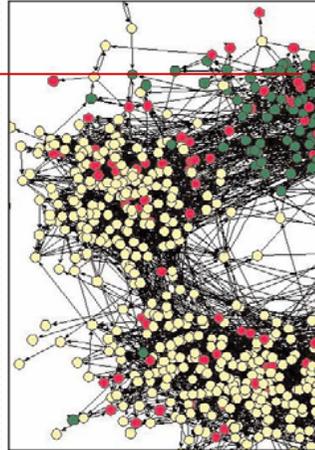


Redes complejas de computación y sistemas sociales artificiales

Manuel G. Bedia
Universidad Carlos III
mgbedia@inf.uc3m.es



Madrid, 22 Nov 2006

Objetivos

- De qué modo se asocian comportamientos individuales para dar lugar a un comportamiento colectivo
 - las redes no son estructuras puras con propiedades estáticas
 - Son el resultado de la coevolución de agentes y sus relaciones
 - Ejemplo: jogging
-

Empezamos...

- "Estoy convencido que los países que dominen la nueva ciencia de los sistemas no lineales se convertirán en potencias económicas en el próximo siglo" (Heinz Pagels, Univ. Rockefeller)

 - "Los sistemas dinámicos no-lineales son la idea más trascendental para la humanidad desde Jesucristo" (Greg Bateson)
-

Algunas ideas confusas

- Los sistemas sencillos se comportan de forma sencilla (los comportamientos complejos obedecen a causas complejas)
→ **dinámica no-lineal**

 - Sistemas distintos se comportan de manera distinta (todas las variables locales son necesarias)
→ **Reduccionismo vs. Emergentismo**
-

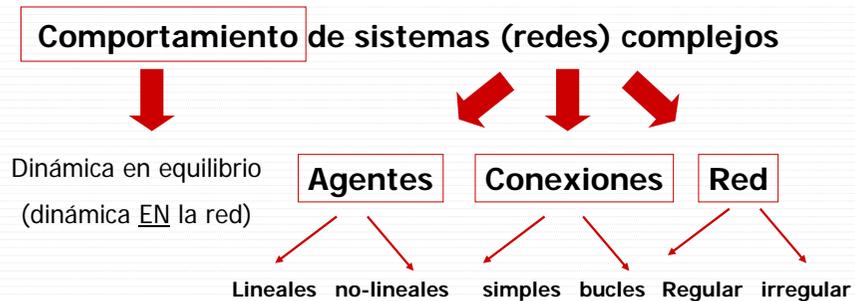
En sociedades humanas ...

- El comportamiento complejo es producto de interacciones no lineales
→ **dinámica no-lineal**
- El comportamiento global no es reducible al comportamiento típico (o promedio) de un agente
→ **Reduccionismo vs. Emergentismo**

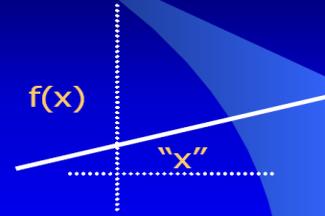
Índice

- ¿Cuál es el comportamiento de las sociedades humanas?
 - Sistemas dinámicos no-lineales
 - Propiedades de nivel (o emergentes)
- No linealidad debida a los agentes
 - Sistema WLC: transformación de inputs estáticos en memoria espacio-temporal
- No linealidad debida a la red
 - Modelos "mundo pequeño" y "libre de escala"
 - Robustez y alta conectividad

Esquema: dónde estamos

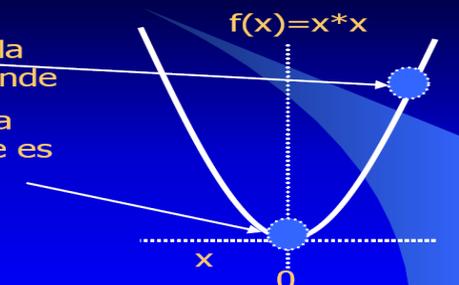


$f(x)$ es "lineal" cuando para todo los valores de "x" la función "f" no cambia



No lineal

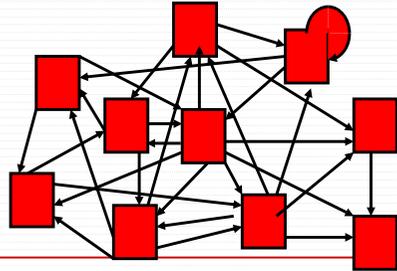
- para x grandes la pendiente es grande
- para x cercano a cero la pendiente es cercana a cero;



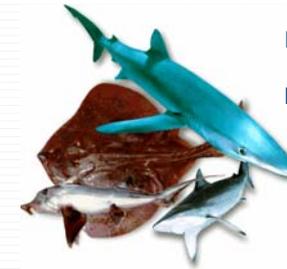
Algunas ideas sobre SDNL

–Conjunto de partes operativamente interrelacionadas, en el que unas actúan sobre otras, y del que interesa considerar fundamentalmente su comportamiento global.

–EL CONJUNTO TIENE PROPIEDADES QUE NO PUEDEN CONSIDERARSE POR LA SIMPLE SUMA DE SUS ELEMENTOS



Algunas ideas sobre SDNL



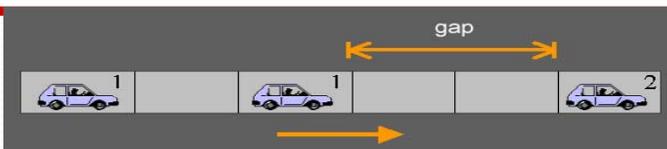
Norte del Mar Adriático

Menos presas que antes de dejar de faenar

Sistema dinámico entre aerodinámica y agarre



Algunas ideas sobre SDNL



Para n-ésimo vehículo:

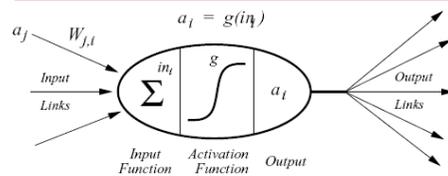
Atascos de tráfico: Modelo de Nagel-Schreckenberg (1992)

- Paso 1: Aceleración
Si $[V_n < V_{max}] \rightarrow [V_n \leftarrow \min(V_n + 1, V_{max})]$
- Paso 2: Distancia segura
Si $[d_n \leq V_n] \rightarrow [V_n \leftarrow \min(V_n, d_n - 1)]$
- Paso 3: Aleatoriedad
Con probabilidad $p = cte.$ $[V_n \leftarrow \max(V_n - 1, 0)]$
- Paso 4: Actualización
 $X_n \leftarrow [X_n + V_n]$

Índice

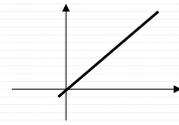
- ¿Cuál es el comportamiento de las sociedades humanas?
 - Sistemas dinámicos no-lineales
 - Propiedades de nivel (o emergentes)
- No linealidad debida a los agentes
 - Sistema WLC: transformación de inputs estáticos en memoria espacio-temporal
- No linealidad debida a la red
 - Modelos “mundo pequeño” y “libre de escala”
 - Robustez y alta conectividad

Caso 0: Linealidad, links simples y red regular



$$a_i = g\left(\sum_j W_{j,i} a_j\right)$$

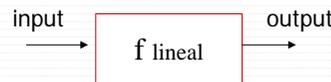
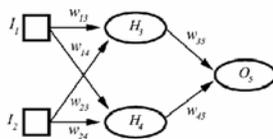
□ Función activación lineal



□ Conexiones simples

□ Red regular

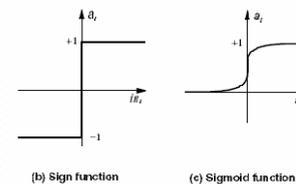
□ Representa una función lineal



Caso 1: No-linealidad, links simples y red regular

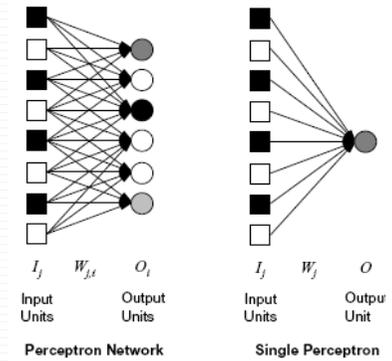
□ Función activación no-lineal

□ Representa una función no-lineal

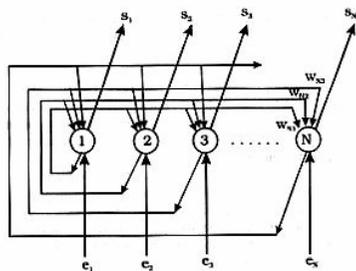


□ Conexiones simples

□ Red regular



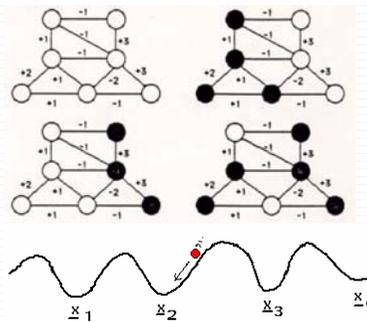
Caso 2: No-linealidad, bucles y red regular



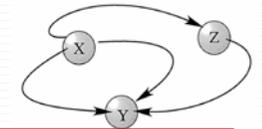
□ Redes recurrentes



□ Hopfield: Memorias asociativas



Críticas



□ Enfoque conexionista (desacoplado) vs. Perspectiva integrada

- se observan fenómenos que sólo pueden ser entendidos en términos de conceptos como "organización por interacción" o "emergencia".

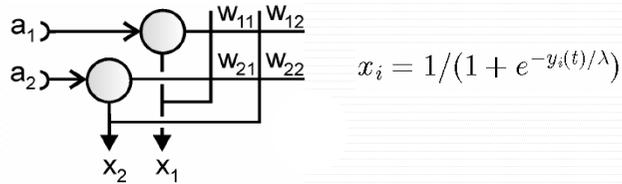
□ Procesamiento dinámico

- Un estímulo (mensaje) es distribuido en el espacio (a lo largo de la red de neuronas) y en el tiempo (a lo largo de su dinámica).
- El procesamiento consiste en la formación de clusters (correlación) (y la de-clusterización) continuada.

Sistema dinámico ↔ Red recurrente

Red recurrente 2-neuronas

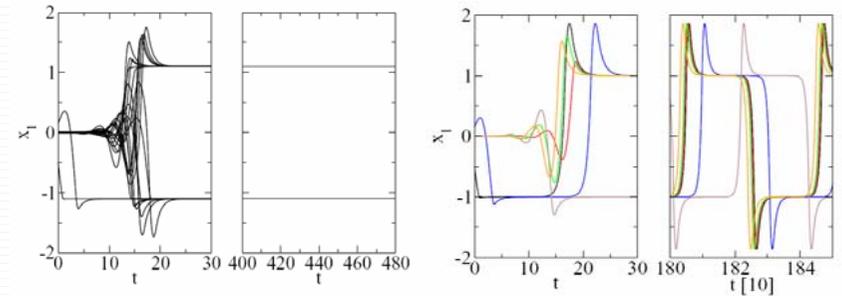
$$\begin{cases} y_1(t+1) = ky_1(t) + \omega_{11}x_1(y_1(t)) + \omega_{12}x_2(y_2(t)) + a_1 \\ y_2(t+1) = ky_2(t) + \omega_{21}x_1(y_1(t)) + \omega_{22}x_2(y_2(t)) + a_2 \end{cases}$$



Valores

$$\begin{aligned} \lambda &= 0.005 & \omega_{12} &= 0.02 & \omega_{21} &= 0.01 \\ a_1 &= 0.8 & a_2 &= 0.2 & k &= 0.5 \end{aligned}$$

Sistema dinámico ↔ Red recurrente



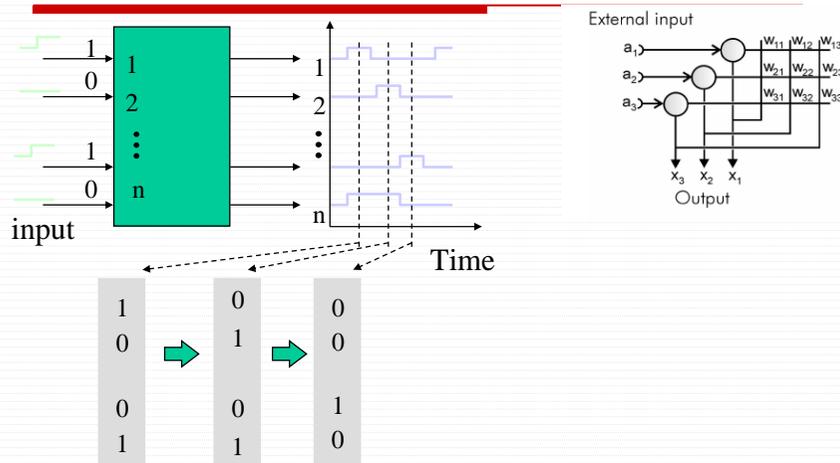
Solución "punto fijo"

$$\bullet > 0.01586$$

Solución "ciclo límite"

$$\bullet < 0.01586$$

Codificación espacio-temporal (N>3)



Transformación de un input espacial en un output espacio-temporal

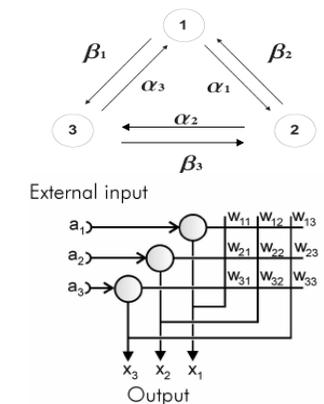
Winnerless competition (Lotka-Volterra model)

$$\begin{aligned} \dot{a}_1 &= a_1[1 - a_1 - \alpha a_2 - \beta a_3] \\ \dot{a}_2 &= a_2[1 - a_1 - \beta a_2 - \alpha a_3] \\ \dot{a}_3 &= a_3[1 - \alpha a_1 - \beta a_2 - a_3] \end{aligned}$$

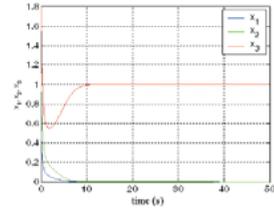
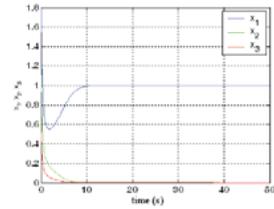
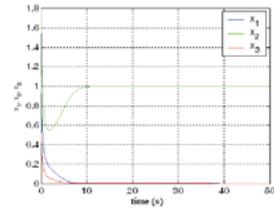
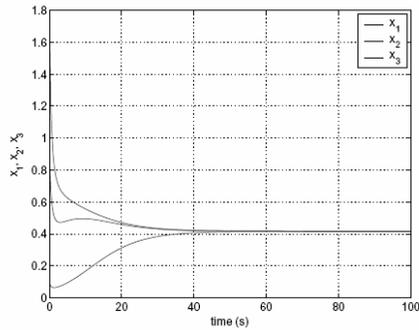
$$\begin{pmatrix} 1 & \alpha & \beta \\ \beta & 1 & \alpha \\ \alpha & \beta & 1 \end{pmatrix}$$

if $\alpha < 1, \beta > 1$

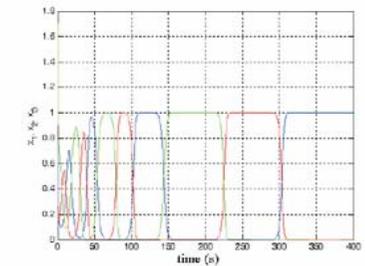
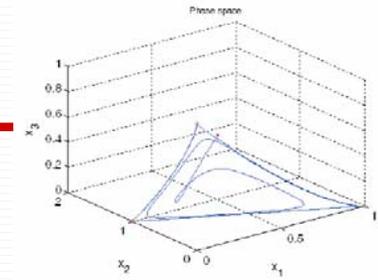
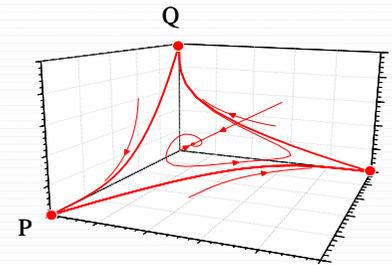
WLC dynamics is guaranteed



Comportamiento clásico



Comportamiento WLC



Propiedades WLC

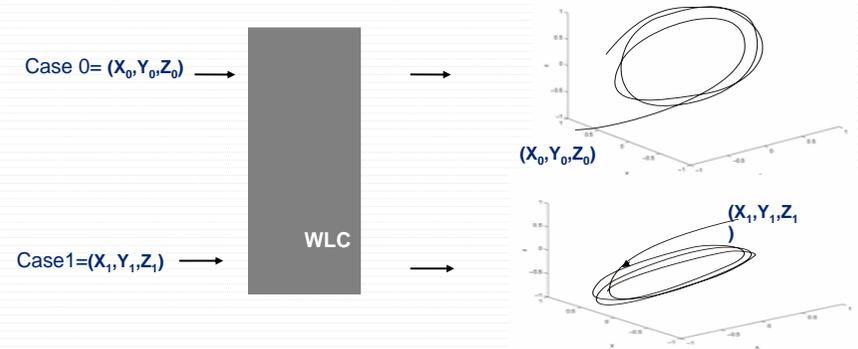
□ Memoria

- Hopfield: $m < 0.14N$ (lineal).
- WLC : $m \sim (N-1)!$ (factorial)

□ Sensibilidad a estímulos

□ Robustez (capacidad de generalización)

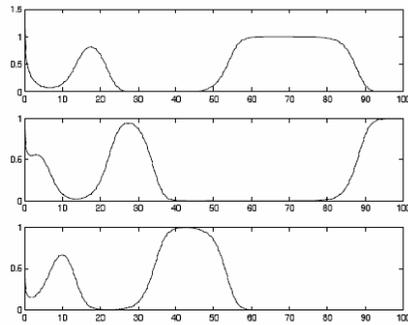
Sensibilidad



WLC produce una ÚNICA SECUENCIA espacio-temporal codificada en forma de trayectoria moviéndose a lo largo de heteroclinas que conectan equilibrios inestables

Sensibilidad

El comportamiento global es un pseudo-ciclo no periódico



$$\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma$$

$$\alpha = 0.2$$

$$\beta = 2.3$$

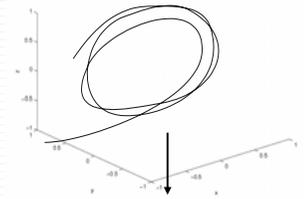
$$\gamma = \alpha + \beta - 2 = 0.5$$

Robustez

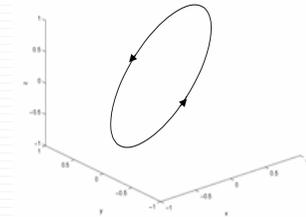
$$\dot{a}_1 = a_1[1 - a_1 - \alpha a_2 - \beta a_3] + \epsilon a_1$$

$$\dot{a}_2 = a_2[1 - a_1 - \beta a_2 - \alpha a_3] + \epsilon a_2$$

$$\dot{a}_3 = a_3[1 - \alpha a_1 - \beta a_2 - a_3] + \epsilon a_3$$



Un sistema WLC es robusto en el siguiente sentido: la secuencia perturbada permanece en un entorno cercano a la secuencia no perturbada

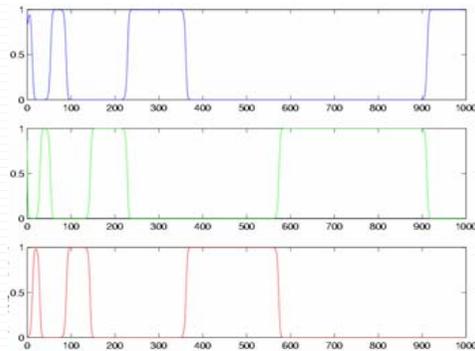


Robustez

$$\alpha = 0.5 \quad X(0)=0.6$$

$$\beta = 1.8 \quad Y(0)=0.6$$

$$z(0)=0.1$$

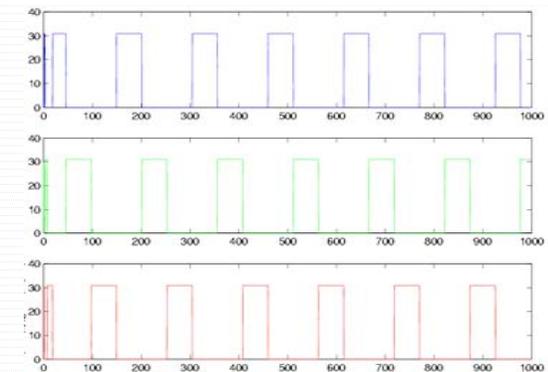


Robustez

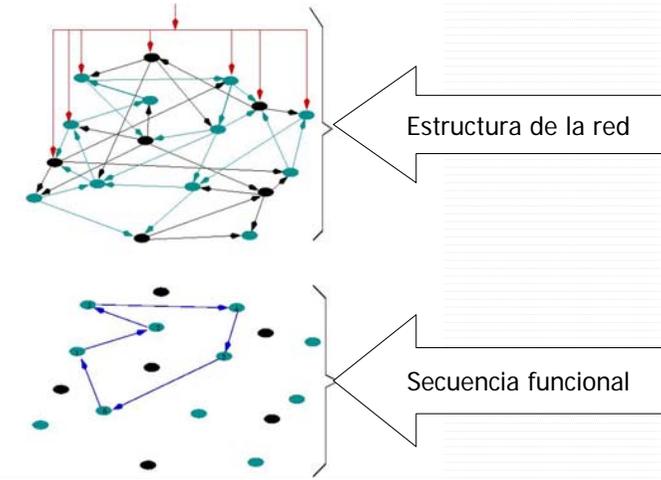
$$\alpha = 0.5 \quad X(0)=0.6$$

$$\beta = 1.8 \quad Y(0)=0.6$$

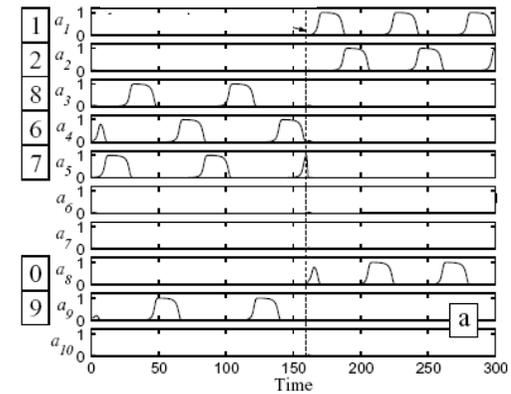
$$\epsilon = 0.03 \quad z(0)=0.1$$



Comportamiento WLC



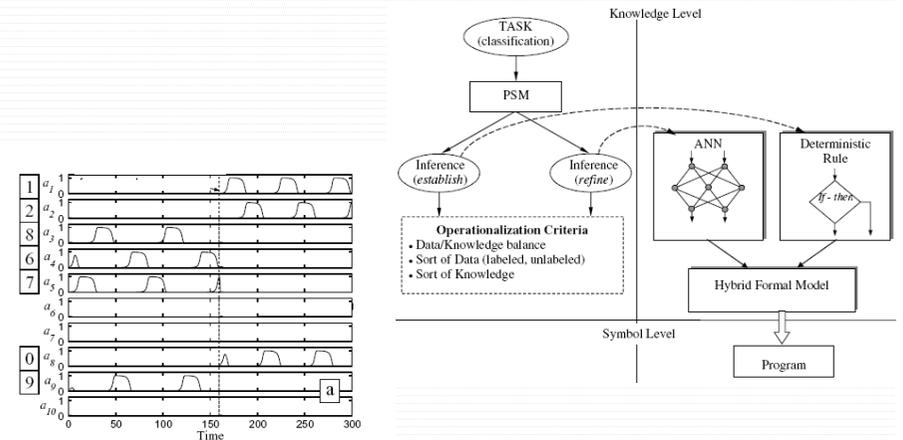
Comportamiento WLC



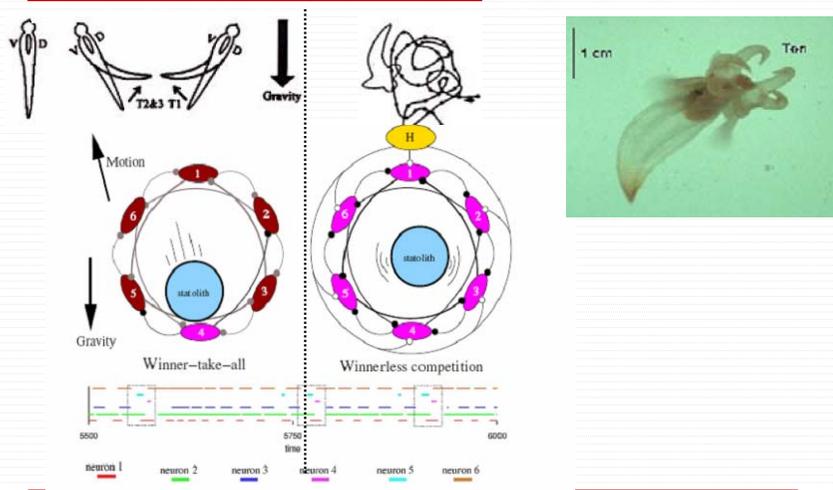
Aplicación a la criptografía

WLC	Criptografía	Descripción
Ergodicidad	Confusión	Todo output tiene la misma distribución para cada input
Sensitividad a las condiciones iniciales	Difusión si se producen pequeños cambios en la clave secreta	Pequeñas desviaciones en los inputs pueden provocar cambios drásticos en los outputs
Dinámica determinista	Determinismo pseudo-random	Un proceso determinista puede provocar comportamiento tipo random
Estructura compleja	Complejidad del algoritmo (ataques complejos)	Procesos simples tienen alta complejidad

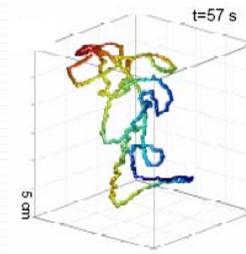
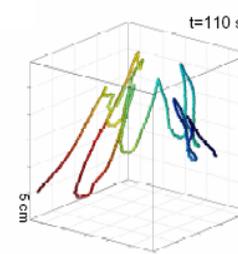
Sistemas híbridos



Sistemas biológicos: *Clione* cazador



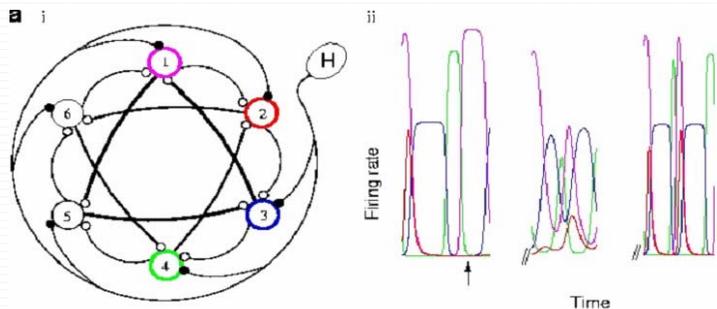
Sistemas biológicos: *Clione* cazador



- Desplazamiento (RNN caso 1)

- Búsqueda (RNN caso 3)

Sistemas biológicos: *Clione* cazador



- WLC: escanea el espacio en busca de presa

Sistemas biológicos: *Clione* cazador

¿Por qué la evolución habría de seleccionar mecanismos no lineales como la base de los patrones de comportamiento de los organismos vivos?

- **capacidad de codificación**

espacio de codificación en forma de clusters (estructura espacio-temporal) que permiten el almacenamiento y la recuperación.

- **patrones adaptativos**

La inestabilidad inherente a los movimientos no-lineales facilita la habilidad de los sistemas para la rápida adaptación (pasando de un patrón a otro si el entorno es alterado).

- **Reconocimiento de estímulos y categorización**

los sistemas neuronales pueden ser sensibles y robustos a las perturbaciones al mismo tiempo

Conclusiones: WLC

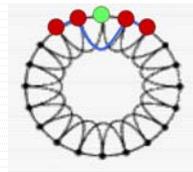
- ❑ **la computación se produce a nivel colectivo**
 - la información no se codifica en los pesos
 - La información se codifica en la dinámica de la red
 - ❑ **Propiedades emergentes**
-

Índice

- ❑ **¿Cuál es el comportamiento de las sociedades humanas?**
 - Sistemas dinámicos no-lineales
 - Propiedades de nivel (o emergentes)
 - ❑ **No linealidad debida a los agentes**
 - Sistema WLC: transformación de inputs estáticos en memoria espacio-temporal
 - ❑ **No linealidad debida a la red**
 - Modelos “mundo pequeño” y “libre de escala”
 - Robustez y alta conectividad
-

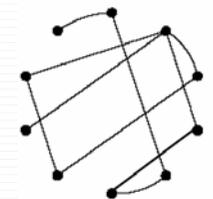
Redes regulares

- ❑ **Número de nodos**
 - $N=20$
- ❑ **Distancia promedio**
 - $\ell = \frac{4 \times 1 + 4 \times 2 + 4 \times 3 + 4 \times 4 + 3 \times 5}{19} = \frac{55}{19} = 2.89$
- ❑ **Coficiente de clustering**
 - $C = \frac{3}{6} = 0.5$ $C = \frac{3}{6} = 0.5$

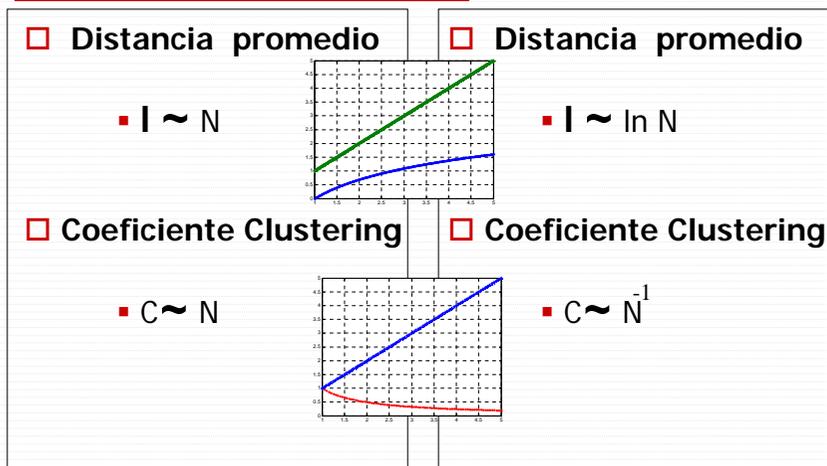


Redes aleatorias

- ❑ **Número de nodos**
 - $N = 10$
- ❑ **Distancia promedio**
 - $l = 3.04$
- ❑ **Coficiente de clustering**
 - $C = 0.02$



Redes regulares vs. Redes aleatorias



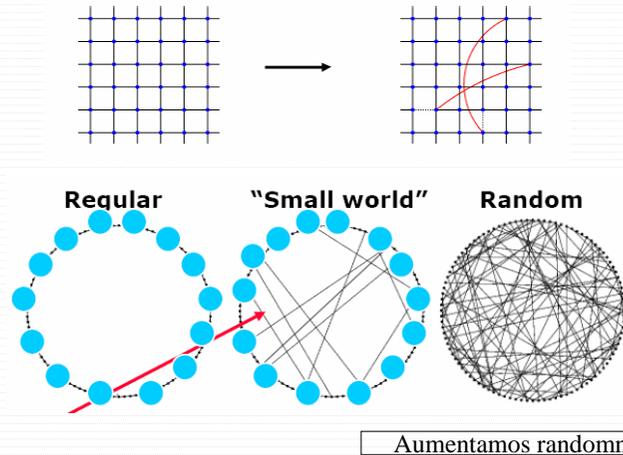
Redes complejas de computación

Table 1 Empirical examples of small-world networks

	L_{actual}	L_{random}	C_{actual}	C_{random}
Film actors	3.65	2.99	0.79	0.00027
Power grid	18.7	12.4	0.080	0.005
<i>C. elegans</i>	2.65	2.25	0.28	0.05

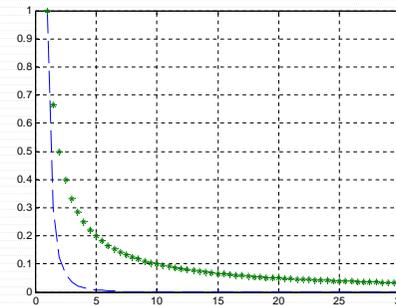
Characteristic path length L and clustering coefficient C for three real networks, compared to random graphs with the same number of vertices (n) and average number of edges per vertex (k). (Actors: $n = 225,226, k = 61$. Power grid: $n = 4,941, k = 2.67$. *C. elegans*: $n = 282, k = 14$.) The graphs are defined as follows. Two actors are joined by an edge if they have acted in a film together. We restrict attention to the giant connected component¹⁶ of this graph, which includes ~90% of all actors listed in the Internet Movie Database (available at <http://us.imdb.com>), as of April 1997. For the power grid, vertices represent generators, transformers and substations, and edges represent high-voltage transmission lines between them. For *C. elegans*, an edge joins two neurons if they are connected by either a synapse or a gap junction. We treat all edges as undirected and unweighted, and all vertices as identical, recognizing that these are crude approximations. All three networks show the small-world phenomenon: $L \geq L_{random}$ but $C \gg C_{random}$.

Redes de "mundo pequeño"



Coef C y L en redes de "mundo pequeño"

- L disminuye**
 - en pocos pasos se reduce drásticamente la L a la mitad
- C disminuye más lentamente**



Redes de "mundo pequeño"

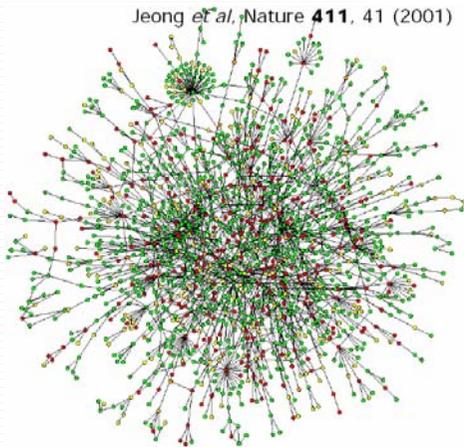
- **Coefficiente de Clustering: $C(k)$**
 - how many of your links are also mutually linked
 - **Average shortest distance: L**
 - shortest distance between any two nodes
 - **Degree distribution: $P(k) \sim \text{gaussiana}$**
 - how many links each node have
-

Topología de "mundos pequeños"

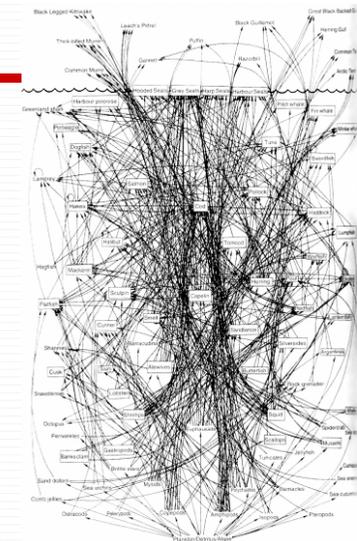
- **Altamente clusterizados y con caminos promedios pequeños (conectividad alta)**
 - Difusión de rumores, epidemias, opinión
 - Comunicación en organizaciones
-

Redes biológicas: genes, proteínas...

Jeong *et al.*, Nature **411**, 41 (2001)



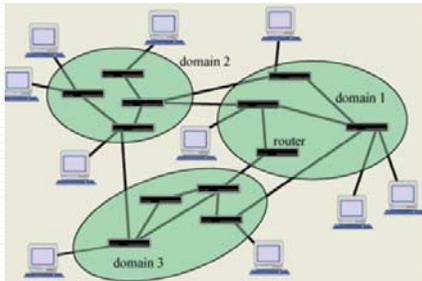
Redes tróficas



Redes de comunicación

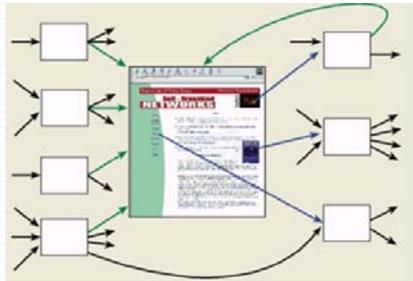
Internet

Nodes: computers, routers, ...
Links: physical connections



WWW

Nodes: web pages
Links: links



Medimos (I): Diámetro de la WWW

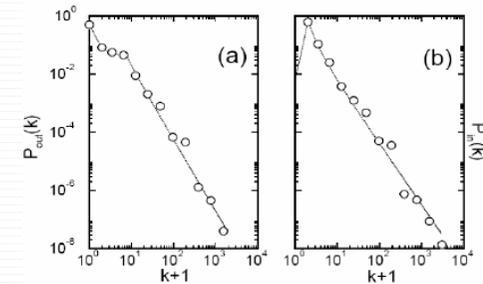


FIG. 1. The distribution of (a) outgoing links (URLs found on an HTML document) and (b) incoming links (URLs pointing to a certain HTML document). The data were obtained from the complete map of the *nd.edu* domain, that contains 325,729 documents and 1,469,680 links. The dotted lines in (a) and (b) represent the analytical fits we used as input distributions in constructing the topological model of the www, the tail of the distributions following $P(k) \sim k^{-\gamma}$.

Medimos (II): Promiscuidad sexual

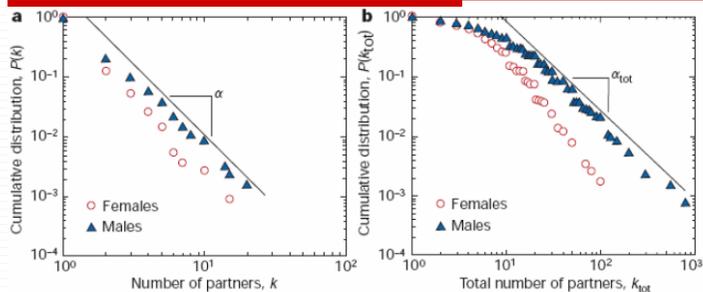
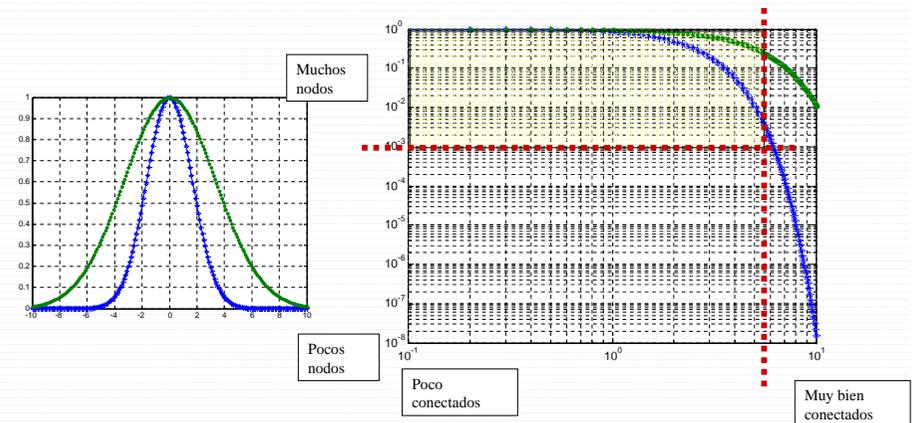
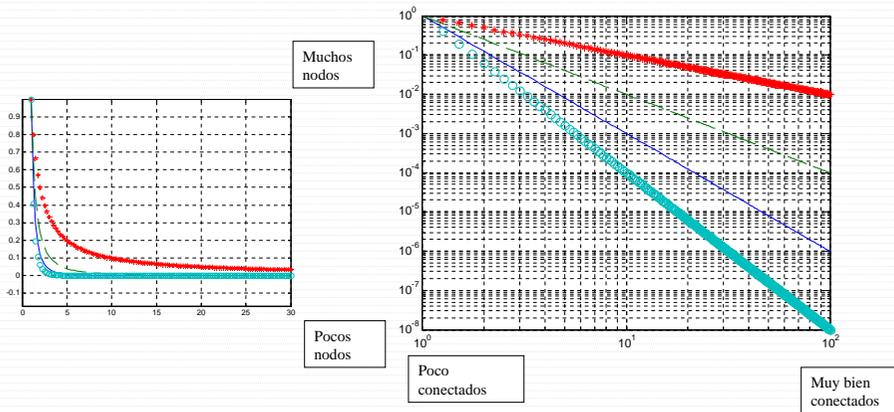


Figure 2 Scale-free distribution of the number of sexual partners for females and males. **a**, Distribution of number of partners, k , in the previous 12 months. Note the larger average number of partners for male respondents: this difference may be due to 'measurement bias' — social expectations may lead males to inflate their reported number of sexual partners. Note that the distributions are both linear, indicating scale-free power-law behaviour. Moreover, the two curves are roughly parallel, indicating similar scaling exponents. For females, $\alpha = 2.54 \pm 0.2$ in the range $k > 4$, and for males, $\alpha = 2.31 \pm 0.2$ in the range $k > 5$. **b**, Distribution of the total number of partners k_{tot} over respondents' entire lifetimes. For females, $\alpha_{tot} = 2.1 \pm 0.3$ in the range $k_{tot} > 20$, and for males, $\alpha_{tot} = 1.6 \pm 0.3$ in the range $20 < k_{tot} < 400$. Estimates for females and males agree within statistical uncertainty.

Redes de mundo pequeño: redes "de escala"



Redes reales: redes "sin escala"



Redes "de escala" vs. Redes "sin escala"

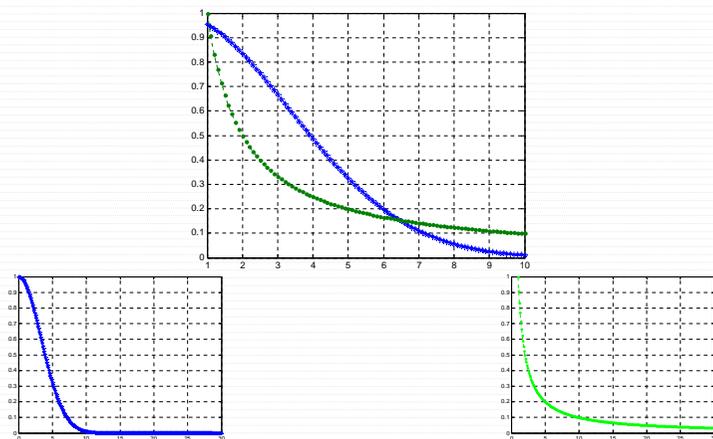
Redes "mundo pequeño"

- existe un estereotipo, un promedio (todos se relacionan con la misma fracción de agentes)
- Ej. Distribución de pesos

Redes "sin escala"

- no existe un caso típico, hay acontecimientos extremos
- Ej. Pocos tienen mucho y muchos tienen poco

Redes "de escala" vs. Redes "sin escala"



Modelo constructivo de redes "sin escala"

Redes "mundo pequeño"

- las conexiones entre nodos surgen de forma independiente de las conexiones de otros nodos

Redes "sin escala"

- la probabilidad de conectarse a un nodo es directamente proporcional al grado de conexiones actuales

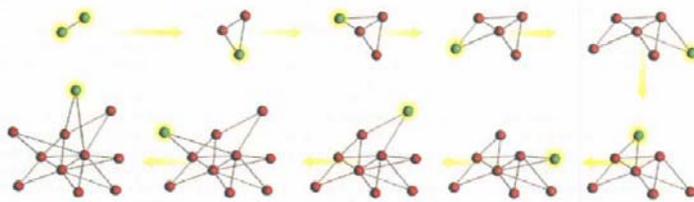
Modelo constructivo de redes "sin escala"

Redes "mundo pequeño"



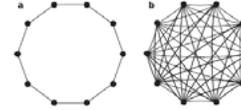
Redes "sin escala"

A SCALE-FREE NETWORK grows incrementally from two to 11 nodes in this example. When deciding where to establish a link, a new node (green) prefers to attach to an existing node (red) that already has many other connections. These two basic mechanisms—growth and preferential attachment—will eventually lead to the system's being dominated by hubs, nodes having an enormous number of links.

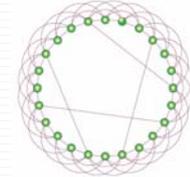


Redes "sin escala"

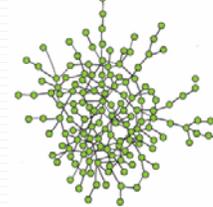
regulares



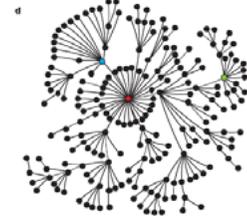
mundo pequeño



Aleatorias



Sin escala



Redes "sin escala"

Coeficiente de Clustering: $C(k)$

- how many of your links are also mutually linked

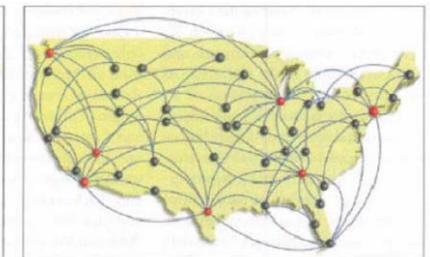
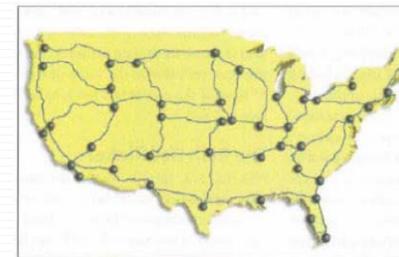
Average shortest distance: L

- shortest distance between any two nodes

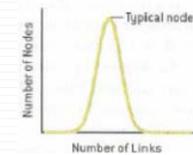
Degree distribution: $P(k) \sim \text{potencial}$

- how many links each node have

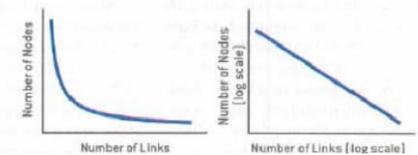
Redes "mundo pequeño" vs. Redes "sin escala"



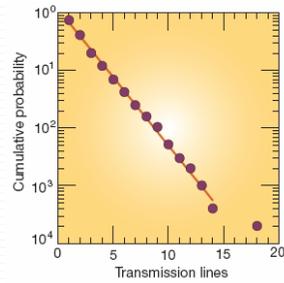
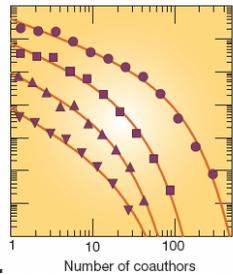
Bell Curve Distribution of Node Linkages



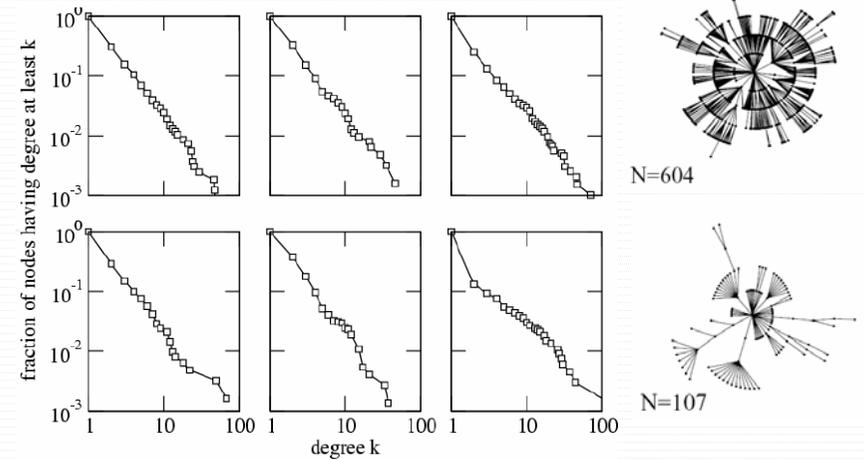
Power Law Distribution of Node Linkages



Redes mundo pequeño vs sin escala



Medimos (III): Árboles de directorios



Topología de “mundos pequeños”

□ Altamente clusterizados y con caminos promedios pequeños (conectividad alta)

□ Robustez frente a fallos

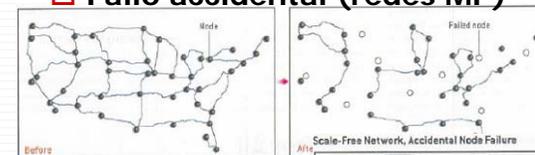
-se mide por el efecto que cada nodo desconectado tiene en la funcionalidad de la red

- Dado que los hubs son escasos, la probabilidad de fallar es menor

-En las redes MP, todos los nodos son iguales de importantes

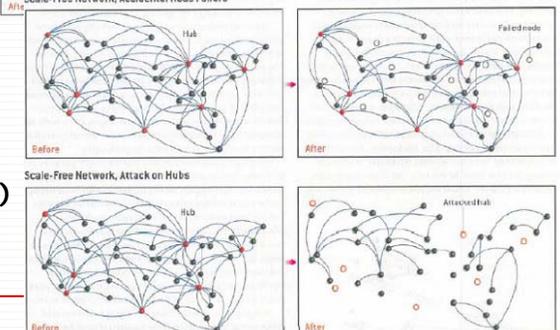
Robustez frente a fallos y ataques en redes “sin escala” vs “mundo pequeño”

□ Fallo accidental (redes MP)



□ Fallo accidental

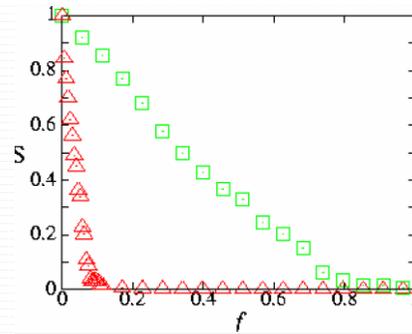
y ataques (redes SE)



Robustez frente a fallos y ataques en redes "sin escala"

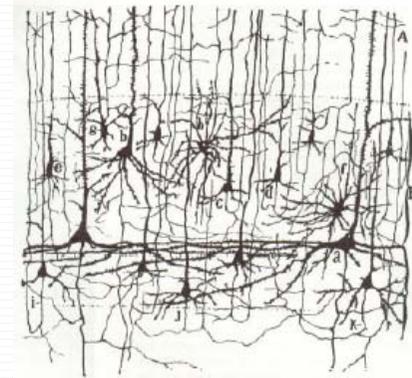
- **S (size)**: Tamaño de la componente mayor
- **f (fraction)**: Fracción de nodos incommunicados

- Internet
 - verde: fallo
 - rojo: ataque



Redes "sin escala"...

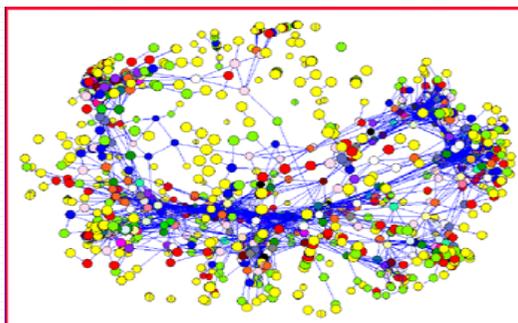
...y el cerebro"...



fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging

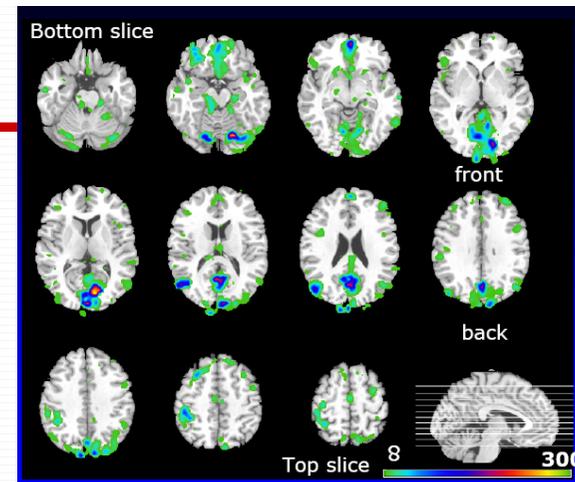
Redes cerebrales "in vivo"

Tarea: finger tapping



□ Colores indican grados de conexión:

- Amarillo → 1
- Verde → 2
- Rojo → 3
- Azul → 4



□ **Hubs**:

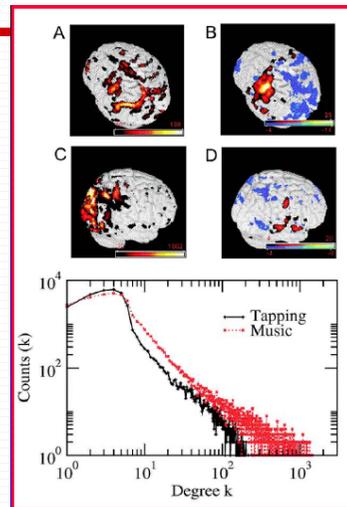
- Los colores indican el número de conexiones en cada zona

Cerebro

□ Diferentes tareas

□ Diferentes redes

□ Similar activación



□ Clusters → Agrupamiento → redundancia

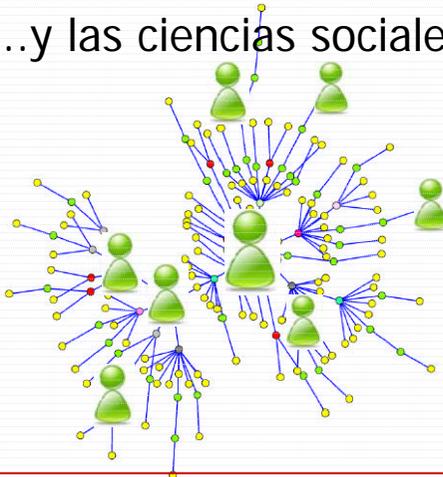
- Varias formas de hacer lo mismo
- Coherencia espacial → módulos y funciones

□ Alta conectividad

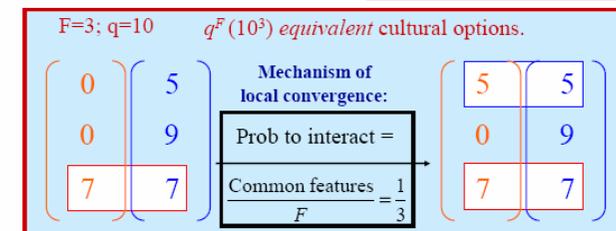
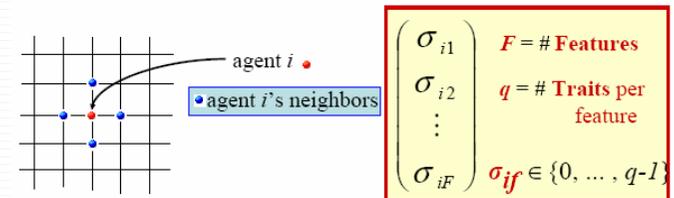
- Canales de comunicación rápidos
- Facilita computación masiva y sincronización
→ Aumenta su poder computacional

Redes "sin escala"...

...y las ciencias sociales



Modelo de agentes de Axelrod



Algunas nociones

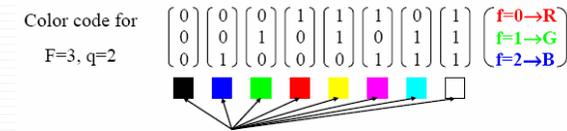
□ $MC = \langle S_{max} \rangle / N$

- Noción de Multiculturalidad
- $MC = 1 \rightarrow$ Globalización cultural
- $MC \approx 0 \rightarrow$ Multiculturalidad

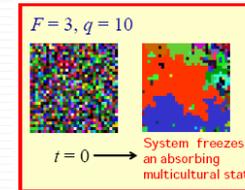
□ q_c

- parámetro de transición de fase $MC \rightarrow G$

Dinámica del modelo de Axelrod



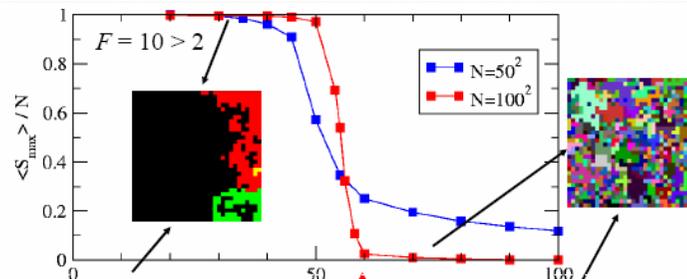
We can identify a cultural domain with a given colour.



The model illustrates how local convergence can generate global polarization.

- Number of domains taken as a measure of cultural diversity
- Uniform state always prevails without similarity rule

Modelo de agentes de Axelrod



$q < q_c$:
Monocultural
Global culture

$q > q_c$: Multicultural
Cultural diversity
Global polarization

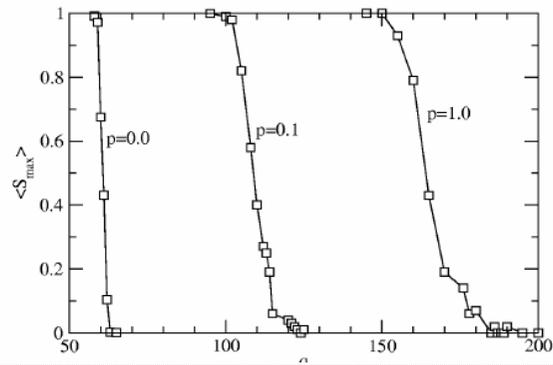
Modelo de agentes de Axelrod (II)

□ Si la interacción no es por vecindad geográfica

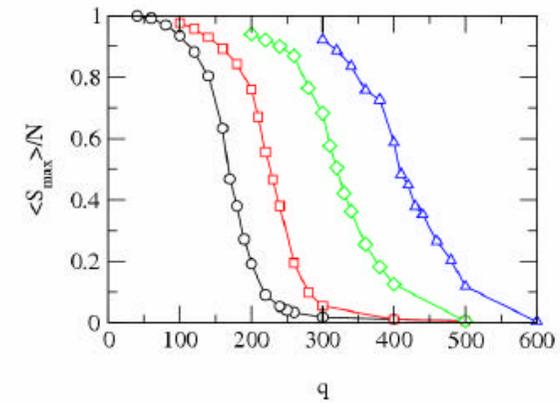
- Vía electrónica e interacción por afinidad
- Utilizando agentes influyentes (mass media)

¿Qué ocurre?

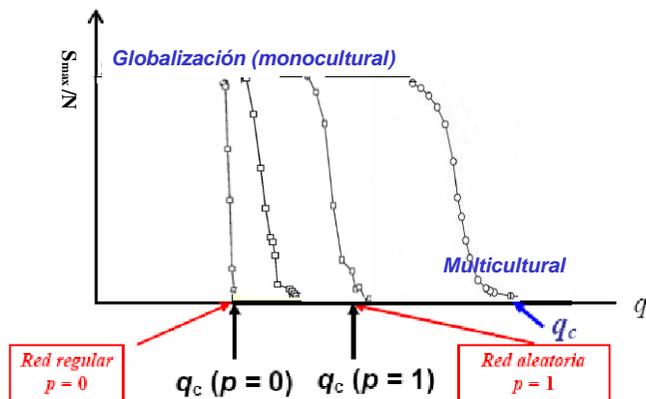
q_c en redes "mundo pequeño"



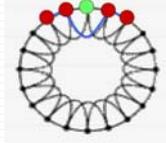
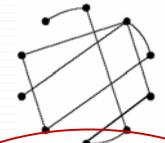
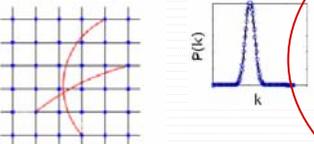
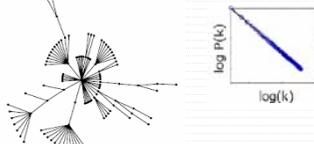
q_c en redes "sin escala"



Comparativa q_c



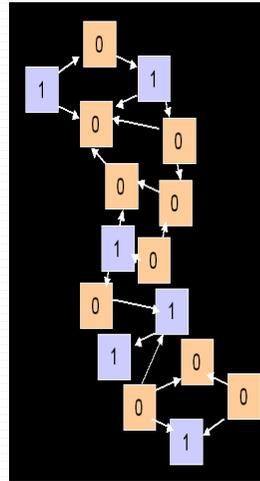
Redes complejas de computación

Redes regulares	Redes aleatorias
	
Redes mundo pequeño	Redes sin escala
	

¿Qué significan los SDNL?

La forma y la función

- Formas: la matemática de lo óptimo
- Redes no-lineales: la matemática de lo adaptable (Desorden como mecanismo adaptativo)



Propiedades ¿incompatibles?

- **Altamente estructurado:**

Robusto al ruido

- **Facilidad de comunicación:**

Con muy pocos pasos (enlaces) se pueden cubrir grandes distancias (gracias a la presencia de nodos superconectados (hubs) que tienen acceso a toda la red. La información puede transmitirse de manera muy rápida)

Propiedades ¿incompatibles?

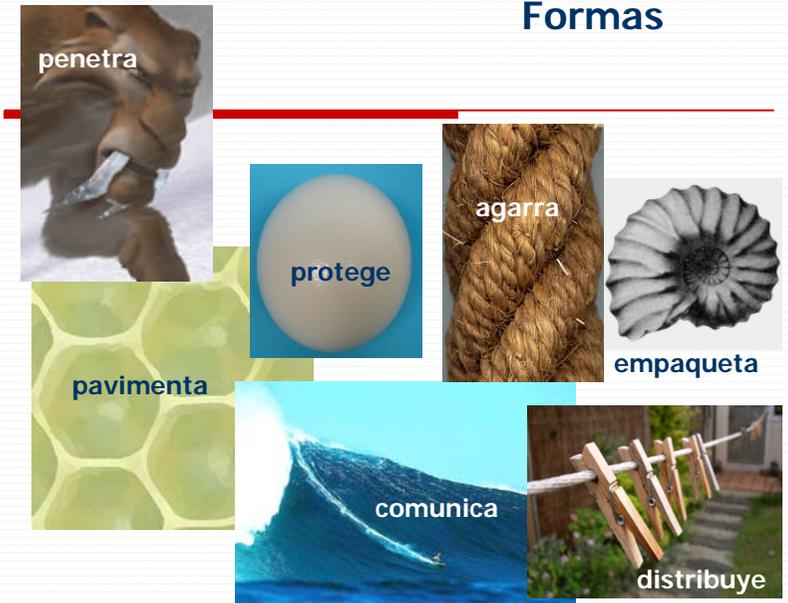
Sensibilidad:

El sistema es capaz de discriminar patrones muy similares

Robustez:

El sistema es robusto frente a ruido o perturbaciones

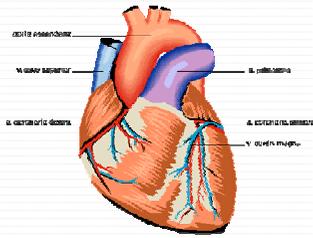
Formas



no-linealidad: matemática de lo adaptable

SISTEMAS de los que conocemos las características de sus elementos constitutivos, pero cuando interaccionan dan lugar a un comportamiento que no podemos predecir **POR LA PROPIA MATEMÁTICA DEL PROCESO.**

SON propiedades impredecibles pero consistentes (con los mismos valores iniciales se daría la misma propiedad).



EJEMPLOS:

El corazón y el cerebro viven en contextos impredecibles y la mejor estrategia es estar preparado para responder, ser sensible a cualquier comportamiento imprevisible.

Sociedades humanas

Hay Agrupamiento (cohesión): no todas las relaciones son equiprobables

- localización: tenemos nodos que se comportan parecido

Los agentes son autónomos: no toda nueva conexión depende del grupo

- Es un compromiso entre orden y desorden
 - Relacionado con la función de innovación/adaptación
-

Conclusiones: Mundo real

Independientemente de su naturaleza: Las redes reales son

- Altamente estructuradas
 - Altamente conectadas
 - Distribución de conexiones "sin escala"
-