

COMPUTACIÓN BIOLÓGICA

Pedro Isasi¹

¹Departamento de Informática
Universidad Carlos III de Madrid
Avda. de la Universidad, 30. 28911 Leganés (Madrid). Spain
email: isasi@ia.uc3m.es

Presentación

TEMARIO

- 1 Introducción
- 2 Algoritmos Genéticos
- 3 Computación Evolutiva
- 4 Computación con Inspiración Biológica
- 5 **BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN****
 - **Efecto Baldwin**
 - Estrategias Evolutivamente Estables
 - El sistema Tierra

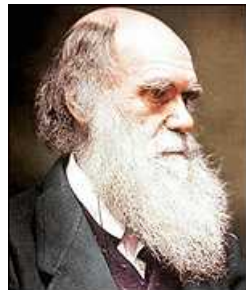
EVOLUCIÓN LAMARKIANA

- Publicada en su libro *Filosofía Zoológica* (1809)
- Tesis: Cambios en el entorno producen cambios en las necesidades de los organismos vivos, que pueden producir cambios en su comportamiento
- Mecanismos de evolución:
 - Primera ley: El uso o desuso produce el desarrollo o debilitamiento de las estructuras (órganos)
 - Segunda ley: Todos estos cambios se transmiten por herencia
- Ejemplo: las patas de las garzas o los cuellos de las girafas



EVOLUCIÓN DARWINIANA

- Publicada en “El origen de las especies” (1859)
- La manipulación directa de la estructura genética es imposible
- Las características adquiridas no se pueden transmitir directamente a los descendientes
- Mecanismos de evolución:
 - La variación genética de las especies a través de mutaciones aleatorias
 - La Selección Natural operando en los fenotipos



EVOLUCIÓN BALDWINIANA

- Publicado en “Un nuevo factor de evolución” (1896)
- Descubierta de forma independiente por Baldwin, Morgan y Osborn en 1896
- Nuevo factor = plasticidad fenotípica: la capacidad de un individuo de adaptarse a su entorno durante su vida
 - Ejemplos: capacidad de aprender, incremento de la masa muscular mediante el ejercicio físico, el bronceado después de la exposición solar



EL EFECTO BALDWIN

- Un conjunto de efectos aparecen por interacción de dos procesos adaptativos:
 - Evolución genotípica de las poblaciones (búsqueda global)
 - La flexibilidad fenotípica de los organismos (búsqueda local)
- Tiene que ver con los beneficios y perjuicios del aprendizaje
- El aprendizaje puede alterar la composición genética de una población

EL EFECTO BALDWIN

- Ejemplos hipotéticos:
 - El canto de los pájaros (Simpson 1953)
 - La capacidad humana de lenguaje (Pinker and Bloom 1990, Deacon 1997)
 - La consciencia y la inteligencia (Dennett 1991, 1995)
- La capacidad de aprendizaje puede, eventualmente, aparecer codificada genéticamente. Este mecanismo recuerda a la evolución lamarkiana
- Sin embargo, es consistente con los mecanismos darwinianos de herencia de rasgos

EFECTO BALDWIN. NIVEL 1

- Valor evolutivo del aprendizaje: acelera la evolución de un rasgo adaptativo
 - Como resultado de una **mutación**, un organismo es capaz de aprender “cómo hacer X”
 - Aprender a “cómo hacer X” incrementa el fitness del organismo
 - Se crea una nueva presión de selección: ya que la selección ahora también opera sobre la habilidad de hacer X
 - Si el poder hacer X permite un mayor éxito reproductivo, la población podría, eventualmente, estar repleta de individuos capaces de aprender a “cómo hacer X”

EFFECTO BALDWIN. NIVEL 2

- Debido a que el aprendizaje es costoso, la evolución favorecerá soluciones rígidas en las cuales adquirir X es parte de la carga genética del individuo (rigidez fenotípica)
 - La probabilidad de éxito reproductivo, proporcional a lo rápido que X pueda ser aprendido
 - Nuevas presiones de selección causan competitividad entre aprendices lentos y rápidos
 - Algunos individuos estarán mejor equipados (genéticamente) para aprender X, y tendrán ventaja reproductiva
 - Accidentalmente, la capacidad X está bajo control genético directo \implies , canalización de los rasgos (Waddington 1942)

HINTON & NOWLAN SIMULACIÓN (1987)

- Los individuos son redes neuronales con 20 posibles conexiones
- 20 genes, que describen las conexiones de la red
- Cada gen puede tener tres alelos
 - 0 = sin conexión
 - 1 = con conexión
 - ? = indeterminado, susceptible de aprendizaje
- Solo hay un buen fenotipo: La red solo funciona si todos los nodos están conectados
- El mejor genotipo: el que tiene todos los genes a 1

PAISAJE DE AGÜJA EN UN PAJAR

- La evolución se realiza mediante un AG
- Población de 1000 individuos
- Cada alelo se inicializa aleatoriamente
 - $p = 0.5$ para ?
 - $p = 0.25$ para 0 y 1
- Se genera el individuo, haciendo que las ? tomen valores 0 ó 1 de forma aleatoria
- Si el individuo tiene todo 1's, el fitness es 1, sino el fitness es 0
- No funciona mejor que una búsqueda aleatoria

EL PROBLEMA DE HEREDAR EL BUEN GENOMA

- Incluso si se encuentra la solución correcta no es fácil que sobreviva en la generación siguiente
- A menos que los progenitores sean muy parecidos, las buenas soluciones desaparecen en generaciones sucesivas
 - Se puede mejorar introduciendo elitismo o reproducción asexual
 - Seguiría siendo no mejor que una búsqueda aleatoria elitista

LA IMPORTANCIA DEL APRENDIZAJE ADQUIRIDO

- Se introduce un mecanismo de plasticidad fenotípica (aprendizaje)
- Cada individuo realiza 1000 intentos de aprendizaje durante su periodo de vida
- Mecanismo de aprendizaje: asignación aleatoria de las ?
 - Si el individuo encuentra la red correcta, se para
 - Sino sigue buscando, hasta los 1000 intentos
- Todos los fenotipos son igual de difíciles de aprender
- Necesita que el individuo reconozca que la solución es correcta

GENERACIÓN DE LA NUEVA POBLACIÓN

- 1000 reproducciones
 - Selección por ruleta
 - Seleccionan padres proporcional al fitness
 - La función de fitness de un individuo i en una población I es:
- G = número total de intentos (1000)
 - g = número de intentos hasta encontrar la solución
 - N = longitud del genotipo (100)
 - El fitness va desde 1 hasta N . Si se descubre a los 900 intentos:

$$F(I_i) = 1 + \frac{(G - g)(N - 1)}{G}$$

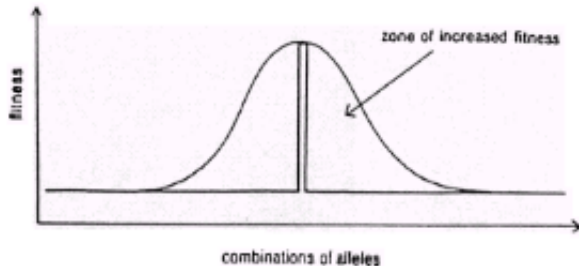
$$1 + \frac{(1000 - 900)(99)}{1000} = 10,9$$

GENERACIÓN DE LA NUEVA POBLACIÓN

- La ruleta se lanza dos veces, se seleccionan los dos padres y se genera un solo descendiente
- El descendiente se genera mediante cruce simple
- Los descendientes solo heredan el genoma, **nunca las conexiones aprendidas durante la vida de sus padres**
- Los parámetros del modelo están elegidos de forma precisa
- Un genotipo normal tiene unas diez conexiones determinadas genéticamente (1's ó 0's)
 - Se realizan alrededor de 2^{10} ensayos

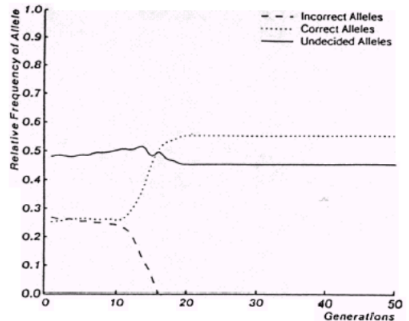
RESULTADOS

- La plasticidad fenotípica suaviza el “agüja en un pajar” paisaje de fitness
- Ya que se permite que un individuo explore regiones fenotípicas vecinas
- No hay que encontrar la cima mediante saltos aleatorios poco probables, se puede subir de forma suave



RESULTADOS

- Sin plasticidad fenotípica, se necesitan generar alrededor de 2^{20} (1 million) de individuos para tener éxito
- Con aprendizaje, se necesitan tan solo 16000 individuos
- Existe una pequeña presión para fijar todos los fenotipos genéticamente



CONCLUSIONES

- Con plasticidad fenotípica se encuentra la solución mucho más rápidamente
- Los individuos resultantes no tienen capacidad de aprendizaje, tienen todos sus genes a 1
- Es como si el aprendizaje realizado por sus padres hubiera sido transmitido genéticamente ⇒ Lamarkismo
- Sin embargo, no ha habido **ninguna** transmisión de los caracteres adquiridos
- Y a pesar de todo se han transmitido de forma indirecta

RESUMEN

La evolución de los individuos, en ocasiones, parece lamarkiana, pero es siempre una evolución darwiniana

CONCLUSIONES

- Con plasticidad fenotípica se encuentra la solución mucho más rápidamente
- Los individuos resultantes no tienen capacidad de aprendizaje, tienen todos sus genes a 1
- Es como si el aprendizaje realizado por sus padres hubiera sido transmitido genéticamente \Rightarrow Lamarkismo
- Sin embargo, no ha habido **ninguna** transmisión de los caracteres adquiridos
- Y a pesar de todo se han transmitido de forma indirecta

RESUMEN

La evolución de los individuos, en ocasiones, parece lamarkiana, pero es siempre una evolución darwiniana

TEMARIO

- 1 Introducción
- 2 Algoritmos Genéticos
- 3 Computación Evolutiva
- 4 Computación con Inspiración Biológica
- 5 **BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN****
 - Efecto Baldwin
 - Estrategias Evolutivamente Estables**
 - El sistema Tierra

EL DILEMA DEL PRISIONERO

Estudiado por primera vez por Flood y Dreshler en 1950:

PLANTEAMIENTO

Dos personas han sido capturadas por la policía y son sospechosas de haber cometido un crimen. La policía, sin embargo, no tiene pruebas para condenarlas y decide someterlas de forma independiente a un interrogatorio. A cada uno de los inculpados se le ofrece una recompensa por cooperar con la policía, la situación que se le plantea a cada acusado es la siguiente:

EL DILEMA DEL PRISIONERO

- El interrogado acusa a su compañero. Dos situaciones:
 - El compinche no le delata a él.- En este caso el acusado saldrá en libertad por colaborar
 - El compinche también le delata.- Ambos son acusados, pero se les reduce condena por colaborar
- El interrogado no delata a su compañero:
 - El compinche le delate.- El interrogado va a la cárcel el compinche sale libre
 - El compinche no le delate.- No hay pruebas, sufren una condena mínima por casos pendientes

REGLAS DEL JUEGO

TABLA DEL JUEGO

	Coopera	Delata
Coopera	Premio/Premio	Engañado/Engaño
Delata	Engaño/Engañado	Castigo/Castigo

- Cuatro posibilidades:
 - Premio (P) por haber colaborado con la policía y no ser delatado
 - Castigo (C) por no colaborar y ser delatado
 - Engañado (E) por no colaborar y ser delatado
 - Engaño (N) por colaborar y no ser delatado
- Se ha de cumplir que:
 - $N > P > C > E$
 - $2P > N + E$

PUNTUACIONES

- Se juega entre dos y se decide sin saber lo que va a hacer el otro según: $P = 3$, $N = 5$, $C = 1$ y $E = 0$:

TABLA DEL JUEGO

	Coopera	Delata
Coopera	3/3	0/5
Delata	5/0	1/1

- Lo mejor es siempre delatar:
 - Si delatas en el mejor caso 5 puntos en el peor 1
 - Si cooperas en el mejor caso 3 puntos en el peor 0
- ¿Qué ocurre si se hace de forma iterada, sabiendo lo que han hecho anteriormente?

DILEMA DEL PRISIONERO ITERADO

- Siendo la estrategia óptima delatar, ¿es posible la aparición de estrategias de cooperación?
- Si el rival conoce nuestro historial puede decidir no colaborar, en ese caso cada uno hace 1 punto por ronda
- Si hay otros que se ponen de acuerdo para colaborar, hacen 3 puntos en cada ronda
- El problema es cómo saber en quien confiar
- Axelrod preparó una competición en la que se recibían estrategias desde todo el mundo (programas)
- Los puso a competir y el ganador fue un psicólogo de la Universidad de Toronto Anatol Rapoport con la estrategia donde las dan las toman **DDT**

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

DONDE LAS DAN LAS TOMAN

- Se empieza siempre colaborando
- Se examina la última acción del rival:
 - Si nos delató le delatamos
 - Si colaboró colaboramos
- Es altruista ya que tiende a colaborar, pero tiene en cuenta el comportamiento pasado
- Las altruistas puras colaboran siempre
- Las desconfiadas (canallas) delatan siempre

EVOLUCIÓN DEL JUEGO CON TRES ESTRATEGIAS

15 estrategias, 3 altruistas, 3 canallas, 3 DDT:

Ronda	Altruista	Canalla	DDT
1	27	54	27
2	27	34	32
...
200	27	34	32

Sólo canallas y DDT:

Ronda	Canalla	DDT
1	29	12
2	9	17
...
200	9	17

ESTRATEGIAS ALTRUISTAS

- Axelrod volvió a realizar el concurso, para ver si había mejores estrategias que la DDT, pero volvió a ganar
- Implicaciones biológicas y sociales:
 - Sistema *vive y deja vivir* de la primera guerra mundial
 - En los líquenes existen hongos que extraen nutrientes de las rocas que permiten sobrevivir a las algas, que en compensación proveen de fotosíntesis a los hongos
 - El árbol de la acacia facilita comida y hogar a ciertas hormigas, que a cambio protegen el árbol
- Este tipo de estrategias ¿podrían surgir en la naturaleza de forma espontánea a pesar de la tendencia de los genes para su supervivencia individual?
- Las estrategias no son buenas o malas, altruistas o egoistas; son **evolutivamente estables**

EVOLUCIÓN DE ESTRATEGIAS MEDIANTE AG

- Lindergren y Nordahl desarrollaron un programa para corroborar la hipótesis anterior
 - ¿Se podrán producir comportamientos de cooperación espontáneamente en un entorno en el que las reglas del juego es obtener de forma individual el mayor número de puntos posibles?
 - ¿podrán emerger comportamientos cooperantes partiendo de estrategias aleatorias para el Dilema del Prisionero?
- Realizar experimentos en los que:
 - Se puedan producir nuevas estrategias combinando las ya existentes
 - Se siguen las reglas de la Selección Natural
 - Estrategias mejores sobrevivirán y tendrán más descendientes, y las peores desaparecerán sin descendientes
 - Se utilizan Algoritmos Genéticos

CODIFICACIÓN GENÉTICA DEL JUEGO

- Se codifican las estrategias como cadenas de bits
- Cada estrategia tiene una memoria limitada por simplicidad, en este caso 2
- Las posibles entradas de la estrategia son pues:

Código	t-1	t-2
00	Delató	Delató
01	Colaboró	Delató
10	Delató	Colaboró
11	Colaboró	Colaboró

- Como hay 4 estados y dos acciones a realizar para cada uno (0 delatar, 1 cooperar), las posibilidades son $2^4 = 16$, para lo cual se necesitan 4 bits

CODIFICACIÓN GENÉTICA DEL JUEGO

- Si el individuo es 0110, el primer bit se refiere al primer estado (me delató, me delató), el segundo bit al segundo etc...

t-1 (Oponente)	t-2 (Oponente)	t (Jugador)
0 (Delata)	0 (Delata)	0 (Delata)
0 (Delata)	1 (Coopera)	1 (Coopera)
1 (Coopera)	0 (Delata)	1 (Coopera)
1 (Coopera)	1 (Coopera)	0 (Delata)

- El significado es:
 - El oponente delató en t-1, y delató en t-2. Delatará
 - El oponente Cooperó en t-1, y delató en t-2. Cooperará
 - El oponente delató en t-1, y Cooperó en t-2. Cooperará
 - El oponente Cooperó en t-1, y Cooperó en t-2. Delatará
- Si se quiere generalizar para un tamaño de memoria arbitrario m , el tamaño del cromosoma sería $TM = \text{Log}_2(2^{2^m}) = 2^m$:

ALGORITMO GENÉTICO

- 1 Generar la población de estrategias de forma aleatoria y de tamaño T.
- 2 Realizar una competición del DPI, con un número arbitrario de rondas R, donde en cada ronda hayan jugado cada estrategia con todas las demás estrategias. Acumular los puntos conseguidos en todas las rondas hasta obtener una puntuación final de la competición por cada estrategia.
- 3 Realizar una iteración del AG utilizando como fitness la puntuación obtenida en el punto anterior. De forma que mediante mutación y sobrecruzamiento se obtendrán nuevas estrategias. Siendo los individuos que hayan obtenido más puntuación los que tendrán más probabilidad de sobrevivir.
- 4 Poner a cero las puntuaciones de todos los individuos y regreasr al paso 2.

EXPERIMENTOS

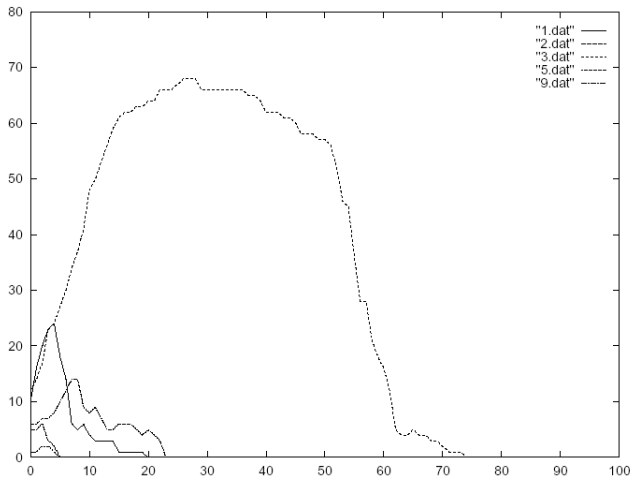
- Se numera las estrategias según su codificación en binario: la 0 (0000) siempre delata, la 15 (1111) siempre coopera
- Se dividen las estrategias en tres bloques:
 - Ingenuas.- tienden a cooperar
 - Canallas.- Tienden a delatar
 - Desconfiadas.- cooperan si se coopera con ellas:

Bloque	Estrategias
Canallas	0 1 2 4 8
Desconfiados	3 5 6 9 10 12
Ingenuos	7 11 13 14 15

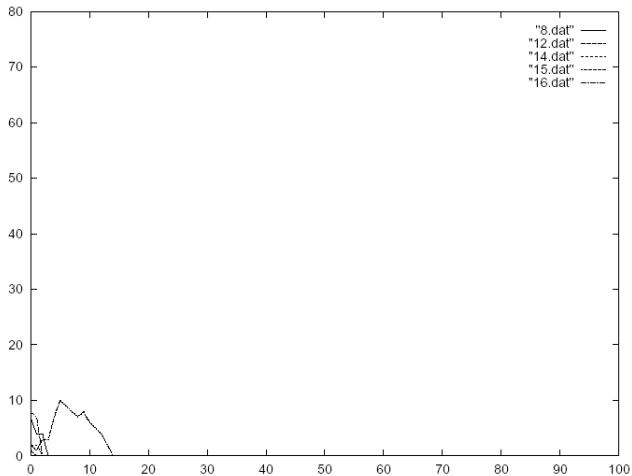
EXPERIMENTO 1

- Se genera una población de individuos con todas las estrategias representadas por igual
- Se realiza una competición de n rondas entre todas las estrategias
- El fitness de cada individuo (estrategia) es la puntuación obtenida en la competición
- Se genera una nueva población donde cada individuo está representado según su fitness
- Se repite el proceso un número determinado de generaciones
- No se generan nuevas estrategias ya que están todas las posibles en la población inicial
- Se trata de comprobar como evolucionaría un ecosistema con estas estrategias

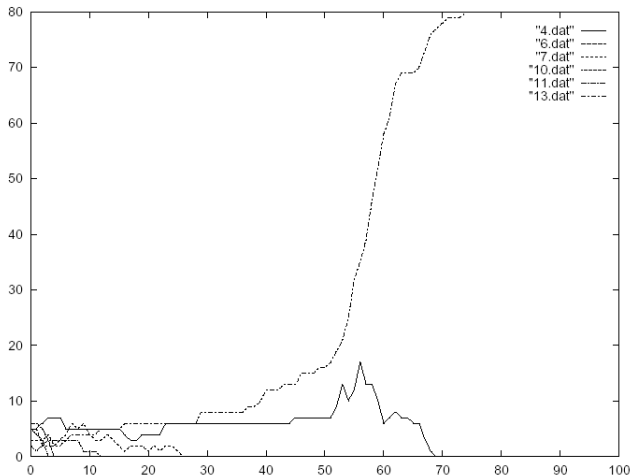
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS CANALLAS



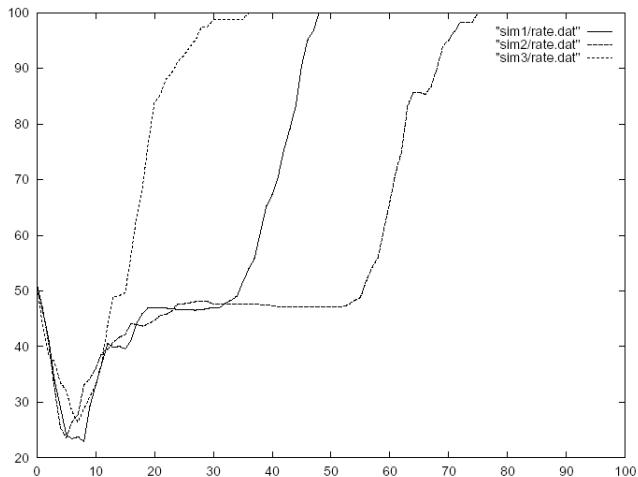
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS INGENUAS



EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS DESCONFIADAS



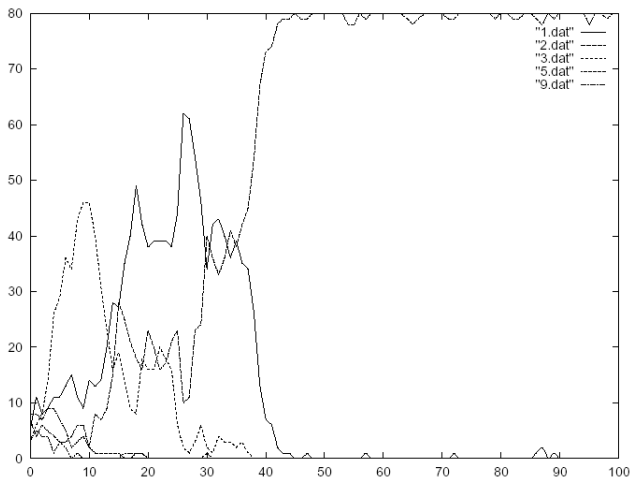
TASA DE COOPERACIONES



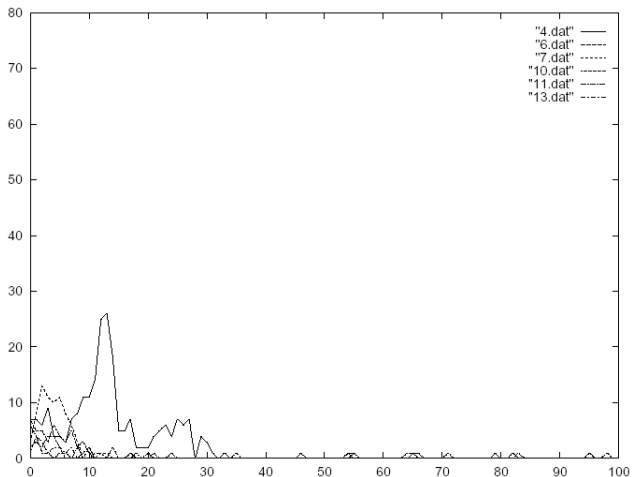
EXPERIMENTO 2

- Se ha visto la evolución de las estrategias diseñadas, pero ¿qué tipo de estrategias podrías surgir espontáneamente?
- Se genera aleatoriamente una población de individuos con su cromosoma aumentado (con más memoria para permitir estrategias más sofisticadas)
- Se realiza una competición de n rondas entre todas las estrategias
- El fitness de cada individuo (estrategia) es la puntuación obtenida en la competición
- Se genera una nueva población mediante un AG con probabilidad de sobrecruzamiento de 1 y de mutación de 0,001
- Se generan nuevas estrategias que competirán con las contemporáneas por transmitir su material genético

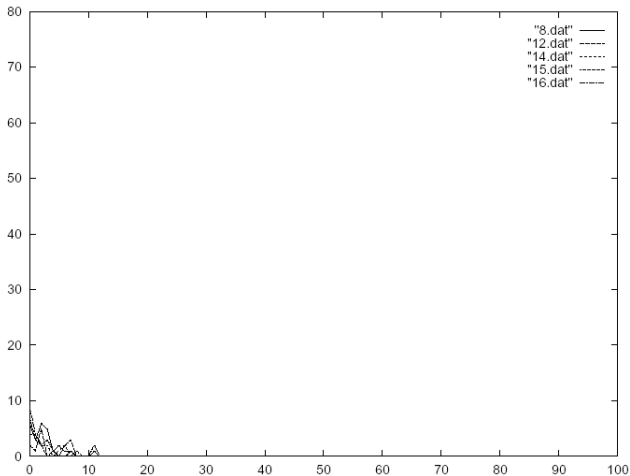
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS CANALLAS



EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS INGENUAS



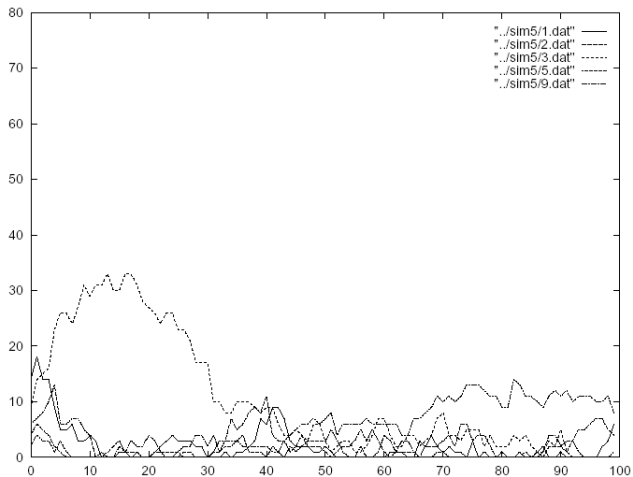
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS DESCONFIADAS



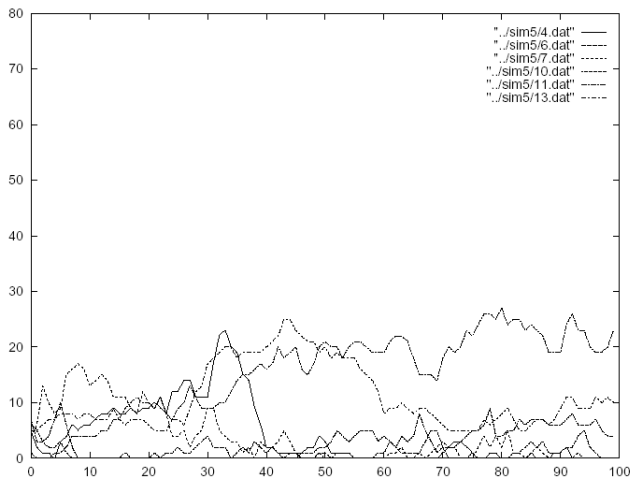
EXPERIMENTO 3

- Las estrategias canallas se hacen con la población
- Hay una pequeña oscilación de las otras pero acaban desapareciendo
- Esto es debido a la codificación:
 - Cuando estrategias desconfiadas e ingenuas tienen éxito se cruzan entre sí
 - a causa de la codificación los descendientes son en mayor número estrategias canallas
- Para comprobarlo se elimina el sobrecruzamiento y se aumenta la mutación hasta 0,02 (20 veces)

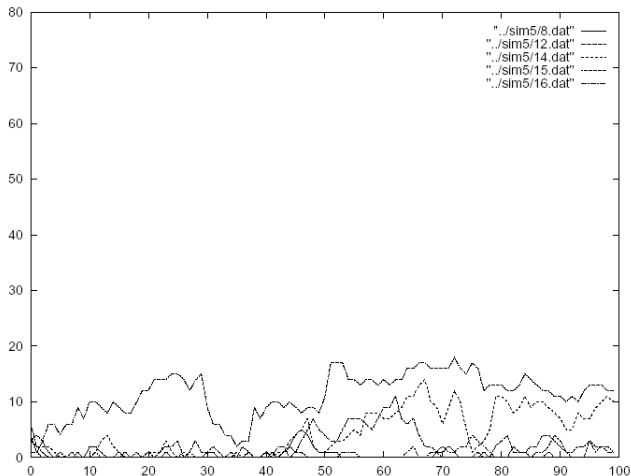
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS CANALLAS



EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS INGENUAS



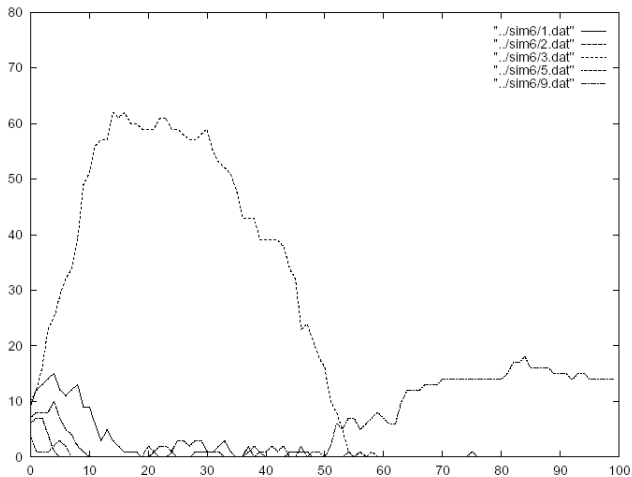
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS DESCONFIADAS



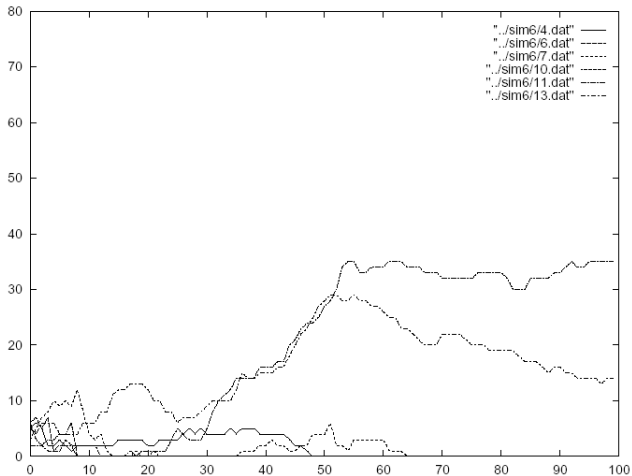
EXPERIMENTO 4

- Desaparece el efecto de la codificación
- Las estrategias ingenuas y desconfiadas crecen en número
- Las estrategias canallas desaparecen
- Hay un mayor nivel de ruido debido a la alta mutación y las estrategias vuelven a surgir y oscilan levemente
- Para evitarlo se introduce de nuevo sobrecruzamiento pero se disminuye su probabilidad hasta 0,6 y la mutación a su valor de 0,001

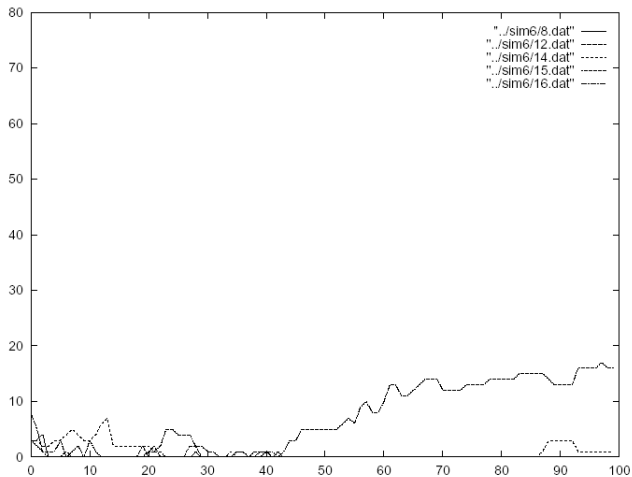
EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS CANALLAS



EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS INGENUAS

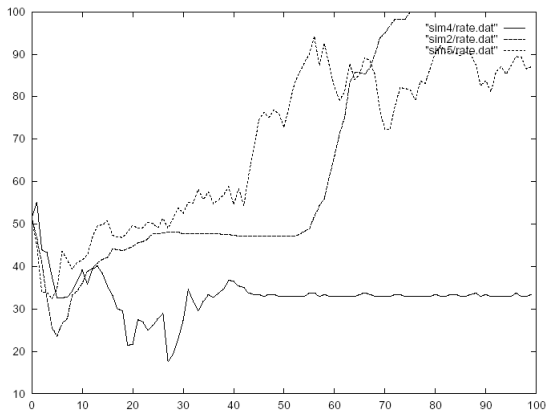


EVOLUCIÓN ESTRATEGIAS DESCONFIADAS



TASA DE COOPERACIONES

- Las estrategias cooperativas se estabilizan y desaparecen las traidoras
- Comparación entre cooperaciones en los experimentos:



TEMARIO

- 1 Introducción
- 2 Algoritmos Genéticos
- 3 Computación Evolutiva
- 4 Computación con Inspiración Biológica
- 5 **BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN****
 - Efecto Baldwin
 - Estrategias Evolutivamente Estables
 - El sistema Tierra**

ORÍGENES

- No estudiar la vida → Interactuar con ella **CREARLA**
- Crear una célula artificial y que evolucione por Selección Natural
- Hacer todo esto en un mundo artificial (ordenador)
- Cada célula un programa introduciendo mutaciones aleatorias en las instrucciones
- Superar la tercera ley de la termodinámica

PROBLEMÁTICA

- El espacio de búsqueda de los programas $\longrightarrow \infty$
- Problema de epístasis
- Programas aleatorios \longrightarrow Peligro !!!
- Imposibilidad de evolución positiva

ELEMENTOS

- Individuo → Programa en ensamblador
- Entorno → Memoria de la máquina, CPU
- Gen → Instrucción en código máquina
- Genoma = Individuo
- Fenotipo → resultado de la ejecución del programa

ENSAMBLADOR

- RISC (32 instrucciones \rightarrow 5 bits)
- Máquina de 0 direcciones (No hay operandos ni operandos)
- ¿Cómo hacer el direccionamiento?
- ¿Cómo introducir constantes numéricas?

CONSTANTES

- Se utilizan los registros de la máquina
- Se ponen a cero
- Se permiten desplazamientos (Dcha, Izda)

LA CONSTANTE 14

- Zero ($ax \leftarrow 000000$)
- Inc ($ax \leftarrow 000001$), Izda ($ax \leftarrow 000010$)
- Inc ($ax \leftarrow 000011$), Izda ($ax \leftarrow 000110$)
- Inc ($ax \leftarrow 000111$), Izda ($ax \leftarrow 001110$)

DIRECCIONAMIENTO

- Por patrones
- Se introducen 2 operaciones vacías:
 - NOP_0
 - NOP_1
- Estas instrucciones sirven de etiquetas
- Las instrucciones de salto vienen seguidas de etiquetas
- Se salta a la complementaria

UNIVERSO ARTIFICIAL Y ORGANISMOS

- Espacio físico (cuantizado) → Memoria RAM (una instrucción)
- A todo el universo lo denominamos sopa
- En todos los cuantos de la sopa hay una instrucción
- Cada organismo un programa, hay instr. de organismos y flotando
- Cada organismo dispone de una membrana semipermeable
 - Puede auto-modificarse
 - Puede leer de cualquier parte de la sopa (incluidos otros org.)
 - Puede ejecutar cualquier parte de la sopa (incluidos otros org.)
 - No puede modificar la sopa (incluidos otros org. excepto embriones)

MÁQUINA VIRTUAL

- Cuatro registros (ax, bx, cx, dx) y uno de flags (fl)
- Un puntero de pila (sp) y la pila de 10 posiciones (st)
- Un contador del programa (ip)
- Una tabla de procesos
 - Ranura de CPU asignada (y consumida)
 - Estado (Ejecución - espera)
 - Edad, DNI, Tamaño
 - Estado de la máquina
 - Dirección de inicio
- Mecanismos para multiproceso (tiempo compartido)

NACIMIENTO Y MUERTE

- El nacimiento y la muerte son indispensables para la evolución
- Al nacer el S.O. introduce una nueva entrada en la tabla de procesos
- Al morir se elimina la entrada de la tabla de procesos
- La muerte es por vejez y solo se produce cuando no hay espacio
- Muere el más viejo independientemente de su edad

ENVEJECIMIENTO

- Hay que evitar las ejecuciones incorrectas
- No todas las instrucciones se pueden ejecutar siempre
- Hay instrucciones difícilmente ejecutables correctamente
- Si la $P_e(I_j) < \theta$ entonces:
 - Si se ejecuta correctamente salud
 - Si on se ejecuta correctamente enfermedad
- Salud rejuvenece
- Enfermedad envejece

Número	Código	Instrucción	Número	Código	instrucción
0	00000	<i>nop</i> ₀	16	10000	<i>pop</i> _A
1	00001	<i>nop</i> ₁	17	10001	<i>pop</i> _B
2	00010	<i>not</i> ₀	18	10010	<i>pop</i> _C
3	00011	shl	19	10011	<i>pop</i> _D
4	00100	zero	20	10100	<i>jmp</i> ₀
5	00101	ifz	21	10101	<i>jmp</i> _b
6	00110	<i>sub</i> _{CAB}	22	10110	call
7	00111	<i>sub</i> _{AAC}	23	10111	ret
8	01000	<i>inc</i> _A	24	11000	<i>mov</i> _{DC}
9	01001	<i>inc</i> _B	25	11001	<i>mov</i> _{BA}
10	01010	<i>dec</i> _C	26	11010	<i>mov</i> _{ij}
11	01011	<i>inc</i> _C	27	11011	<i>adr</i> _o
12	01100	<i>push</i> _A	28	11100	<i>adr</i> _b
13	01101	<i>push</i> _B	29	11101	<i>adr</i> _f
14	01110	<i>push</i> _C	30	11110	mal
15	01111	<i>push</i> _D	31	11111	divide

EVOLUCIÓN

- Mutaciones aleatorias (las causadas por rayos cósmicos)
- Mutaciones en mitosis (al copiarse el DNA)
- Mutaciones de ejecución (para introducir ruido en fenotipo)
- La evolución no es guiada
- La presión de selección se produce en función de la limitación de recursos
 - Memoria
 - CPU

ANCESTRO 0080AAA (0-15)

Número	Código	Instrucción	Descripción
0	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
1	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
2	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
3	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
4	04	zero	cx = 0
5	02	or1	cx or 1
6	03	shl	Desplazar cx a la izquierda
7	03	shl	Desplazar cx a la izquierda
8	18	<i>mov</i> _{cd}	dx = cx
9	1c	adrb	ax = Dirección patron complementario
10	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
11	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
12	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
13	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
14	07	<i>sub</i> _{ac}	ax = ax - cx
15	19	<i>mov</i> _{ab}	bx = ax

ANCESTRO 0080AAA (16-31)

Número	Código	Instrucción	Descripción
16	1d	<i>adrf</i>	ax = Dirección patrón complementario
17	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
18	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
19	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
20	01	<i>nop₁</i>	Patrón 1
21	08	<i>inc_a</i>	$ax = ax + 1$
22	06	<i>sub_{ab}</i>	$cx = ax - bx$
23	01	<i>nop₁</i>	Patrón 1
24	01	<i>nop₁</i>	Patrón 1
25	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
26	01	<i>nop₁</i>	Patrón 1
27	1e	<i>mal</i>	Pedir cx espacio. Dirección en ax
28	16	<i>call</i>	llamar al patrón
29	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
30	00	<i>nop₀</i>	Patrón 0
31	01	<i>nop₁</i>	Patrón 1

ANCESTRO 0080AAA (32-47)

Número	Código	Instrucción	Descripción
32	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
33	1f	divide	Mitosis célula hija
34	14	jmp	Saltar a patron siguiente
35	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
36	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
37	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
38	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
39	05	<i>if</i> _{cx}	Si cx = 0 ejec. sig., sino saltarla
40	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
41	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
42	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
43	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
44	0c	<i>push</i> _{ax}	Poner ax en la pila
45	0d	<i>push</i> _{bx}	Poner bx en la pila
46	0e	<i>push</i> _{cx}	Poner cx en la pila
47	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1

ANCESTRO 0080AAA (48-63)

Número	Código	Instrucción	Descripción
48	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
49	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
50	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
51	1a	<i>mov</i> _{iab}	Memoria[ax] = Memoria[bx]
52	0a	<i>dec</i> _c	cx = cx - 1
53	05	<i>if</i> _{cz}	Si cx = 0 ejec. sig., sino saltarla
54	14	<i>jmp</i>	Saltar a patrón siguiente
55	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
56	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
57	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
58	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
59	08	<i>inc</i> _a	ax = ax + 1
60	09	<i>inc</i> _b	bx = bx + 1
61	14	<i>jmp</i>	Saltar a patrón siguiente
62	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
63	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1

ANCESTRO 0080AAA (64-79)

Número	Código	Instrucción	Descripción
64	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
65	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
66	05	<i>if</i> _{CZ}	Si <i>cx</i> = 0 ejec. sig., sino saltarla
67	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
68	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
69	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
70	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
71	12	<i>pop</i> _{CX}	Sacar de la pila a <i>cx</i>
72	11	<i>pop</i> _{BX}	Sacar de la pila a <i>bx</i>
73	10	<i>pop</i> _{AX}	Sacar de la pila a <i>ax</i>
74	17	<i>ret</i>	Volver de la llamada a procedimiento
75	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
76	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
77	01	<i>nop</i> ₁	Patrón 1
78	00	<i>nop</i> ₀	Patrón 0
79	05	<i>if</i> _{CZ}	Si <i>cx</i> = 0 ejec. sig., sino saltarla

BLOQUES DEL ANCESTRO

IP	ax	bx	cx	dx	Pila	Bloque
108	0	0	4	0	0	Preparación de la copia
114	104	0	4	4	0	
116	100	100	4	4	0	
121	179	100	4	4	0	
122	180	100	4	4	0	
123	180	100	80	4	0	
128	200	100	80	4	133	Embrión
145	200	100	80	4	133/200	Procedimiento de copia
146	200	100	80	4	133/100/200	
147	200	100	80	4	133/80/100/200	
153	200	100	79	4	133/80/100/200	
161	201	101	79	4	133/80/100/200	
153	201	101	78	4	133/80/100/200	
161	202	102	78	4	133/80/100/200	
...	
153	278	178	1	4	133/80/100/200	
161	279	179	1	4	133/80/100/200	
153	279	179	0	4	133/80/100/200	
179	200	100	80	4	133	Vuelta

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huésped) y antiparásito (su huésped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huésped) y antiparásito (su huésped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huésped) y antiparásito (su huésped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huésped) y antiparásito (su huésped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huesped) y antiparásito (su huesped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huesped) y antiparásito (su huesped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huésped) y antiparásito (su huésped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huesped) y antiparásito (su huesped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

ECOLOGÍA EMERGENTE

- Aparecen los primeros parásitos (0045aaa ← 0080aab)
- Surge un ser Inmune a parásitos (0075aab)
- Aparece uno capaz de parasitar a los inmunes (0051aao ← 0045aa) hay un periodo de convivencia 0051aao-0075aab
- Aparición de los hiperparásitos (0080gai)
 - Es a la vez parásito (se aprovecha de su huesped) y antiparásito (su huesped está tratando de parasitarlo a él mismo)
 - No necesita a otro organismo para reproducirse
 - Tiene rebaños de parásitos haciendo tareas de reproducción
- Parásitos hypersociales (0061acg). Solo se reproducen cuando ocurren en agregaciones
- Especie que engaña a los parásitos hypersociales (0027aab)

EJEMPLO DE UN PARÁSITO (0045AAA)

IP	ax	bx	cx	dx	Pila	Bloque
108	0	0	4	0	0	Preparación de la copia
114	104	0	4	4	0	
116	100	100	4	4	0	
121	179	100	4	4	0	
122	180	100	4	4	0	
123	180	100	80	4	0	
128	200	100	80	4	133	Embrión
45	200	100	80	4	133/200	Procedimiento de copia del
46	200	100	80	4	133/100/200	
47	200	100	80	4	133/80/100/200	
53	200	100	79	4	133/80/100/200	
61	201	101	79	4	133/80/100/200	
53	201	101	78	4	133/80/100/200	
61	202	102	78	4	133/80/100/200	
...	
53	278	178	1	4	133/80/100/200	
61	279	179	1	4	133/80/100/200	

- 1 Introducción
- 2 Algoritmos Genéticos
- 3 Computación Evolutiva
- 4 Computación con Inspiración Biológica
- 5 **BIOLOGÍA Y COMPUTACIÓN****
 - Efecto Baldwin
 - Estrategias Evolutivamente Estables
 - El sistema Tierra