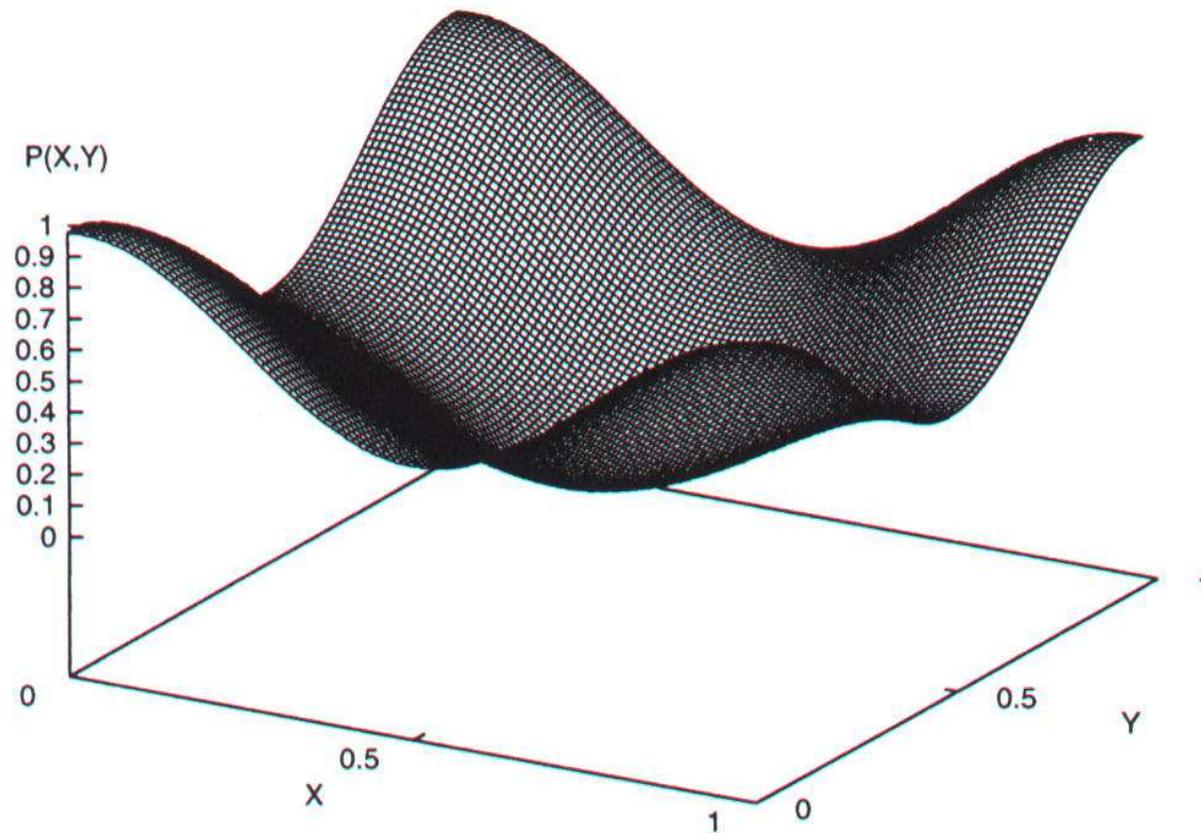
- Convierte a problemas anteriores (Partición de Grafos y Análisis de Datos) parametrizables
- Para introducir plantillas
  - $P_t(x,y)$ : probabilidad plantilla
  - $x,y$ : coordenadas actuales del agente
  - Espacio agrupamiento  $[0,1]*[0,1]$

$$P_t(x,y) = a \left[ e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-1)^2+y^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{(x-1)^2+(y-1)^2}{\sigma^2}} + e^{-\frac{x^2+(y-1)^2}{\sigma^2}} - b \right]$$

$a, b$ : parámetros a optimizar

$\sigma^2$ : paso de la plantilla

# Aplicaciones

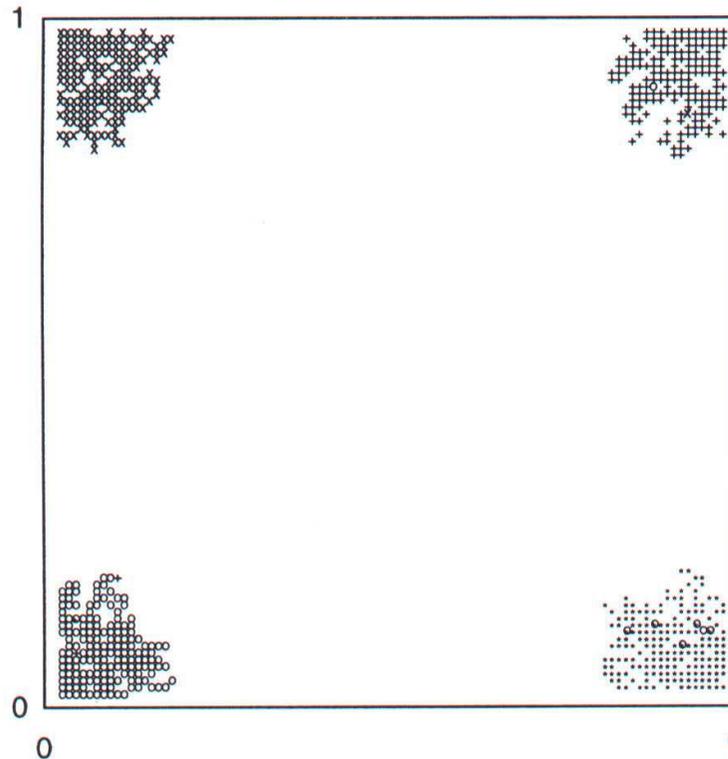


Funció

# Aplicaciones: Análisis de Datos

$$P_R(o_i) = 0.7 \left( \frac{K_1}{K_1 + f(o_i)} \right)^2 + 0.3(1 - P_t(r_i)) \quad P_d(o_i) = \begin{cases} 2P_t(r_i)f(o_i) & \text{si } f(o_i) < k_2 \\ P_t(r_i) & \text{si } f(o_i) \geq k_2 \end{cases}$$

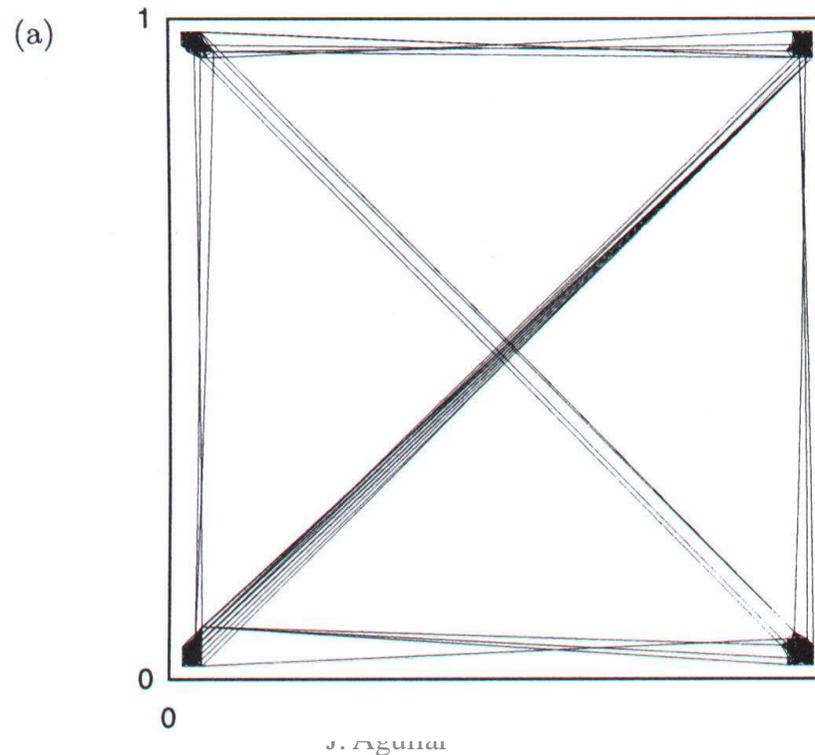
$$r_i = (x_i, y_i)$$



# Aplicaciones: Partición de Grafos

$$P_R(v_i) = 0.7 \left( \frac{K_1}{K_1 + f(v_i)} \right)^2 + 0.3(1 - P_t(w_i)) \quad P_d(v_i) = P_t(w_i) \left( \frac{f(v_i)}{k_2 + f(v_i)} \right)^2$$

$w_i$ : localización del vértice  $v_i$  en el plano



# Construcción de Nidos y Auto- Ensamblaje

# Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje

- Coordinación de actividades a través del ambiente:
  - Cuantitativo o Continuo (Termitas)
  - Cualitativo o Discreto (Avispas)
- Usado para construir complejas arquitecturas que cubren requerimientos
  - Funcionales
  - Adaptativos
- **Construcción de Nidos:** demuestra una de las mas grandes diferencias entre comportamiento individual o colectivo

# Construcción de Nidos y Auto-Ensamblaje

- Conjunto de estímulos no estacionarios
  - se va formando un cada vez mas rico ambiente estímulario
- Estímulos provienen del ambiente o de sus compañeros
- Estímulos afectan comportamiento insectos dependiendo de la intensidad y contexto
- **Construcción:** como se organizan los estímulos en el espacio y tiempo para producir una robusta y coherente construcción?

# Construcción de Nidos

- Dos Mecanismos:
  - Coordinación de actividades a través del ambiente
  - Auto-organización
- Principales elementos auto-organización  
=> múltiples interacciones
- Interacciones:
  - Directas
  - Indirectas
- Coordinación ambiental: implica indirectas interacciones a través del ambiente
- Combinación auto-organización y coordinación ambiental => Coordinación Cuantitativa

# Coordinación Cualitativo

- Diferente tipo de estímulo  
=> diferente respuesta
- No positiva retroalimentación  
=> evitar amplificar intensidad del estímulo
- Ejemplo: Construcción en las avispas

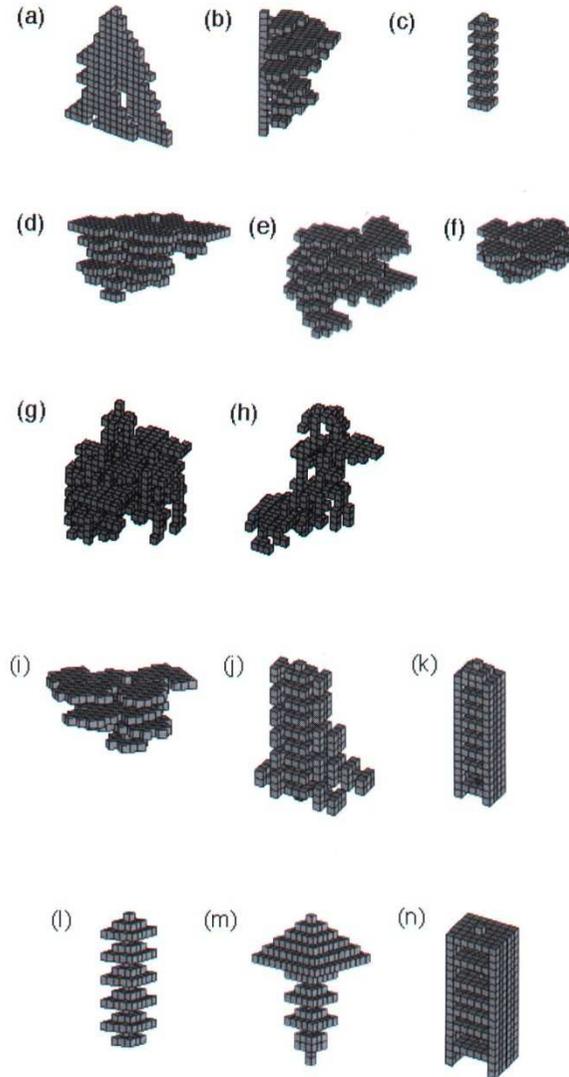
# Construcción en las avispas

- Mas de 60 tipos de arquitecturas de nidos
- Pueden ir desde una celda a millones de ellas
- Modular: una estructura básica es repetida
- Algoritmo de construcción individual: serie de lazos de decisión si-entonces
- Varias acciones de construcción en paralelo
- Arquitectura impone restricciones para evitar conflictos: no aleatoria adición de celdas (a mas muros mayor probabilidad de ser añadido)
- Decisiones construcción: locales según configuración percibida

# Modelo de Auto-Ensamblaje

- Autómatas asincronos en un espacio tridimensional
- Comportamiento basado en sistema de estímulo-respuesta local en espacio y tiempo
- Cuando configuración estimulante (micro-reglas) se encuentra, se deposita objeto
- Algoritmo construcción: conjunto de micro-reglas compatibles
- Micro-reglas de diferentes etapas de la construcción no deben solaparse (Coordinación)

# Modelo de Auto-Ensamblaje



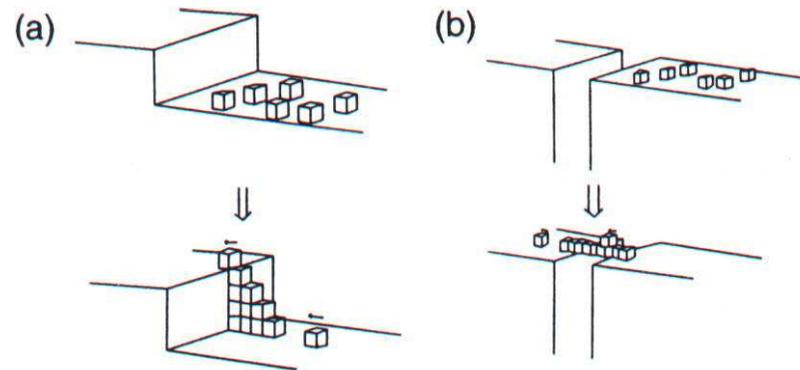
J. Aguilar

# Aplicaciones Auto-Ensamblaje

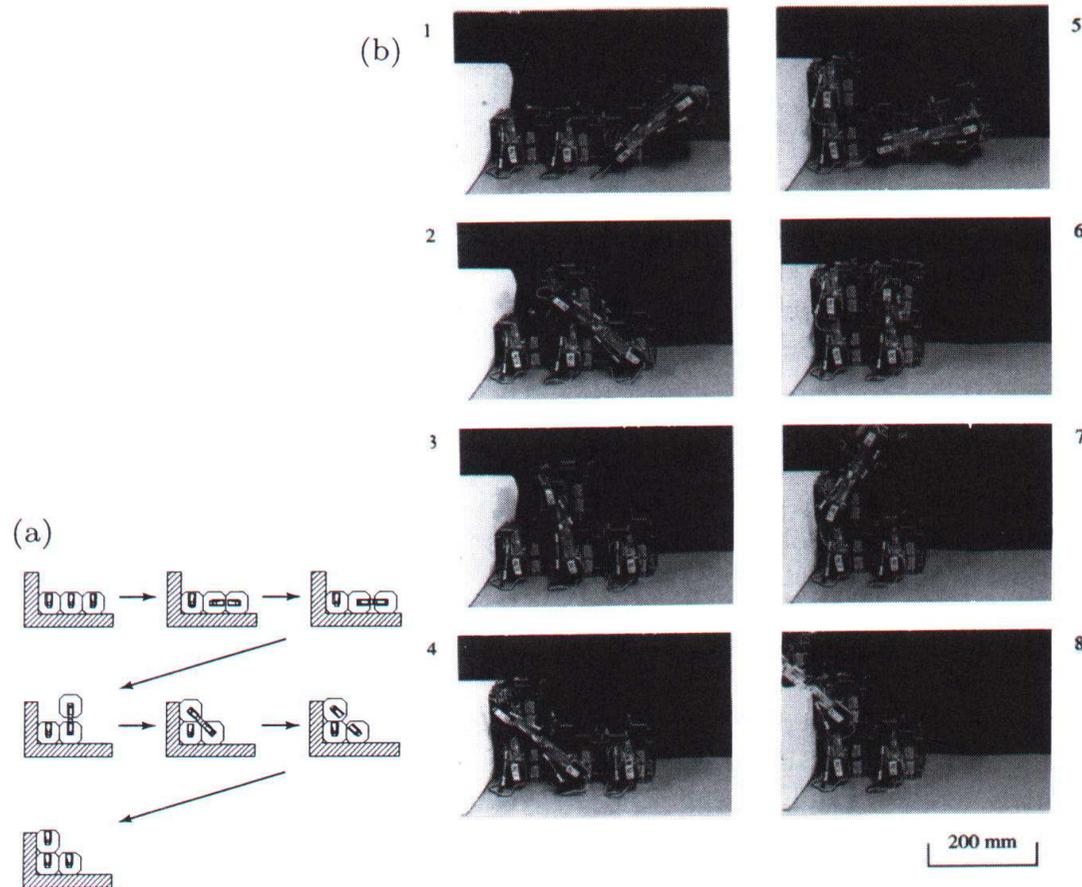
- Dado un cuerpo deseado, encontrar el algoritmo que pueda generarlo bajo algunas restricciones materiales
- Mecanismos generativos basados en la computadora: el usuario toma algunos patrones desde todos los generados por el computador según que tan atrayente es
- Evolucionar exitosos sistemas de auto-ensamblaje o formas de atractivas

# Aplicaciones: Sistema Robótica de Auto-Ensamblaje

- Robots simples:
  - cubos con brazos para rotar o extenderse.
  - Comportamiento depende de su estado y el de los vecinos
- 2 Posibles Tareas
  - Construir Escaleras
  - Construir Puentes
- Movimiento de los Robot
  - Moverse hacia arriba
  - Moverse a la izquierda



# Aplicaciones: Sistema Robótica de Auto-Ensamblaje



# Aplicaciones: Diseño Evolucionario

- Creación de nuevos diseños con el computador usando técnicas evolucionarias
- 2 mecanismos:
  - Generativo
  - Evolución Artificial
- Definición de la Función Adaptativa:
  - Requerimientos Funcionales
  - Estéticos

# Transporte Cooperativo

# Transporte Cooperativo

- Una Hormiga consigue un botín/presa
  - Si puede mover lo lleva al nido
  - de lo contrario recluta a otras
- Mecanismo cooperativo:
  - cuando y como las hormigas se organizan para mover el botín/presa?
- No existe aun una descripción formal del fenómeno biológico

# Transporte Cooperativo

- Hay alguna ventaja en el transporte colectivo con respecto al solitario?
- Cuando y como una hormiga reconoce que no puede cargar un objeto solo?
- Como las hormigas cooperan y coordinan sus acciones?
- Como son reclutadas?
- Como las hormigas saben que tiene el numero correcto de ellas para el transporte

# Transporte Cooperativo

- Peso total (P) cargado por un grupo de N hormigas (según Moffet, 1980)

$$P = N^{2.044}$$

- Reclinación y Reposición alrededor de los objetos para ver si pueden moverlos
- Reclutamiento de dos tipos
  - Corto Rango (segregación en el aire)
  - Largo Rango (rastros químicos)

# Transporte Cooperativo

- Coordinación: pareciera que fuera a través del ambiente
- Numero de Hormigas

$$N = P^{0.489}$$

- Bloqueo
  - Obstáculos o fuerzas opuestas
  - Realineamiento o Reposicionamiento

# Conceptos Vecinos a la Emergencia

Algunos ejemplos de enjambres en la naturaleza y sus comportamientos colectivos

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

# Emergencia en el Reino Animal

## Modelo de las Colonias de Hormigas

Búsqueda de Alimento

División del trabajo

Reclutamiento (migración de nidos, etc.)

Organización del ambiente (construcción de nidos)

Agregación (cementorios, clasificación de crías)

Transporte de Objetos

## Modelo de las Abejas

Escogencia del Sitio para construir el Nido

Búsqueda del Néctar

Comportamiento Defensivo

Construcción de Panales

## Modelo de las Cucarachas

Aplicación

# Aplicación: Robótica

- **Objetivo:** Localizar una caja y llevarla a un dado sitio
- **3 sensores:**
  - Obstáculos
  - Objetivo
  - Robots
- **1 Actuador:** define dirección
- **5 comportamientos:**
  - Evitar
  - Objetivo
  - Lento
  - Seguir (se necesitan 2 robots para mover caja)
  - Encontrar
- **1 Mecanismo de Recuperación de Bloqueo**
  - Realineación y Reposición según umbrales

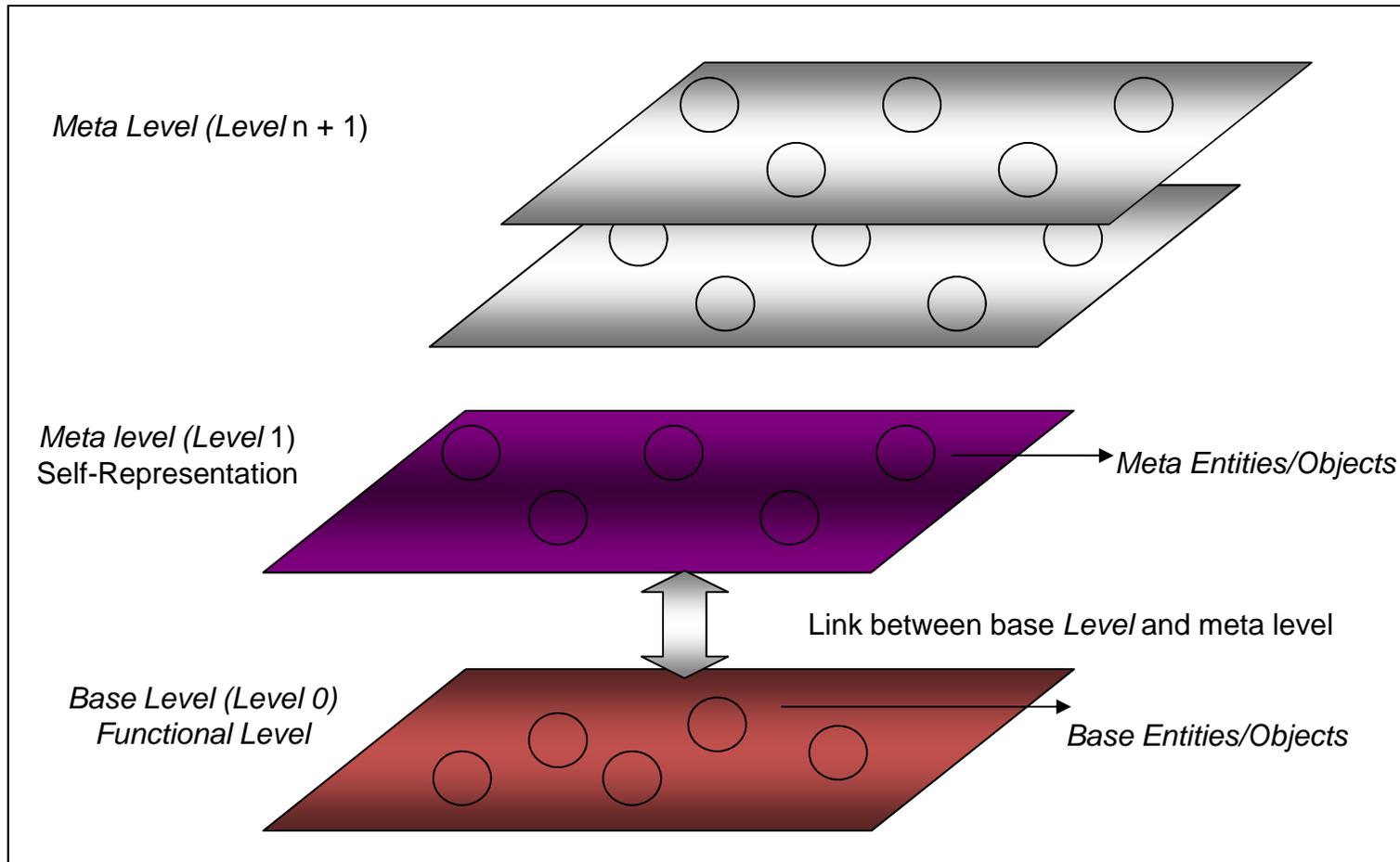
# Algunos libros sobre el tema

- “Intelligence Colective”, *Ed. E. Bonabeau, G. Theraulaz*, Hermes, 1994
- “Swarm Intelligence: from natural to artificial Systems”, *E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz* Oxford University Press, 1999.
- “New ideas in optimization”, *Ed. D. Corne, M. Dorigo, F. Glover*, Mc Graw Hill, 1999.
- “Introducción a la Computación Inteligente”, *Ed. J. Aguilar, F. Rivas*, Meritec, 2001

# Reflective Computing:

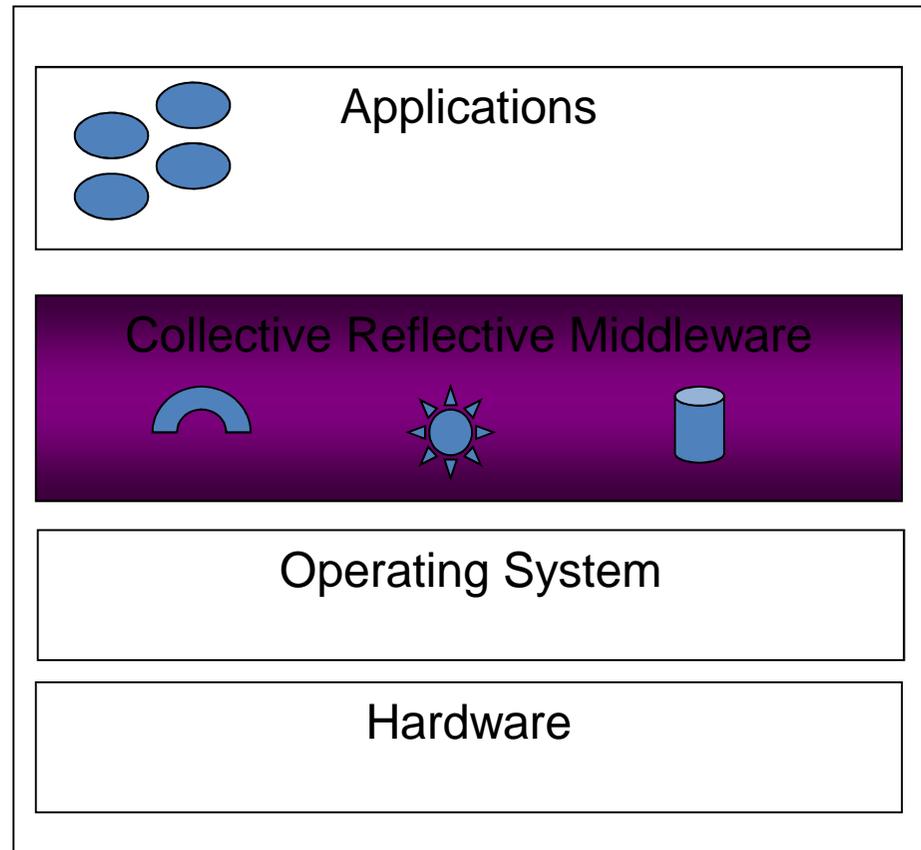
- Reflection is the ability of a running program to examine itself and its software environment and to change what it does depending on what it finds.
- 
- This activity involves three important aspects: *introspection* (state observation and agent structure), *intercession* (behavior and alteration of itself execution) and *reification* (makes implementation information available to the application).

# Reflection

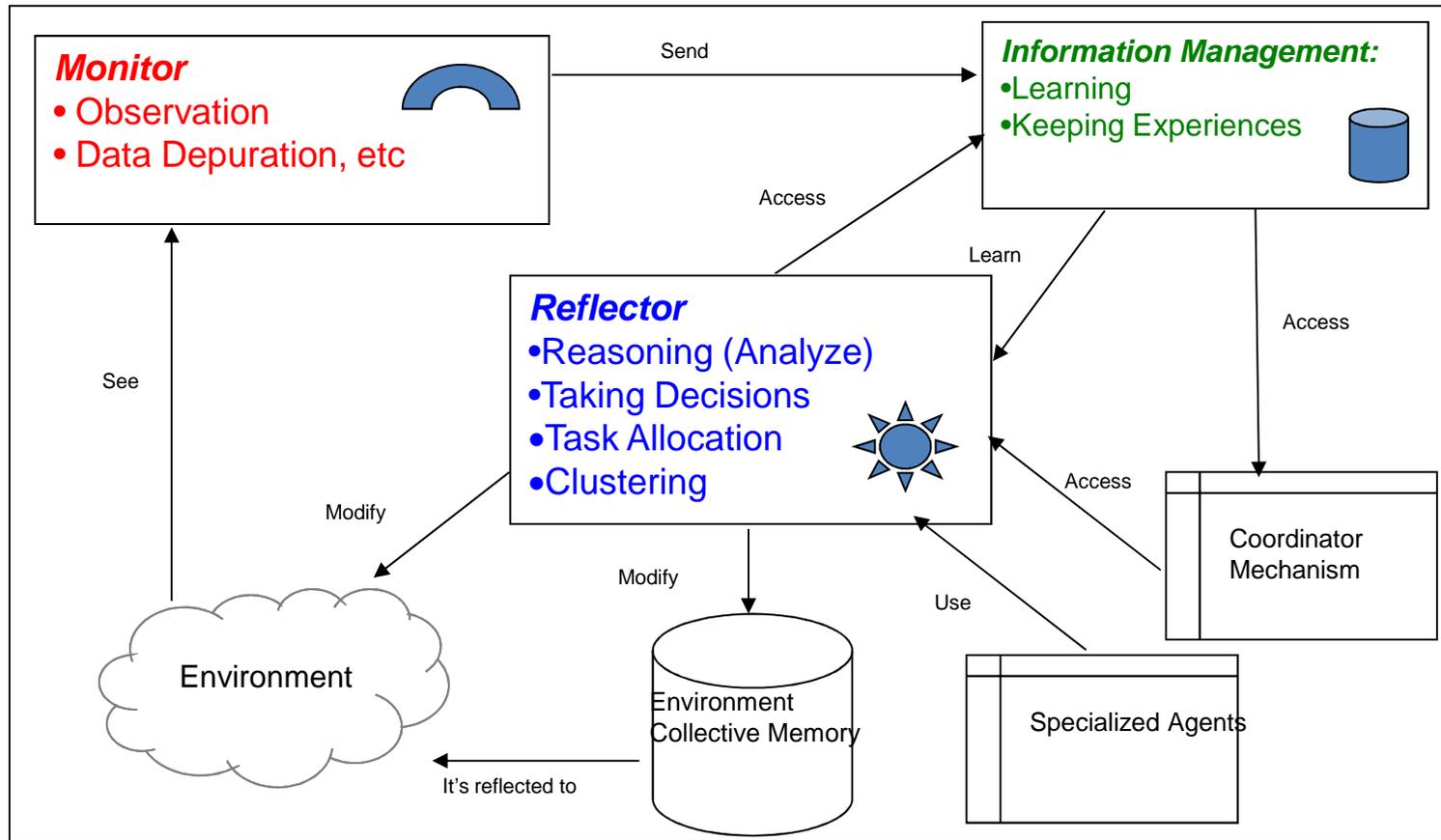


# “Collective Reflective Middleware”

- Use of Artificial Collective Intelligence.
- They are inspired in component models.
- They have reflective layers oriented to generate collective introspection (state observation).
- Collective intercession (Model 1).
- Individual intercession (behavior and alteration of itself execution or meaning) is based on collective introspection (Model 2).
- Each software component exists inside a collective.
- Collective goals.
- There is a knowledge base that store present and historic information.

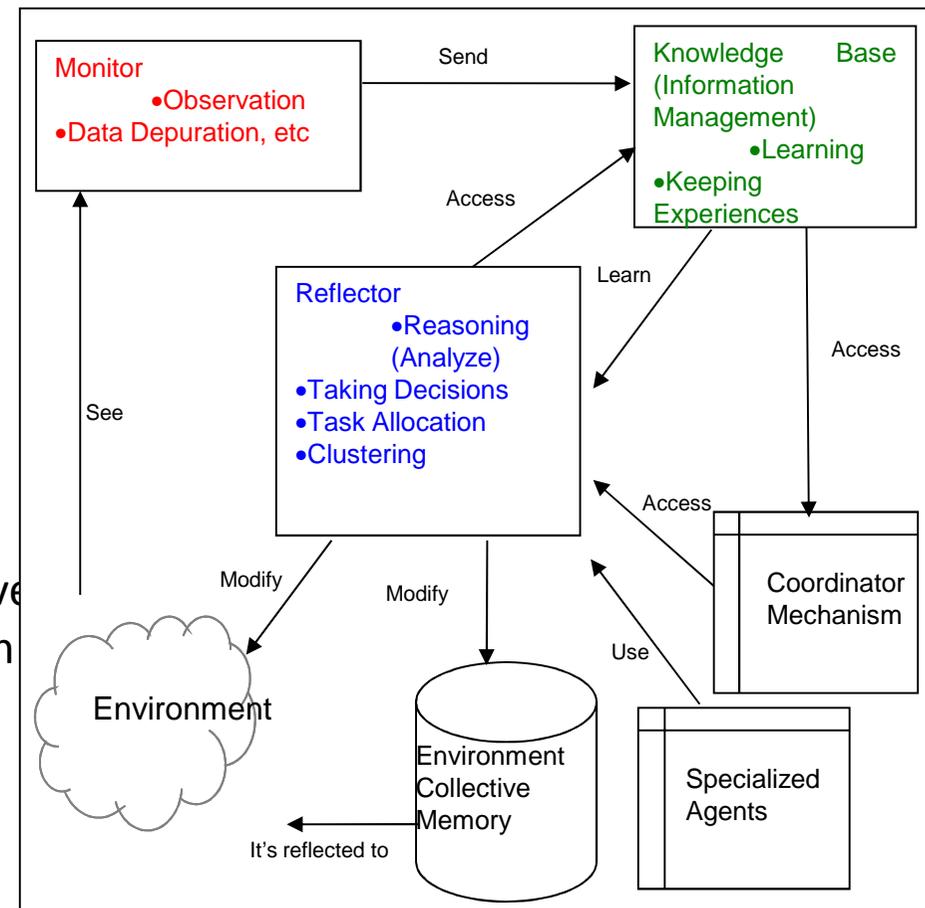


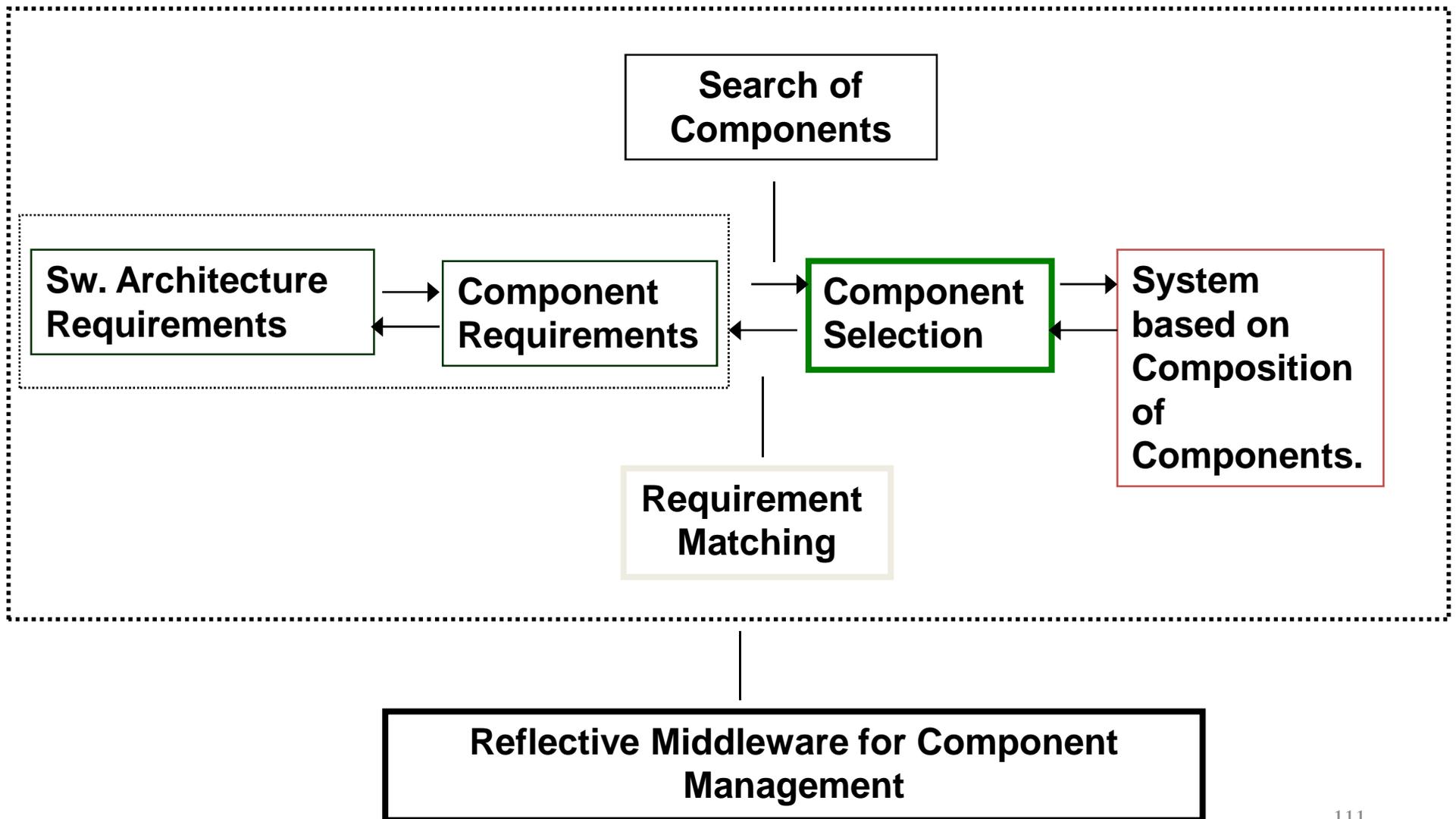
# “Collective Reflective Middleware”



# Macro Algorithm (Middleware Behavior):

- *Constraints: A set of applications or software components (collective) is supposed to be loaded.*
- Monitor gets information from the collective environment.
- Monitor pre-process information.
- Information is sent to Reflector and to the Information Manager.
- Reflector takes a decision based on previous phase and Information Manager.
- Reflector makes changes in the collective
- Information Manager keeps information about collective performance permanently.
- Information Manager learns from the result of each decision taken



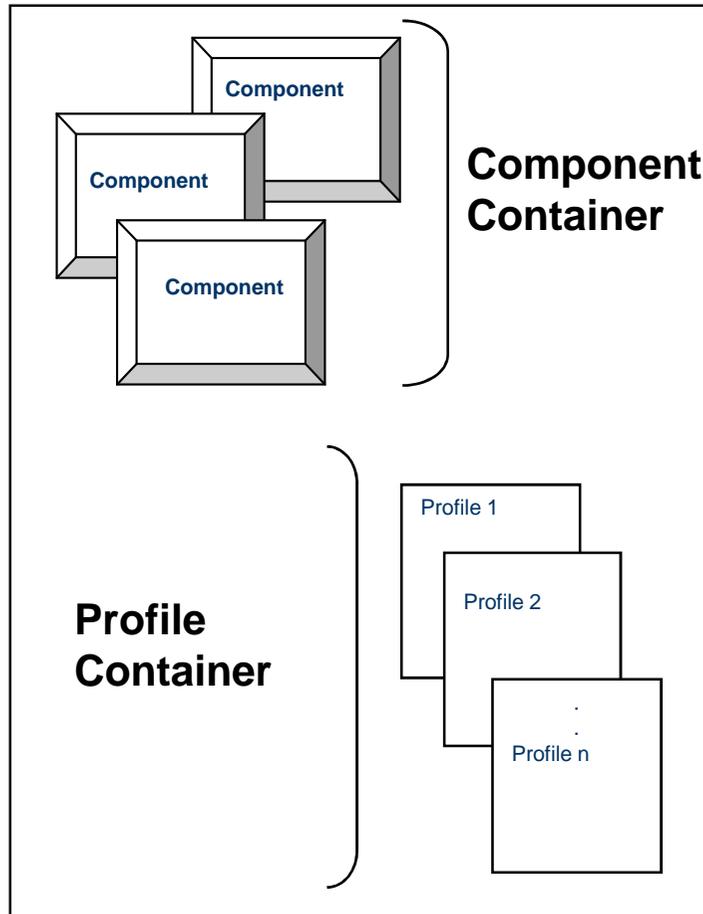


# *Component Selection Algorithm*

This Selection Algorithm is inspired in a collective behavior, the following premises are needed:

- Each component must have a profile associated with its own characteristics. (.xml)
- The end user must give the initial requirements.
- The selection program should be able to update the component profile (its pheromone).
- Selection is based on a probabilistic method.

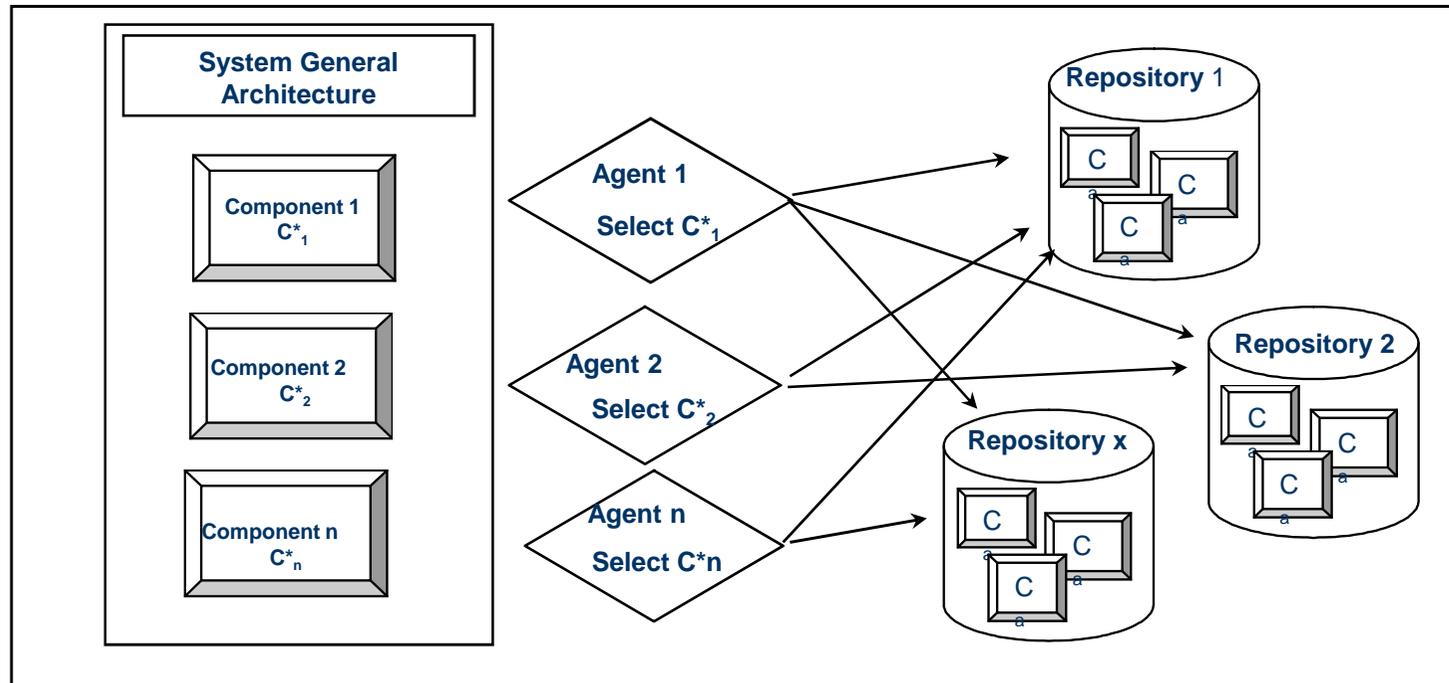
# Component Selection Algorithm



```
<componentStaticInformation>
  <componentInformation>
    <uniqueID>SCAM2001</uniqueID>
    <name>Scriptable Application Manager</name>
  </componentStaticInformation>
  <profile1>
    <componentDynamicInformation>
      <pheromone>0.1</pheromone>
      <os>windows</os>
      <ms>3k</ms>
      <et>0.01</et>
    </componentDynamicInformation>
  </profile1>
  <profile2>
    <componentDynamicInformation>
      <pheromone>0.5</pheromone>
      <os>fedora</os>
      <ms>1k</ms>
      <et>0.05</et>
    </componentDynamicInformation>
  </profile2>
```

# Component Selection Algorithm

Model A



Algorithm A

1. Create  $K$  agents, one for each component to select.
2. For  $i = 1$  to  $K$ 
  - 2.1. Identify possible group of  $C$  components to select using (1)
  - 2.2. Selection of component  $i$  using (2)
3. Analyze Performance ( $R$ ) using (4)
4. Update Pheromone using (5) for each component profile of group  $C$ .

# Component Selection Algorithm

## Matching (Equation 1):

$$X_{l_j u k} = 1 + H_k - N_{l_j u k}$$

X -> Component Matching

H -> Ideal Component Characteristics

N -> Real Characteristics

j: Component, l: Repository, u: Profile, k: Agent.

## Selection Probability (Equation 2):

$$P_{l_j u}^k(t) = \frac{[Y_{l_j u}(t)] [X_{l_j u}^k]^{-1}}{\sum_{rsn} [Y_{rsn}(t)] [X_{rsn}^k]^{-1}}$$

# Component Selection Algorithm

Pheromone Update (equation 5)

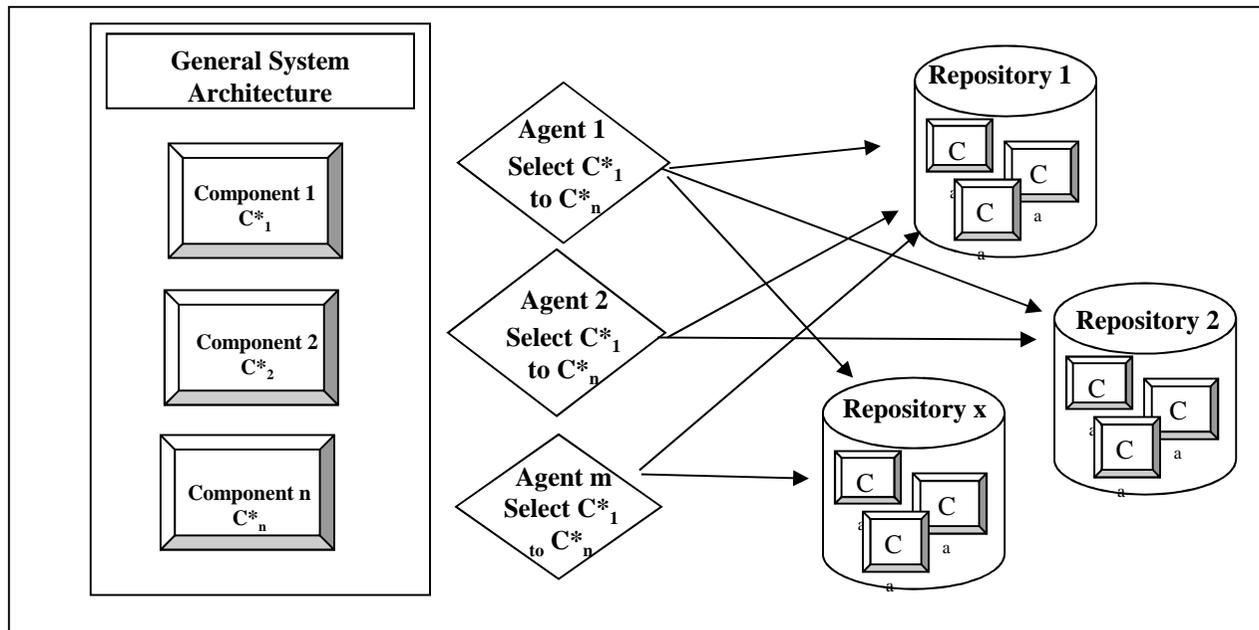
$$Y_{lju}(t) \begin{cases} (1 - \alpha) * Y_{lju}(t) + \Delta Y_{lju}^k(t) & \text{If the component } jlu \text{ is chosen} \\ (1 - \alpha) * Y_{lju}(t) & \text{Otherwise} \end{cases}$$

Where  $R$  and  $\Delta Y_{lju}^k(t)$  are:

$$R = f(ET, M) \quad (4)$$

$$\Delta Y_{lju}^k(t) = (X_{lju}^k * R)^{-1}$$

# Selection Algorithm



## Algorithm B:

Repeat until  $\mathbf{K}$  ( $\mathbf{K}$  is the total number of components)  
Select component  $i$  using Eq. 12  
Each agent make a selection of all the components.  
Each agent analyzes performance of each composed component ( $R_k$ )  
Update Pheromone Eq. 5. for each component profile.

# razonamiento inductivo del ser humano

- Razonamiento deductivo sólo es posible cuando el problema a resolver parte de premisas completas y consistentes
- El juego del “gato” se puede resolver deductivamente, no así las “damas” y mucho menos el “ajedrez”
- El razonamiento humano tiene un componente deductivo y otro inductivo. Una vez reconocido un patrón se formulan modelos mentales (o hipótesis) cuya validez se rectifica con los resultados observados
- El aprendizaje es co-evolutivo: expectativas sobre expectativas, y retroalimentación entre resultados económicos y expectativas.
- Bajo expectativas racionales, la complejidad se elimina por default al suponer que las expectativas coinciden con el comportamiento de equilibrio.
- El viajar en el Metro se puede hacer mediante análisis deductivos o inductivos, el primer mecanismo no es factible cuando se desconoce información importante: e.g. tiempo de espera en las conexiones

# \* ¿Los seres humanos somos realmente deductivos?

- Ejemplo 1: Si un bat y una pelota de beisbol cuestan en conjunto \$1.10 y el bat tiene un costo de \$1 por encima del costo de la pelota ¿cuál es el costo de la pelota?
- Respuesta frecuente: \$0.10 (¡efecto visual!)
- Respuesta correcta \$0.05
- Ejemplo 2: Elegir un número entre 0 y 100, el ganador es el que selecciona número =  $2/3$  partes del promedio
- Si los demás eligen aleatoriamente con una Uniforme: promedio es 50 y propuesta 33; pero si los demás piensan lo mismo promedio es 33 y propuesta es 22, y así sucesivamente.
- Propuesta racional:  $0 = 2/3 (0)$
- Resultados observados: para la mayoría el proceso recursivo se detiene en 33 o en 22. En promedio se elige 18.9 por lo que el ganador es el que seleccionó el 13. Paradójico: los actores racionales siempre pierden.