Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Compleio.

Daniel López Coto

Sistemas Complejo

Propiedades de lo

Autómatas

Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de A

Tipos de reglas Algoritmo Gené

(AG) Problema de la

Concentración y la Computación Emergente

Introducció

Objetivo

Resultados

Conclusione

Bibliografi

# Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Complejo.

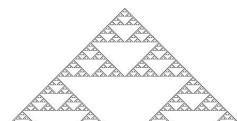
Daniel López Coto

Universidad de Sevilla



FACULTAD DE FÍSICA

Curso 2015-2016





Sistemas Complejo

Propiedades de lo

Autómatas

Celulares (AC

Tipos de ACs Tipos de reglas

Algoritmo Genétic

Problema de la Concentración la Computació

Emergente Introducción

Objetivo

Resultados

Conclusion

Bibliograf

1 Sistemas Complejos

¿Qué son?

Propiedades de los Sistemas Complejos

2 Autómatas Celulares (ACs)

¿Qué son?

Tipos de ACs

Tipos de reglas

Algoritmo Genético (AG)

3 Problema de la Concentración y la Computación Emergente

Introducción

Objetivo

Método

Resultados

Conclusiones

4 Bibliografía

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Complejo.

#### Daniel López Coto

#### Sistemas Complejos

¿Qué son? Propiedades de los Sistemas Complejo

Autómatas Celulares (AC

Celulares (AC

Tipos de ACs

Tipos de reglas

Algoritmo Genét (AG)

Problema de la Concentración y la Computación

Introducció

Objetiv

Método

Resultados

Conclusiones

## Sección 1 Sistemas Complejos

Sistemas Complejo

#### ¿Qué son?

Sistemas Complejo

Autómatas Celulares (AC)

Celulares (AC

Tipos de ACs

Tipos de reglas Algoritmo Genéti

Problema de la Concentración la Computación

Introducción

Objetivo

Resultados

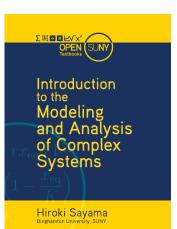
Conclusione

\_\_\_\_

## ¿Qué son? Sistemas Complejos

La comunidad científica no se pone de acuerdo.

Tomamos la definición dada por Hiroki Sayama en: "Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems".



Celulares (ACs ¿Qué son?

Tipos de reglas Algoritmo Genéti

(AG)
Problema de la

Concentración la Computació Emergente

Introducció

Objetivo

Resultados

Conclusione

¿Qué son? Sistemas Complejos

Diferenciamos entre sistema complicado y sistema complejo:

- Sistema Complicado: sistema formado por varias partes entrelazadas entre sí, que interactúan de forma secuencial-lineal.
   Un fallo en el sistema puede venir dado por el fallo de un elemento, o por no estar colocado en su lugar adecuado. Ej: motor de un coche, televisor.
- Sistema Complejo: sistema formado por una gran cantidad de partes que interactúan entre sí. Pueden generar nuevas propiedades, evolucionar mediante auto-organización, y el sistema está descentralizado. Ej: redes neuronales, hormiguero.

Sistemas Complejo

### ¿Qué son?

Propiedades de los Sistemas Compleio

Autómatas Celulares (AC

Celulares (AC

¿Que son?

Tinos de regla

Algoritmo Genétic (AG)

Problema de la Concentración la Computació Emergente

Introducció

Objetiv

Resultados

Conclusione

Bibliografi

# **Ejemplos**Sistemas Complejos





(a) Hormigas

(b) Red Neuronal

Figura : Ejemplos de sistemas complejos

Sistemas Complejo

#### ¿Qué son? Propiedades de la

Sistemas Complejo

Celulares (ACs)
¿Qué son?
Tipos de ACs
Tipos de reglas

Problema de la Concentración y la Computación

Introducció Objetivo

Método Resultados

Bibliografí

# **Propiedades**

Sistemas Complejos

- Modelo basado en agentes: herramienta computacional fundamental para el estudio de sistemas complejos.
  - Agente: unidad autónoma que toma decisiones por sí misma, basándose en la interacción local con los agentes de su entorno.
- 2 Interacción (generalmente) no lineal: el resultado de las interacciones de estos sistemas no viene dado por una combinación lineal de éstas.
  - Linealidad y homogeneidad matemática viene definida como:  $f(x + \alpha y) = f(x) + \alpha f(y)$
- 3 Ausencia de control central: no existe un mecanismo central que controle todo el sistema.
- 4 Comportamiento emergente: aparición de comportamientos en el sistema los cuales no pueden ser llevados a cabo por sus elementos individualmente. Consecuencia de la no linealidad.

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Complejo.

#### Daniel López Coto

Sistemas Complejos

Propiedades de los Sistemas Complejo:

#### Autómatas Celulares (AC

## Celulares (ACs)

¿Qué son?

Tipos de ACs

Tipos de reglas Algoritmo Genéti

Problema de la Concentración y la Computación

Emergente

Ohioaioo

Objetiv

Resultados

Conclusione

Bibliografía

# Sección 2

Autómatas Celulares (ACs)

Sistemas Complejo

Propiedades de los

Autómatas

Celulares (AC

Tipos de

Tipos de reglas Algoritmo Genéti

Problema de la Concentración

la Computación Emergente

Objetivo

Resultados

Bibliograf

## ¿Qué son? Autómatas Celulares

## Definición:

riódico

Modelo matemático de interacción extremadamente simple, discreto en el espacio y en el tiempo, que emula el comportamiento de muchos sistemas naturales.

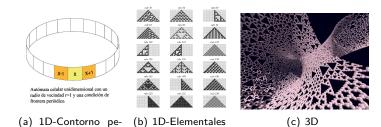


Figura: Ejemplos de ACs

Sistemas Complejo

¿Que son? Proniedades de lo

Sistemas Complejo

Celulares (AC:

¿Que son?

### Tipos de ACs

Algoritmo Genétic

Problema de la Concentración

Emergente

Objetivo

Resultado

Conclusio

Bibliograf

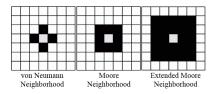
# Tipos de ACs

Autómatas Celulares

 Unidimensionales: única fila donde se encuentran las diferentes celdas. Los más sencillos.

1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	time T
					$\forall$						
0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	time T+1

 Bidimensionales: tablero donde cada célula corresponde a una casilla.



 Tridimensionales: cubo donde cada celda viene representada por una casilla cúbica.

Sistemas Complejo

Propiedades de lo

Autómatas Celulares (ACs

Celulares (ACs ¿Qué son?

Tipos de ACs

Algoritmo Genétic (AG)

Problema de la Concentración y la Computación Emergente

Introducción Objetivo

Método Resultados

Conclusione

## Clases de ACs

Autómatas Celulares

## Según el comportamiento del AC distinguimos:

- Clase I: Todas las Cls, tras un transitorio, convergen a la misma configuración final.
- Clase II: Todas las Cls, tras un transitorio, convergen a un conjunto de estructuras estables o periódicas.
- Clase III: Algunas Cls convergen hacia una configuración caótica.
- Clase IV: Algunas Cls convergen a estructuras complejas que se propagan en el espacio y en el tiempo. Se incluyen todos aquellos que puedan realizar una computación compleja.

Introducción a **Autómatas** Celulares. Enlace como Sistema Compleio.

#### Daniel López Coto

### Tipos de ACs

# **Ejemplos: Clases de ACs**

Autómatas Celulares

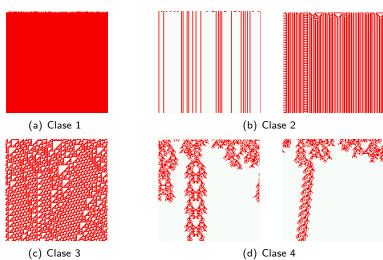


Figura : Diagramas espacio-temporales de ACs de diferentes clases

Sistemas Complejo

Propiedades de los Sistemas Complejo

Autómatas Celulares (ACs

Celulares (ACs ¿Qué son?

## Tipos de ACs

Tipos de reglas Algoritmo Genético (AG)

Problema de la Concentración la Computació

Emergente

Objetivo

Resultados

Conclusion

Bibliograf

# Algunas definiciones

### Autómatas Celulares

- Estado de la celda  $s_i(t)$ : estado de la celda que ocupa la posición i en el instante de tiempo t.  $s_i(t) \in \{k\}$ , donde  $k = \{0,1\}$ . N número total de celdas.
- **Vecindad:**  $V_i(t) = \{s_i(t), s_{i+1}(t), s_{i-1}(t), ...\}$ , indica el número de celdas alrededor de la celda i, y la propia celda i.
  - 1D (d=1):  $V_i(t)$  compuesta por la celda i y por los elementos dispuestos a izquierda y derecha de i una distancia  $\leqslant r$ .
  - 2D (d = 2): Las más características son la de Von Neumann y la de Moore.

Vecindad en t	111	110	101	100	011	010	001	000
Celda central en t+1	0	1	0	1	1	0	1	0

Figura : Ejemplo de evolución de la celda central en un AC unidimensional con r=1. La sucesión binaria 01011010 se corresponde con el número decimal 90 y así denominamos a esta regla R90.

• Reglas:  $R = f(V_i(t))$  Conjunto de funciones que dan la evolución temporal de cada celda del autómata, teniendo en cuenta su vecindad.

$$s_i(t+1) = f(s_{i-r}(t), ..., s_{i-1}(t), s_i(t), s_{i+1}(t), ..., s_{i+r}(t))$$

Sistemas Complejo

¿Qué son?

Propiedades de lo Sistemas Complei

Autómatas Celulares (AC

Celulares (AC:

Tipos de ACs

Tipos de reglas

Algoritmo Gen

Problema de la Concentración

Emergente

Objetivo

Método

Conclusion

Bibliografía

# Tipos de reglas

Autómatas Celulares

- Legales: la vecindad nula siempre da un valor nulo  $(000 \rightarrow 0)$ , y además son simétricas (la vecindad 110 debe dar lo mismo que 011).
- Totalísticas: la regla de evolución sólo depende de la suma de los estados de los vecinos.  $S(t) = \sum_{i=1}^{n} s_{i}(t)$
- Elementales: son las reglas legales con r=1 y d=1

Algoritmo Genético

# Algoritmos Genéticos

Autómatas Celulares

## Definición:

El algoritmo genético es un algoritmo matemático que transforma un conjunto de objetos (población) en otro distinto (población en la siguiente generación) mediante la aplicación del principio de supervivencia del más fuerte.

Sistemas Complejos

Propiedades de los Sistemas Complejo

Autómatas Celulares (ACs)

¿Qué son?
Tipos de ACs
Tipos de reglas
Algoritmo Genético

Problema de la

la Computación Emergente

Objetivo

Resultados Conclusione

Bibliografi

## **Operadores Genéticos**

Autómatas Celulares

- Reproducción: los mejores individuos son los seleccionados para dar las nuevas generaciones.
- Mutación: los genes pueden mutar, introduciendo nuevos individuos en el espacio de soluciones. Evitamos mínimos locales.
- Recombinación sexual: las mejores reglas se fragmentan y se recombinan, dando lugar a individuos mejor adaptados.

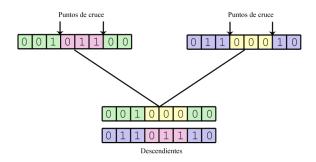


Figura : Ejemplo de AG

Sistemas Complejo:

Propiedades de lo Sistemas Complei

Autómatas

Celulares (AC

Tipos de ACs

Tipos de reglas Algoritmo Genétic

Problema de la Concentración y la Computación Emergente

Emergente

Objetiv

Método

C---!...:--

## Sección 3

Problema de la Concentración y la Computación Emergente

Sistemas Complejo

Propiedades de los Sistemas Compleio

Celulares (ACs) ¿Qué son? Tipos de ACs

Tipos de reglas
Algoritmo Genético
(AG)
Problema de la

Emergente Introducción

Objetivo Método Resultados

Conclusione

Bibliografía

## Introducción

Concentración y C. Emergente

**Computación Emergente:** término empleado para describir la aparición del procesado global de la información en un sistema.

Ventajas del procesado de información descentralizado:

- Velocidad: diferentes regiones procesan la información, por lo que se disminuye la posibilidad de sufrir el efecto de "cuello de botella".
- Robustez: si una unidad de procesado sufre daños, el sistema no colapsa, como ocurre con un sistema central de procesado.
- Asignación de recursos equitativamente: un sistema centralizado necesita gran parte de los recursos del sistema, mientras que uno descentralizado reparte los recursos de forma equitativa.

Problema de la Concentración

a Computació Emergente

Objetivo Método

Resultados

Bibliografí

# **Objetivo**

## Concentración y C. Emergente

Estudiar los mecanismos por los cuales la evolución puede descubrir métodos de computación emergente y analizarlos. Para ello necesitamos:

- ACs como sistema ideal descentralizado.
- Problema de la concentración como tarea que necesita un procesado global de la información.
- AGs como modelo de evolución computacional idealizado.

Sistemas Complejos

¿Qué son? Propiedades de los

Sistemas Complejo

Celulares (AC:

Tipos de ACs

Tipos de reglas

Algoritmo Genétic

Problema de la Concentración la Computación

Emergente Introducción

Objetivo **Método** 

Resultados Conclusiones

Ribliografia

## Método

Concentración y C. Emergente

## Condiciones:

- AC unidimensional binario  $(k \in \{0,1\})$  de 149 celdas, con r=3.
- Condiciones de contorno periódicas.
- Reglas totalísticas.
- Población de 100 reglas  $(\phi)$ .
- · AG con tres progenitores.

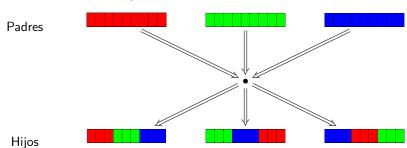


Figura: Esquema del cruce de las reglas.

## Concentración y C. Emergente

## Tarea:

Analizar la densidad de 1s en el estado inicial.

$$\rho_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} s_j(t_0)$$

2 Analizar la densidad de 1s en el estado final.

$$\rho_f = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} s_j(t_f)$$

**3** Asignarle un valor  $fit(\phi_r)$  según:

$$\mathrm{fit}^{(i)}(\phi_r) = \{ \begin{array}{ccc} 1 & \mathrm{si} & \rho_0 > 0.5 \ \mathrm{y} \ \rho_f = 1 \ \mathrm{o} \ \rho_0 < 0.5 \ \mathrm{y} \ \rho_f = 0 \\ 0 & \mathrm{en \ otro \ caso} \end{array}$$

4 Calcular la función de ajuste de la regla.

$$F(\phi_r) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathsf{fit}^{(i)}(\phi_r)$$

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Compleio.

Daniel López Coto

Sistemas Complejo

¿Qué son? Propiedades de lo

Autómatas

Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de ACs

Tipos de regla: Algoritmo Gen

(AG)
Problema de la

la Computación Emergente

Introducció

Resultados

Conclusione

\_\_\_\_

# Función de ajuste y performance

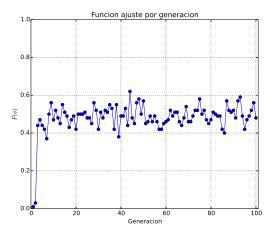


Figura: Tanda 1

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Compleio.

Daniel López Coto

Sistemas Complejo

¿Que son? Propiedades de l

Autómatas

Celulares (ACs

¿Qué son?

Tipos do rogla

Algoritmo Genét

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Introducció

Objetivo

Resultados

Conclusione

Bibliografía

# Función de ajuste y performance

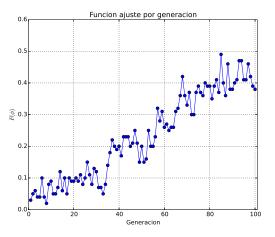


Figura: Tanda 2

Sistemas Complejo

¿Que son?

ropiedades de lo Sistemas Complej

Autómatas Celulares (AC

Celulares (AC

Tipos de AC

Tipos de reglas

Algoritmo Genét (AG)

Concentración la Computació Emergente

Emergente Introducción

Método

Resultados

Bibliografía

# Función de ajuste y performance

Resultados

Reglas	$\phi_{44}^{(1)}$	$\phi_{100}^{(1)}$	$\phi_{85}^{(2)}$	$\phi_{100}^{(2)}$
$P_{10^4}(\phi)$	50,43 %	44.86 %	35,86 %	39.95 %

Tabla : "Performances" para dos reglas de cada tanda de 100 generaciones. Las dos mejores valoradas por la función de ajuste  $F(\phi)$  y las de la última generación para cada tanda. Los superíndices indican la tanda a la que pertenece, mientras que el subíndice indica la generación.

Sistemas Compleio

¿Qué son? Propiedades de lo

Sistemas Complej

Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de AC

Tipos de reglas Algoritmo Genéti (AG)

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Introducció

Objetivo

Resultados

Conclusion

Ribliografi

# Diagramas espacio-temporales

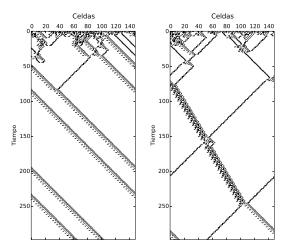


Figura : Tanda 1-Generación 1. Ambas con  $\rho_0 < 0.5$ 

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Compleio.

#### Daniel López Coto

Sistemas Compleio

¿Qué sor

ropiedades de los

Autómatas Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de reglas Algoritmo Genétic

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Introducción

Objetivo

Resultados

Conclusion

\_ . . .

# Diagramas espacio-temporales

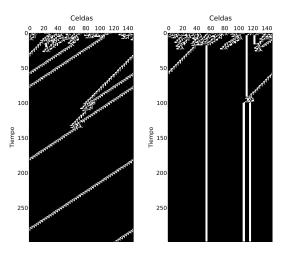


Figura : Tanda 2-Generación 1. Ambas con  $\rho_0>0.5$ 

Resultados

# **Diagramas espacio-temporales**

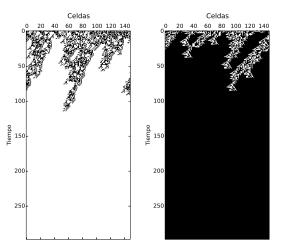


Figura : Generacion 100. Izq-T1, Dch-T2. $\rho_0 < 0.5$  y  $\rho_0 > 0.5$ respectivamente.

Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Complejo.

#### Daniel López Coto

Sistemas Compleio

¿Qué so

ropiedades de lo istemas Complej

Celulares (ACs

¿Qué son?

Tipos de A

Tipos de reglas

Algoritmo Genét

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Introducció

Método

Resultados

Conclusion

Ribliografí

## Análisis Resultados

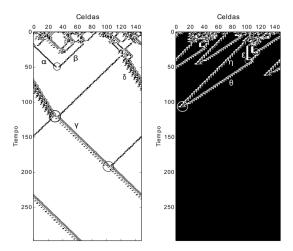


Figura : Interacción entre partículas mensajeras. Izq-T1, Dch-T2.  $\rho_0 < 0.5$  y  $\rho_0 > 0.5$  respectivamente.

Sistemas Compleio

¿Qué son?

Propiedades de lo Sistemas Complej

Autómatas Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de ACs

Algoritmo Genéti (AG)

Problema de la Concentración y la Computación Emergente

Emergente Introducción

Resultados

Conclusion

Bibliografía

## Análisis Resultados

		Т	anda 1	Tanda 2				
Partículas	$\alpha$	β			$\epsilon$		$\theta$	
Interacciones	$ \begin{array}{c} \gamma + \beta \to \gamma \\ \beta + \delta \to \gamma + \beta \\ \alpha + \beta \to \varnothing \end{array} $				$ \begin{array}{c} \epsilon + \theta \to \eta \\ \epsilon + \eta \to \theta \\ \eta + \theta \to \varnothing \end{array} $			

Tabla : Tabla sobre el tipo de partículas mensajeras y sus interacciones. El símbolo  $\varnothing$  indica que las partículas se aniquilan al interactuar.

Sistemas Complejo

Propiedades de lo

Sistemas Complej

Celulares (AC

¿Qué son?

Tipos de reglas

Algoritmo Genét (AG)

Concentración y la Computación

Introducción Objetivo

Resultados

Conclusion

Bibliografía

# Análisis

## Resultados

CA $(r = 3)$	Regla en hexadecimal	Símbolo	$P_{10^4}(\phi)$
White	28834f913e4f146211592eed05dcd43a	$\phi_W$	0.504
Black	d575bc35c51f130ba66ade17c09fb89b	$\phi_B$	0.400
Particle (M&C)	031001001fa00013331f9fff5975ffff	$\phi_{17083}$	0.755
Particle (M&C)	0504058705000f77037755837bffb77f	$\phi_{100}$	0.769
GKL	005f005f005f005f005fff5f005fff5f	$\phi_{GKL}$	0.816

Tabla : Comparación de "performances" de las reglas obtenidas por nuestro algoritmo genético ( $\phi_W$  y  $\phi_B$ ), con las obtenidas por Mitchell y Crutchfield (M&C) y con la GKL.

Sistemas Complejo

Propiedades de lo Sistemas Complei

Celulares (ACs

Tipos de ACs Tipos de reglas Algoritmo Genético

Problema de la Concentración la Computación

Introducción
Objetivo
Método

Resultados Conclusiones

Conclusione

Bibliograf

## **Conclusiones**

Resultados

## Resumimos:

- 1 Códigos originales realizados en Python por: tipado dinámico, sintaxis más simple y gran popularidad. Realizadas 200 simulaciones (100 por tanda), 20 min/simulación.
- 2 Hemos descubierto dos reglas que clasifican bien los dos posibles  $\rho_0$ . Siendo  $\phi_W \to \rho_0 < 0.5$  y  $\phi_B \to \rho_0 > 0.5$ .
- 3 Con el AG de tres progenitores y sólo dos experimentos hemos conseguido una calidad de reglas entorno al 40-50 %.
- 4 Aunque nuestras reglas no tienen la misma calidad que las de Crutchfield Y Mitchell, nuestro método apunta en buena dirección para obtener reglas de calidad.
- 6 Líneas futuras:
  - Aumentar el número de experimentos
  - Estudiar la propagación de la información mediante las partículas de la clase IV.
  - Mantener las CIs inalteradas en cada generación.



Introducción a Autómatas Celulares. Enlace como Sistema Complejo.

#### Daniel López Coto

Sistemas Complejo:

Propiedades de lo Sistemas Complei

Autómatas Celulares (AC:

Celulares (AC:

Tipos de ACs

Tipos de reglas Algoritmo Genéti

Problema de la Concentración y la Computación

Emergente

Ohioaioo

Objetiv

Resultados

Conclusione

Bibliografía

## Sección 4 Bibliografía

Sistemas Complejos

¿Qué son? Propiedades de los Sistemas Complejo

Celulares (ACs)
¿Qué son?
Tipos de ACs
Tipos de reglas
Algoritmo Genético

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Objetivo Método Resultados

Bibliografía

# Bibliografía

Bastien Chopard and Michel Droz. Cellular Automata Modeling of Physical Systems.. Cambridge University Press (1998).



Rajarshi Das, James P. Crutchfield, Melanie Mitchell, James E. Hanson.

"Evolving Globally Synchronized Cellular Automata". Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms, p.336-343. San Francisco CA, Ed. Morgan Kaufmann (1995).

Chris Langton Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation. Physica D, v.42, p. 12-37 (1990).

Sistemas Complejo

¿Qué son? Propiedades de los Sistemas Complejo

Celulares (ACs)
¿Qué son?
Tipos de ACs
Tipos de reglas
Algoritmo Genético

Problema de la Concentración la Computación Emergente

Introducción Objetivo

Resultados

Bibliografía

# Bibliografía

- Norman H. Packard *Adaptation toward the edge of chaos*. In Dynamic Patterns in Complex Systems, p.293-301. Wordl Scientific (1988).
- Warren Weaver. "Science and Complexity". Rockefeller Foundation, New York City. American Scientist, 36: 536 (1948).
- Juan Ignacio Vázquez, Javier Oliver. "Evolución de autómatas celulares utilizando algoritmos genéticos". Facultad de Ingeniería ESIDE, Universidad de Deusto. 48007 Bilbao, Vizcaya-España (2008).
- Hiroki Sayama. "Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems".

  Binghamtom University, SUNY (2015).
- Stephen Wolfram. Statistical Mechanics of Cellular Automata. Reviews of Modern Physics, v.35, no.3, p.601-644 (1983).
- Stephen Wolfram. "A New Kind of Science". Wolfram Media (2002).

Sistemas Complejo

¿Qué son?

Propiedades de los Sistemas Complejo

Celulares (ACs ¿Qué son? Tipos de ACs

Tipos de reglas
Algoritmo Genético

Problema de la Concentración la Computación

Emergente Introducción Objetivo

Resultados

Conclusione

Bibliografía

# Bibliografía

- Roberto Poli. "A Note on the Difference Between Complicated and Complex Social Systems". Department of Sociology and Social Research, University of Trento; UNESCO Chair in Anticipatory Systems (2013).
- Thomas Schelling. "Dynamics Models of Segregation". Harvard University (1971).
- Toffoli T and Margolus N. "Cellular Automata Machines". The MIT Press Cambridge, Massachusetts (1987).