

Metodología de codificación de ecosistemas orientada a la simulación numérica.

Antonio Fernández Fernández.

Julio 2007

Metodología de codificación de ecosistemas orientada a la simulación numérica

Antonio Fernández Fernández.

ABSTRACT:

En este trabajo se elabora y presenta una metodología para acometer la codificación efectiva de ecosistemas de complejidad arbitraria, que permite la construcción de sistemas funcionales basados en computadores, destinados al control, la predicción, o a la validación científica de teorías o modelos sobre la ecología..

ÍNDICE

1.	Introducción	5
1.1	La ecología y los sistemas complejos.....	5
1.2	Objetivos	6
1.3	Sistemas científicos de predicción. Modelos computacionales.	6
1.3.1	Clasificación de los oráculos.....	7
1.3.2	Aplicación de los oráculos en ecología.....	8
1.4	Los problemas de notación.....	8
2.	Componentes del oráculo	10
2.1	Grafo de biorrelaciones.Elementos constitutivos	10
2.1.1	Actores:.....	11
2.1.1.1	Caracterización estática.....	11
2.1.1.2	Caracterización dinámica	11
2.1.2	Actividades.....	12
2.1.3	Atribuciones:	13
2.1.4	Afinidades.....	14
2.1.5	Fuentes.....	14
2.1.6	Sumideros.....	15
2.1.7	Factores de economía o limitantes.....	15
2.1.8	Transmutación ecológica	17
2.2	Biocomplejo	18
2.3	Modelos de computación.....	19
2.4	Normalización termofísica.....	19
2.5	Capa de abstracción del computador.....	20
2.6	Interfaz de selección de algoritmos.....	20
2.7	Elementos accidentales.....	20
2.7.1	Inicio y detención de la computación.....	21
2.7.2	Fuentes no autónomas.....	21
2.7.3	Generador de ruido de servicio.....	21
2.7.4	Catástrofes.....	21
2.8	Adaptador de salida de datos.....	22
2.9	Codificación cuantitativa del ecosistema.....	23
2.9.1.1	Transformación logarítmica de los observables.....	27
3.	Aplicaciones.	29
3.1	Hipótesis del modelo de computación.....	29
3.2	Teoremas de determinación de los términos del modelo de computación.....	30
3.3	La ley de Malthus.....	32
3.3.1	Grafo de biorrelaciones.....	32

Computación de ecosistemas.

3.3.2	Modelo de computación. Ecuaciones.....	32
3.4	La ley logística de Verlhus. Limitación por fuentes.....	33
3.4.1	Grafo de biorrelaciones.....	33
3.4.2	Modelo de computación. Ecuaciones.....	33
3.5	Ecuaciones de Lotka-Volterra.....	35
3.5.1	Grafo de biorrelaciones.....	35
3.5.2	Modelo de computación. Ecuaciones.....	35
3.6	Otros ejemplos.....	37
3.6.1	Modelo de saciedad para Lotka Volterra.....	37
3.6.2	Migración difusiva.....	38
3.6.3	Fecundación cruzada.....	39
3.6.4	Ecología de la malaria.....	40
4.	Aportaciones originales.....	41
5.	Direcciones futuras de progreso.....	42
6.	Convenciones y nomenclatura.....	43
7.	Referencias bibliográficas.....	45

1. Introducción

1.1 La ecología y los sistemas complejos

En los últimos años está recibiendo una gran atención el estudio de los sistemas complejos. La popularización de modelos matemáticos simples que exhiben complejidad (ya conocidos por los matemáticos desde los tiempos de Cantor y Poincaré), y sobre todo, el reconocimiento de los patrones de la complejidad por doquier en la naturaleza a partir del trabajo de Mandelbrot [1] han conducido a un desarrollo explosivo de esta ciencia.

Dos son las características paradigmáticas, en cierto modo antagónicas, que definen un sistema como complejo:

- Son altamente refractarios al análisis local de su comportamiento.
- Tienden a adoptar comportamientos globales cooperativos u organizados.

Una tercera característica, que constituye más un *principio de necesidad* que una descripción fenomenológica, es el hecho ampliamente constatado de que es necesario un desequilibrio termodinámico: un gradiente de temperaturas para que puedan emerger los comportamientos complejos. La complejidad es pues, un fenómeno propio de los sistemas abiertos, esencialmente dinámico, cuyas bases físicas deben buscarse en el ámbito de la termodinámica irreversible.

Los sistemas complejos abarcan escalas que comprenden la totalidad de nuestro entorno conocido. Desde la organización a gran escala de las galaxias, gobernada por la interacción gravitatoria y la expansión de Hubble, hasta la organización coherente de materia en un condensado de Bose-Einstein, la presencia de sistemas con comportamiento cooperativo es una constante en nuestra realidad.

Dentro de este margen de distancias, que comprende quizá unas 200 **octavas**, la Biosfera terrestre, se sitúa, vagamente entre el tamaño de una proteína o de un **hidrómero** (unos $10^{-8} m.$), y el tamaño de las mayores estructuras biológicas conocidas que, dejando aparte las excursiones espaciales de *H. Sapiens*, son las migraciones de aves y cetáceos que están en el orden de los $10^7 m.$ Esto nos da para los fenómenos biológicos un rango espacial de unas 50 octavas.

En este margen de escala (y esto quizá sea una apreciación algo sesgada por la posición sospechosamente central de *H. Sapiens* en el mismo), ocurren los fenómenos más complejos y diversos de toda la realidad conocida: los fenómenos biológicos; desde la bioquímica pasando por la ecología hasta la evolución.

Dentro de esta amplia gama de fenómenos, resulta evidente que cuanto más nos acerquemos a la escala humana espacial y temporalmente, más fáciles serán los experimentos, más abundantes las observaciones, más científicas las teorías (es decir más falsabilizables en sentido poperiano) y en definitiva más útiles e importantes las aplicaciones que de las mismas se pudieren derivar.

En este sentido, la ecología demográfica resulta ideal por su cercanía a la escala espacio temporal humana, y su estatus de desarrollo histórico, muy cercano ya a la matematización completa, en un recorrido que se inició con Malthus, y ha adquirido masa crítica recientemente con el trabajo de R. Margalef [19].

Esta son las razones por las que he elegido la ecología demográfica como objeto para este estudio. Tengo la esperanza y la convicción de que el avance en su conocimiento, no sólo aportará luz sobre la globalidad de la ciencia de los sistemas complejos, sino lo que es más importante, nos dotará de métodos de decisión y control que nos permitirán acometer con éxito los tremendos desafíos a los que nuestro propio éxito como seres vivos nos está enfrentando.

1.2 Objetivos

Mis objetivos en este estudio son los siguientes.

- 1) Proponer un modelo de referencia de computación orientado al modelado de ecosistemas.
- 2) Elaborar una metodología que permita en principio reducir a una descripción compuesta de elementos homogéneos cualquier sistema de la ecología demográfica, independientemente de la complejidad del ecosistema y el nivel de detalle que se desee.
- 3) Validar las metodologías descritas generando mediante ejemplos sencillos, los modelos clásicos más conocidos de la ecología demográfica y proponer ejemplos de mayor complejidad para demostrar la potencialidad y viabilidad de la metodología.

1.3 Sistemas científicos de predicción. Modelos computacionales.

Si la ecología constituye el objeto de este trabajo, la teoría de sistemas y los computadores son las herramientas naturales que utilizaré para acometer su estudio.

A lo largo de este trabajo haré una distinción explícita (véase la Figura 1. 1) entre los modelos abstractos y los sistemas físicos que los implementan, que denominaré **oráculos**.

Reservaré el término computador para designar a una máquina versátil cuyo funcionamiento puede cambiarse mediante un programa para implementar cualquier modelo arbitrario. En otras palabras, un computador puede convertirse en una amplia variedad de oráculos cuando se le suministra un modelo particular por mediación de un determinado lenguaje de programación.

Resulta aún más importante distinguir de forma explícita los sistemas que son objeto de estudio, a los que denominaré **objetos enfocados** o 'realidad real', y los sistemas (también por supuesto reales), que implementan modelos destinados a emular el comportamiento de los objetos enfocados, que es lo que hemos denominado oráculos. El comportamiento fenomenológico de un oráculo constituye bajo ciertas convenciones lingüísticas de traducción, normalmente impuestas por un observador, lo que vamos a llamar 'realidad virtual' u '**objeto representado**'.

El objetivo natural de la elaboración de un oráculo predictivo es obtener la máxima adecuación entre la evolución temporal del objeto enfocado y la del objeto representado. Esto significa ofrecer al usuario observador del oráculo la mayor cantidad de información posible sobre la evolución del objeto enfocado, a través del objeto representado.

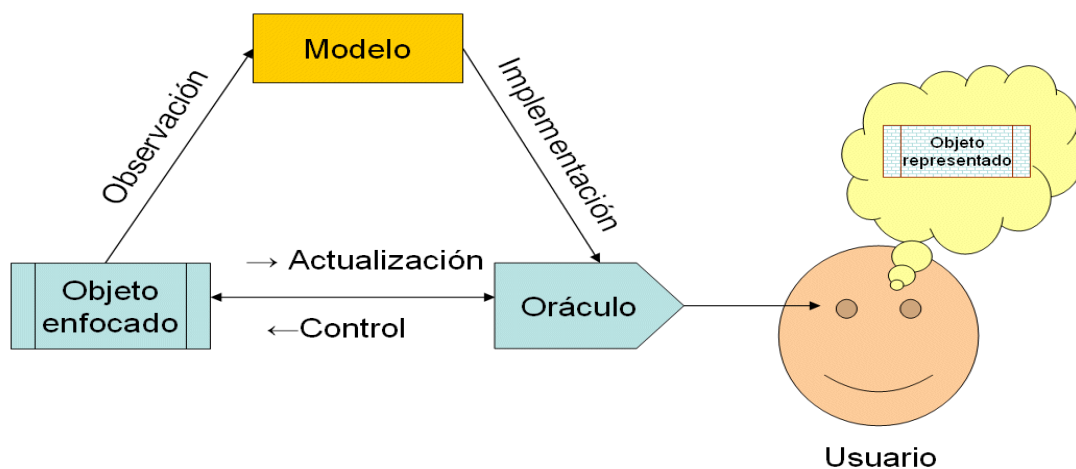


Figura 1. 1 *paradigma objeto-modelo-oráculo*

Computación de ecosistemas.

Es muy importante mantener clara la diferencia entre estos dos mundos (el real y el virtual). Ambos mantienen una correspondencia evidente que se pone de manifiesto a través de unas ciertas convenciones de renormalización (un lenguaje de que establece una correspondencia entre los fenómenos que ocurren en el oráculo y los que ocurren en el objeto bajo estudio), pero las escalas asociadas (sobre todo temporales) en las que suceden los fenómenos que son objeto de esta correspondencia pueden ser, y son en general diferentes.

Fundamentales en esta correspondencia, son los conceptos de tiempos (o mejor fechas) virtuales y reales de un evento.

La fecha real de un evento es el valor numérico que marcan los relojes reales cuando el objeto enfocado produce el evento.

La fecha virtual de un evento es el valor numérico que marca el reloj virtual del oráculo cuando el objeto representado produce el evento (tiene lugar la simulación).

En un oráculo bien diseñado ambos tiempos son iguales. Sin embargo la fecha real en la que se produce el evento físico del oráculo que mantiene la correspondencia semiótica con el evento real que se estudia (lo que se conoce como fecha de computación), no coincide, en general con la fecha real del evento real que se estudia.

La utilización de un oráculo como elemento de predicción o control requiere que los resultados de la predicción para un instante de tiempo determinado estén disponibles antes de que dicho instante llegue a suceder realmente. Ejemplificándolo con un símil meteorológico: a efectos de tomar acciones de control, de nada sirve tener la previsión del tiempo que va a hacer mañana, aunque dicha previsión sea muy precisa, si el tiempo de computación que necesitamos para obtenerla es de una semana.

Esta limitación de tiempos determina, en modelos bien contruidos, la fiabilidad del oráculo. Dicho de otra forma, la falibilidad de un oráculo es la probabilidad de que su tiempo de computación adelante al tiempo real del evento producido.

En la Figura 1. 1, aparece un elemento más: el modelo: Un modelo es una estructura lógica que permite a un sujeto construir un objeto (el oráculo) de cuyo comportamiento espera extraer cierta cantidad de información sobre el comportamiento de otro objeto (objeto enfocado) que por alguna razón resulta de su interés.

Se puede teorizar sobre el hecho de que tanto los observadores, como los oráculos, e incluso los modelos, deberían, desde determinada perspectiva, ser considerados también como objetos susceptibles de ser estudiados; de ser *objetos enfocables*.

Esto plantea ciertos problemas conceptuales, sobre todo en lo que respecta al modelo y al observador. No puede existir un modelo sin un objeto computacional físico que lo realice y es este sentido los modelos son siempre objetos 'reales', aun cuando de alguna forma trascienden al computador en el que son materializados.

1.3.1 Clasificación de los oráculos

Podemos clasificar los oráculos atendiendo a diferentes criterios:

- Por su nivel de conexión con la realidad
 - **Oráculos autónomos.** No refrescan su estado corrigiéndolo con la observación
 - **Oráculos no autónomos.** Corrigen su estado mediante observaciones eventuales del objeto enfocado
 - **Oráculos de control.** Tienen un control acoplado a la realidad que les permite ejercer acciones físicas gestionadas sobre el objeto enfocado.

- Por su ámbito de utilidad:
 - **Oráculos de verificación de hipótesis.** Sirven para verificar (o en su caso falsabilizar) las hipótesis bajo las cuales se ha elaborado un modelo. No necesitan funcionar en tiempo real ya que la verificación se puede hacer utilizando observaciones obtenidas en cualquier fecha.
 - **Oráculos de generación de leyes.** Cuando un modelo está suficientemente contrastado, se puede utilizar un oráculo que lo implemente para realizar experimentos virtuales que permitan descubrir o perfeccionar leyes científicas sin necesidad de recurrir a experimentos reales.
 - **Oráculos de predicción:** Son oráculos conectados al objeto enfocado mediante ciertos elementos de observación con la intención de conjeturar el estado que adoptará el elemento enfocado en un momento posterior.
 - **Oráculos homeostáticos:** Son oráculos de control; que predicen el futuro de ciertos elementos de realidad, y en dependencia con dicha predicción, pueden ejercer diversas acciones de control sobre los mismos, normalmente en el sentido de amortiguar sus fluctuaciones o de optimizar alguna de sus características.

1.3.2 Aplicación de los oráculos en ecología

La aplicación de la teoría de sistemas y de la computación al control de los sistemas ecológicos o biológicos, se va a configurar sin duda a corto o medio plazo (de alguna forma ya lo está haciendo) como una tecnología extraordinariamente potente de control de nuestro entorno.

Desgraciadamente es imposible obtener un beneficio del objeto enfocado: en sentido amplio un *rendimiento termodinámico*, sin realizar una alteración del mismo. Indefectiblemente las acciones de control que efectuamos sobre el entorno con el fin de obtener un beneficio redundan en consecuencias negativas (o como mínimo en incertidumbres) cuando se considera un ámbito espacio temporal mayor.

Estamos hablando pues, de una tecnología demasiado poderosa como para no encerrar peligros. Las acciones de control derivadas de estrategias de optimización planteadas a corto y medio plazo, pueden tener (como ha ocurrido ya en demasiadas ocasiones) consecuencias catastróficas a largo plazo.

Es vital por tanto elaborar una teoría de la decisión asociada a una teoría del valor que impida acometer acciones de gestión torpemente planificadas.

1.4 Los problemas de notación.

Un rasgo general del estudio de los sistemas complejos, y de la ecología en particular, es su carácter multidisciplinar. Habitualmente se requiere la integración de técnicas y conocimientos procedentes de áreas científicas diversas, que históricamente se han desarrollado de forma independiente.

Esta independencia da lugar a que las convenciones: nomenclatura y simbología sean distintas para áreas distintas, de manera que aparecen con frecuencia colisiones entre los vocablos utilizados, las letras que se utilizan en las fórmulas, las definiciones de las funciones, los signos o el significado de ciertas magnitudes.

Otra dificultad, relacionada con la anterior, que he encontrado a la hora de poder acometer los procesos de formalización de la descripción de los ecosistemas ha sido la falta de una base de vocablos específicos para denotar ciertos objetos particulares de estudio de la ecología, o la imprecisión de muchos otros que han sido tomados prestados de otras áreas de conocimiento más o menos cercanas.

Este es un trabajo que pretende que los conceptos que en él se desarrollan a alto nivel puedan plasmarse en programas concretos de ordenador. Esta orientación pragmática hace que sea estrictamente necesario dar un nombre a todas las clases, interfaces y abstracciones que se vayan a

Computación de ecosistemas.

definir; de manera que he decidido que es mucho mejor realizar esa labor ahora que dejarlo para el momento de la programación de bajo nivel.

Aunque han aparecido más términos de los que me gustaría, creo que estos son estrictamente necesarios desde el momento en que: o bien designan conceptos nuevos, o bien sustituyen a términos que designan conceptos ya existentes pero que dan lugar a confusiones con otros cuya distinción resulta importante.

Teniendo esto en cuenta, todos los términos que: o bien son nuevos, o bien se emplean con una significación particular, o son procedentes de un área de conocimiento más o menos específica, se incluyen junto a su definición en el apéndice A. Además, para facilitar la lectura de este trabajo estos términos figuran en **negrita** la primera vez que aparecen en el texto.

2. Componentes del oráculo

En la Figura 2. 1 podemos ver el diagrama de bloques constitutivo del modelo de referencia que propongo para la elaboración de oráculos orientados a la representación de ecosistemas.

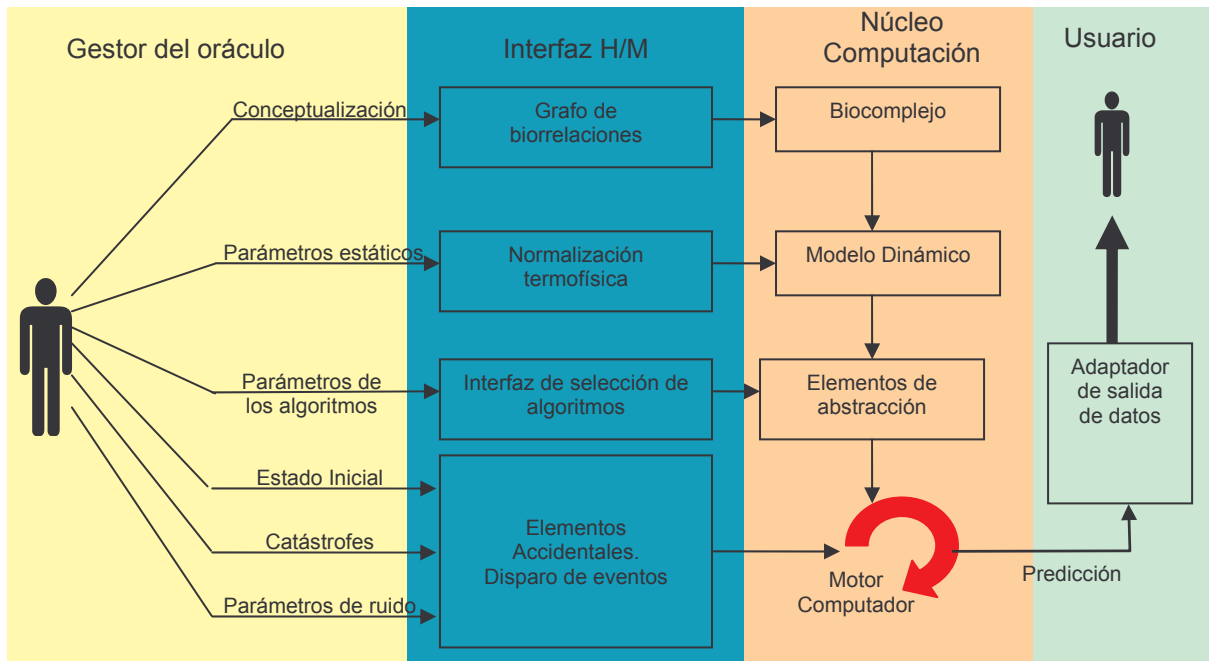


Figura 2. 1 Modelo de referencia del oráculo

Voy a analizar este diagrama detallando cada bloque por separado.

2.1 Grafo de biorrelaciones. Elementos constitutivos

El **grafo de biorrelaciones** es un diagrama que permite capturar los elementos conceptuales básicos de un ecosistema. Está concebido de manera que se independice completamente la 'logica' del ecosistema, de su caracterización cuantitativa, y de los demás aspectos asociados a una realización concreta del oráculo.

En los grafos de biorrelaciones, nos vamos a encontrar una serie de elementos que voy a denominar elementos constitutivos.

La clasificación de los elementos constitutivos en seis categorías (dos tipos de aristas y cuatro tipos de vértices), se muestra en la siguiente tabla.

Vértices	Aristas
Actores	Afinidades
Actividades	Atribuciones
Fuentes	
Sumideros	

Voy a continuación a describir más detalladamente cada uno de ellos.

2.1.1 Actores:

Son los elementos que configuran el estado del ecosistema. Los actores pueden contener exergía, que utilizan para activar o mantener sus relaciones, o para estabilizar sus estructuras de información internas.

En el grafo de biorrelaciones, los actores son vértices que se representan mediante círculos o elipses a los que se conectan un número cualquiera de flechas salientes o entrantes. Dichas flechas no pueden conectar a dos actores directamente.

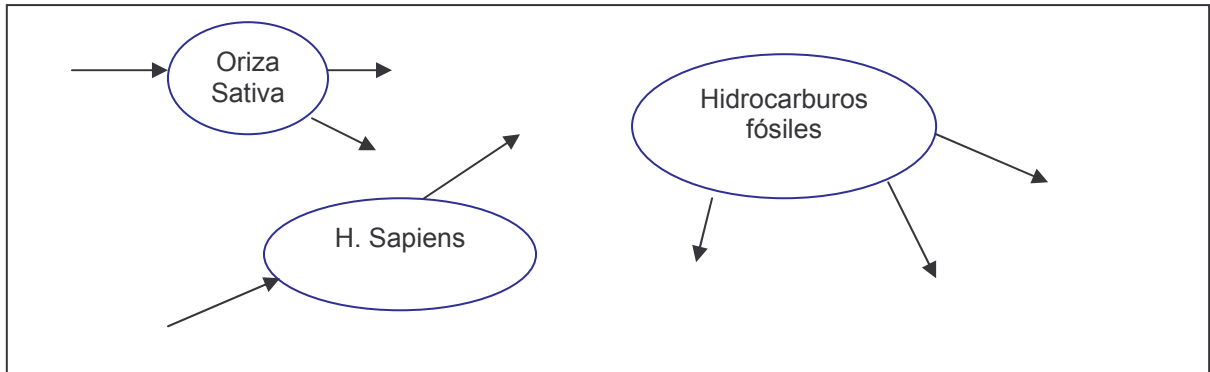


Figura 2. 2 Representación de actores

Voy a continuación a nombrar y definir las estructuras de información que caracterizan a los actores con los nombres que deberían emplearse en la programación de bajo nivel.

2.1.1.1 Caracterización estática.

La caracterización estática de un actor viene dada por todos los elementos de información cuyos valores asociados no cambian durante de la simulación.

Definiciones:

Descriptor

Es cualquiera de los contenedores de información estáticos que caracteriza a un actor

Parámetro fijo.

Se refiere a un valor particular de un descriptor

Identificación.

Es un descriptor numérico irrepitible que identifica unívocamente al actor

Formulario.

Es el conjunto de todos los descriptores que asociado un actor.

Perfil

Conjunto de valores numéricos concretos que toma el formulario

2.1.1.2 Caracterización dinámica

La caracterización dinámica de un actor está constituida por todos los elementos de información cuyos valores asociados pueden cambiar durante la simulación.

Definiciones:

Evaluador

Es cualquiera de los contenedores de información dinámicos que caracteriza a un actor

Estado.

Valor concreto que toma un evaluador o conjunto de evaluadores en un instante de tiempo.

Evaluadores independientes.

Un conjunto de evaluadores es independiente si sus estados no están ligados por ninguna relación algebraica.

El estado completo de un actor puede caracterizarse dando valores a un conjunto mínimo de evaluadores escalares independientes. Los valores de todos los demás evaluadores pueden calcularse a partir de estos.

El número mínimo de evaluadores escalares independientes de un actor es su dimensión.

Urna.

Conjunto completo de evaluadores independientes del estado de un actor.

Encuesta.

Conjunto completo de evaluadores independientes del estado de biocomplejo.

Microestado.

Conjunto particular de valores que toma la encuesta de un biocomplejo. Esta definición es coherente con el sentido que se asigna en mecánica estadística al microestado de un colectivo.

2.1.2 Actividades.

Las actividades son acciones que implican la intervención de uno varios actores y que suponen una modificación del estado del ecosistema. Cada vez que tiene lugar una actividad, se produce una modificación en los actores que han intervenido en el sentido de redistribuir la exergía que contienen o cambiar su estado de alguna otra forma.

Supondremos siempre que dicha redirección es instantánea en tiempo virtual (aunque por supuesto consumirá tiempo de computación) de manera que las actividades, en oposición a los actores, no pueden sufrir ningún tipo de histéresis o memorización de estados que contenga información relevante en tiempo virtual.

Una restricción sintáctica fundamental que voy a imponer a las actividades, es que sólo voy a considerar correctas las interacciones que supongan la aportación de exergía por parte de un máximo de dos actores, (sin menoscabo de que el número de actores que puedan recibir exergía de la actividad sea indeterminado).

Estos actores 'contribuyentes' desempeñan un papel conceptualmente diferente de los demás en la interacción desde el momento en que además de ver alterado su estado por la misma, van a determinar, a partir de sus características, los parámetros de renormalización de la actividad con el tiempo; en definitiva *la tasa de actividad* de la actividad (valga la redundancia).

He arbitrado esta restricción porque la intervención 'activa' simultánea tres o más actores da lugar a incertidumbres de decisión y de causalidad en el modelo.

De alguna forma, la implicación de tres actores simultáneos con efectos sobre el tiempo (a través de la tasa de actividad) no puede describirse matemáticamente con precisión. Una situación que presenta cierto paralelismo con lo que aquí sucede ocurre en problemas clásicos de colisiones elásticas de tres cuerpos y está descrito con detalle en [25].

Por otra parte esta restricción no resulta limitativa en lo que se refiere a la formulación de cualquier sistema desde el momento en que siempre vamos a poder formular estas actividades múltiples descomponiéndolas en varias actividades simples, de forma que esta restricción no supone ninguna limitación fundamental al modelo.

En realidad esta limitación protege al gestor del oráculo en el sentido de impedir la posibilidad de que tenga que enfrentarse a situaciones que no pueda definir de manera única.

Computación de ecosistemas.

Tampoco vamos a considerar sintácticamente correctas las actividades que están directamente conectadas a otras actividades. Dicho de otra forma, la salida de una actividad siempre debe confluir a un actor, para poder concretar los resultados en el tiempo mediante un estado (que la propia actividad no puede tener) que pueda ser memorizado de alguna forma.

En el grafo de biorrelaciones, las actividades son vértices que se representan como un rectángulo en el que entra una o dos flechas (las afinidades) procedentes de uno o dos actores (nunca procedentes de otras actividades), y sale un número indeterminado de flechas hacia otros tantos actores (nunca hacia otras actividades).

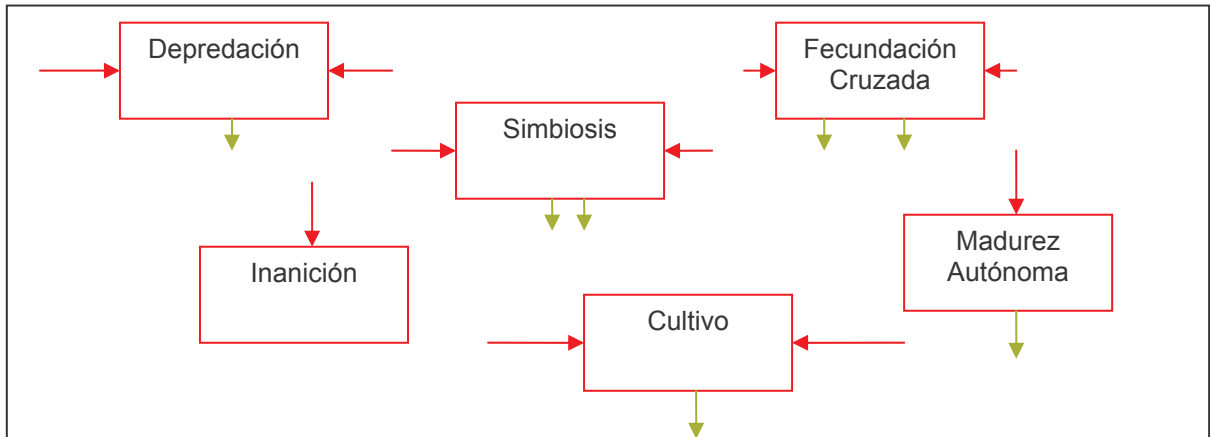


Figura 2.3 Representación de actividades

Con respecto a una actividad concreta, voy a adoptar las siguientes denominaciones:

- Son **actores contribuyentes** los actores que inciden en la actividad.
- Son **actores recolectores** los actores que hay conectados a la salida de la actividad.

Una actividad puede tener uno o dos actores contribuyentes y un número indeterminado de actores recolectores. No existe además impedimento para que un actor desempeñe ambos papeles simultáneamente con respecto a una actividad.

El papel contribuyente/ recolector asignado a un actor es dependiente de la actividad desde la que se lo observa. De esta manera, no existe ningún impedimento para que un actor que es recolector desde una actividad A sea contribuyente desde una actividad B.

Recíprocamente, con respecto a un actor determinado diré que:

- Son **actividades evaporativas** las actividades que están conectadas a través de afinidades con el actor, es decir: las actividades con respecto a las cuales el actor es contribuyente.
- Son **actividades incorporativas** las actividades cuyas atribuciones confluyen hacia el actor, es decir: las actividades respecto a las cuales el actor es recolector.

De la misma forma que antes, los roles (evaporativa o incorporativa) para una actividad no son excluyentes, pero son dependientes del actor particular desde el cual se la observa.

2.1.3 Atribuciones:

Las atribuciones son elementos de información que representan la asignación que se hace a los actores recolectores de los elementos puestos en juego por los actores contribuyentes a través de una determinada actividad. Las atribuciones se representan como flechas que salen de las actividades y van hacia los actores, pudiendo haberlas en cualquier número, tanto saliendo de una actividad como entrando a un actor

En este trabajo, normalmente las atribuciones se representan en color verde.

2.1.4 Afinidades.

Las afinidades son elementos de información que describen la relación entre el estado de los actores que contribuyen a una actividad y la tasa de ocurrencias en el tiempo de la misma.

En el grafo de biorrelaciones, las afinidades se representan mediante flechas que salen de los actores y van hasta la actividad. Como se ha comentado antes, el número máximo de afinidades que confluyen hacia una sola actividad es dos; sin embargo, el número de afinidades que parten de un solo actor no está limitado.

En este trabajo, normalmente las afinidades se representan en color rojo.

2.1.5 Fuentes.

Las fuentes son componentes que suministran exergía al ecosistema a un ritmo (potencia) que está impuesto sólo desde el exterior y no depende del estado interno del ecosistema.

Las fuentes siempre acoplan su exergía hacia el interior del ecosistema mediante una actividad, y al igual que los actores tienen un estado (que puede por ejemplo cuantificar su abundancia instantánea en el ecosistema). Dicho estado es, por supuesto, una variable de estado y no debe confundirse con el ritmo de suministro que va a estar caracterizado: o bien por un conjunto de parámetros fijos, o bien un por un conjunto de valores numéricos impuesto externamente en dependencia con el tiempo..

Si miramos el ecosistema 'desde su exterior' las fuentes tienen el aspecto de actividades, pero miradas 'desde su interior' tienen el aspecto de actores que están disponibles para ofrecer exergía.

Las fuentes se simbolizan mediante una media luna de cuya parte curva salen una o varias flechas dirigidas hacia otras actividades interiores al sistema.

Además están caracterizadas por diferente de la constante que cuantifica su ritmo de suministro (potencia)

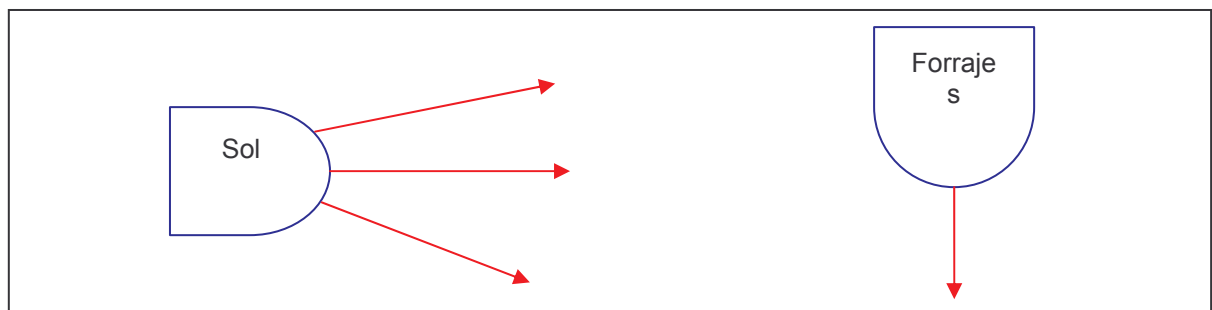


Figura 2.4 Representación de fuentes

Dado que hemos considerado a las actividades como sistemas incapaces de retener materia, energía o información, los balances definidos como

$$\text{Balance} = \frac{\text{Flujo Entrante}}{\text{Flujo Saliente}}$$

siempre deben verificar:

- 1) El balance exergético de cualquier actividad debe ser, menor que la unidad.
- 2) El balance energético de cualquier actividad debe ser exactamente igual a la unidad.

En muchas ocasiones, construir grafos de relaciones en los que aparezcan explícitamente todas las fuentes de exergía, resulta una complicación innecesaria si no estamos expresamente interesados en seguir la ruta de la energía a lo largo del sistema, de manera que, en general podemos relajar la restricción 1, y admitir como válidos esquemas en los que aparecen actividades

Computación de ecosistemas.

que arrojan a un balance de producción exergética superior a la unidad, quedando entendido que dichas actividades ocultan fuentes de exergía que quedarían explicitadas en una descripción más detallada.

Sin embargo, como veremos, la introducción explícita de al menos una fuente es en muchos casos ventajosa en el sentido de que introduce una magnitud 'conectada con la realidad' que fija de alguna forma el rango de escala del espacio de fases e impide ciertos comportamientos indeseables de las simulaciones.

En cuanto a la restricción 2, no se aplica normalmente debido que el flujo que se computa por lo general es el de la exergía. No obstante es muy fácil, si se desea, cuadrar también los balances de energía en las actividades con sólo disponer un sumidero o un actor de contabilización para enviar la energía disipada. Esta última opción puede ser muy útil si se requieren cálculos de emergía (energía incorporada) para los actores.

Desde el punto de vista del oráculo, sólo pueden ser consideradas elementos esenciales aquellas fuentes que estén dotadas de una homeostasis notable, de manera que su variación en el tiempo sea suficientemente poco compleja (en el sentido de Kolmogorov) como para que pueda describirse con suficiente precisión, en el intervalo de tiempo enfocado mediante una estructura de datos cuyo tamaño no aumenta con el tiempo. De otra forma, no sería posible parametrizarla de forma estática durante la simulación.

Por el contrario, las fuentes cuyo ritmo de suministro de exergía hacia el ecosistema no puede ser modelado o descrito desde su propia codificación interna, dada por el conjunto de sus parámetros fijos, deben necesariamente ser consideradas como elementos accidentales, y van a constituir, como veremos luego, una forma conveniente; una puerta abierta en el grafo de biorrelaciones por la que vamos a poder introducir sucesos impuestos desde el exterior hacia el interior del ecosistema.

2.1.6 Sumideros.

Los sumideros son componentes que representan las pérdidas de exergía o las actividades que dan lugar a actores cuya estado no deseamos computar en nuestro sistema. Los sumideros son componentes que ofrecen una simetría conceptual con las fuentes. Si miramos el sistema 'desde fuera' tienen el aspecto de actores que ofrecen energía hacia el exterior, pero desde dentro tienen el aspecto de actividades que simplemente convierten exergía en calor.

Por ello las voy a simbolizar mediante una media luna a cuya parte recta llegan, al igual que a las actividades, una o dos flechas que proceden de actores internos del sistema. Como veremos, en muchas ocasiones resulta útil dotar al modelo de una variable de estado asociada al sumidero que refleje el calor que se ha disipado, aún cuando esta energía haya realmente abandonado el sistema.

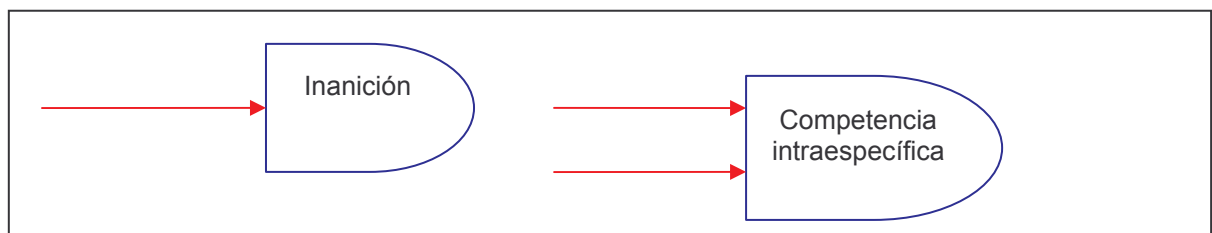


Figura 2. 5 Representación de sumideros

2.1.7 Factores de economía o limitantes.

Un factor de economía es un recurso cuya carencia limita la incorporación de exergía por parte de un actor.

Por ejemplo en ecosistemas con escasez de agua, aunque haya abundancia de luz solar disponible, su potencial exergético no podrá ser asimilado por el ecosistema debido a que los organismos necesitan una proporción mínima de agua en su composición para poder funcionar y captar la luz.

Computación de ecosistemas.

En los ecosistemas vivos los factores de economía pueden ser de muy variada naturaleza:

- **Topométricos:** (espacio o superficie, refugios)
- **Químicos:** (elementos iones o moléculas) (oligoelementos., dióxido de carbono, oxígeno, agua, ión amonio, ión nitrato, ión fosfato, ciertos aminoácidos, vitaminas, etc.)
- **Condicionantes:** Iluminación, oscuridad, Ausencia de ruido (murciélagos, ballenas). Tierra firme.

Matemáticamente la inclusión de N factores de economía, además de la exergía, al modelo supone

1. multiplicar por $N + 1$ el número de grados de libertad del mismo puesto que hay que establecer ecuaciones de evolución de los flujos de cada uno de los factores de economía
2. establecer unas condiciones de contorno sobre los cada uno de los flujos en cada uno de los actores que tenga en cuenta su tolerancia a los cambios en su fracción constitutiva. Como puede intuirse dichas condiciones son difíciles de formular de computar y de validar.

Por fortuna, en muchos ecosistemas no es descabellado suponer que las exigencias constitutivas de los actores son suficientemente rígidas y la escasez de alguno de los factores suficientemente severa como para que la limitación efectiva venga impuesta por un solo factor: el factor dominante. En estos casos, para cada uno de los actores del ecosistema será posible establecer una reformulación que exprese la cantidad del factor dominante que posee en unidades de exergía, con lo que se elimina la necesidad de incluir nuevos grados de libertad. La exergía sobrante que no puede ser asimilada por el sistema, puede contabilizarse enviándola hacia un sumidero.

En sistemas extendidos en el espacio, también se puede acometer dicha renormalización, que ahora va a ser dependiente también del lugar concreto en el que se sitúe el actor, siempre que las interacciones entre actores que están situados en zonas dominadas por factores limitantes distintos sea pequeña.

En sistemas en los que el factor dominante cambia con el tiempo como sequías, ciclos de condicionantes (día/noche, estaciones), puede establecerse una reformulación análoga dependiente del tiempo siempre que los periodos en los que cada factor es dominante puedan ser establecidos con suficiente precisión.

Esto no es muy difícil de hacer si se modela el factor limitante mediante un actor y se calcula en cada instante la cantidad factor disponible a partir de las poblaciones de los demás actores y sus fracciones constitutivas.

Es interesante destacar, y resulta un hecho afortunado para la verosimilitud de estos modelos, el que en los ecosistemas reales, los actores que resultan limitados por determinados factores tiendan a tener escasa o nula interacción con los que están limitados por otros. Así por ejemplo la fauna que está activa durante la noche tiene escasa actividad durante el día, no resulta frecuente encontrar a los pobladores de las zonas desérticas en los humedales, etc. De alguna forma la propia naturaleza selecciona diferentes actores y actividades en ámbitos espaciotemporales dominados por factores de economía diferentes.

Por todas estas razones he concluido en que la consideración de la pluralidad de los factores de economía en el grafo de biorrelaciones supone un coste en esfuerzo y complejidad de los modelos, que no rentabiliza en modo algunos las ventajas que podrían obtenerse, de manera que al menos en lo que se refiere a este estudio, dicha pluralidad no serán tenida en cuenta.

2.1.8 Transmutación ecológica

Con frecuencia, en ecología demográfica se identifica automáticamente el concepto de actor con de *especie*. Esta identificación aún cuando puede ser adecuada en ciertas ocasiones, es en general *errónea*. El concepto de especie es un concepto *genético*, pero en ecología los actores deberían ser clasificados en atención a su perfil ecológico y no en atención a su perfil genético, aún cuando en ocasiones ambos pudieran accidentalmente coincidir.

Esta asunción errónea que pongo aquí de manifiesto, es uno de los factores que dificulta o impide la formulación tradicional de muchos ecosistemas, aún de baja complejidad.

Pensemos en una charca con libélulas y ranas. En el estadio adulto las ranas comen libélulas, pero en el estadio infantil los papeles ecológicos de ambas se invierten de manera que las larvas de libélula comen renacuajos y los papeles de presa y depredador se invierten. Estas relaciones serían muy difíciles de formular mediante la ecología tradicional porque los actores que postularía serían las especies 'rana' y 'libélula', mientras que en nuestro diagrama de biorrelaciones (véase la Figura 2. 6), van a aparecer cuatro actores que son producto de una clasificación a nivel ecológico y no genético. A saber: rana adulta, renacuajo, libélula adulta y larva de libélula; actores de base que ahora sí resultan adecuados para definir el ecosistema.

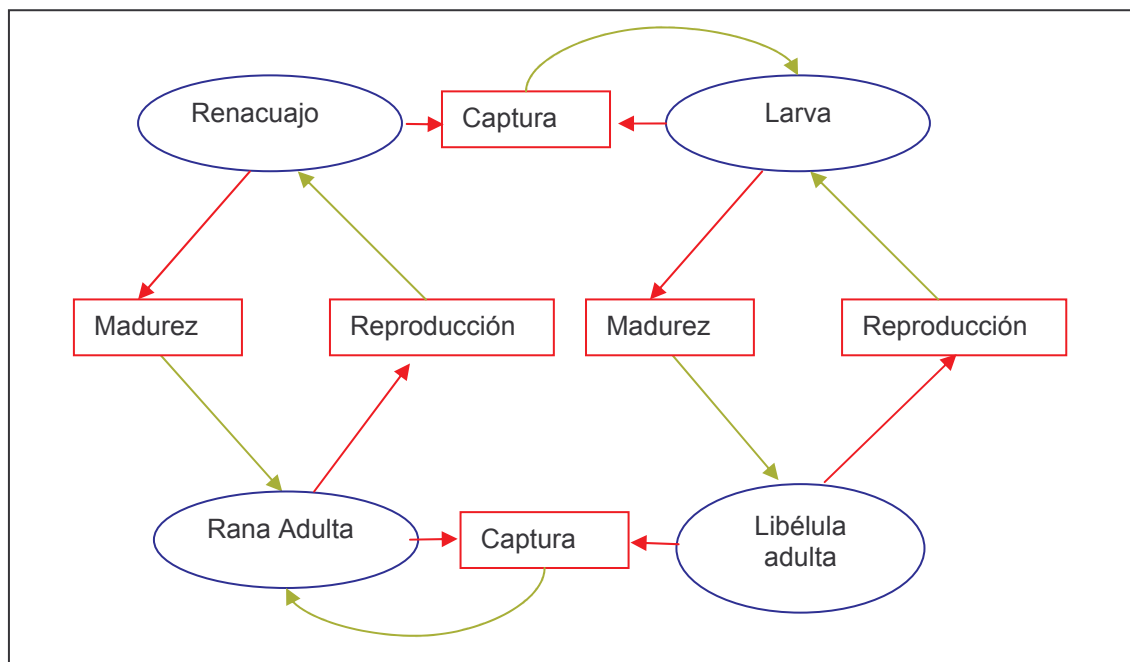


Figura 2. 6 Ranas y libélulas

Esta misma problemática se reitera siempre en que tenemos que definir actores que establecen relaciones más o menos estables con otros actores (parasitismo, simbiosis, etc.). Dichas asociaciones son más que la suma de sus partes [19] por lo que desde el punto de vista tradicional, estos ecosistemas resultan prácticamente imposibles de modelar porque la naturaleza genética de los actores no puede cambiar a consecuencia de un contacto o una actividad ecológica cualquiera. Nosotros supondremos, al contrario, que la naturaleza *ecológica* de los actores sí puede cambiar debido a los efectos de actividad, y llamaremos a este cambio de naturaleza: **transmutación ecológica**.

En los grafos de biorrelaciones, la transmutación ecológica se identifica inmediatamente viendo cuales son los actores recolectores de una determinada actividad que no participan también como actores contribuyentes. En la Figura 2. 6, por ejemplo, se produce transmutación en las actividades de "reproducción" y "madurez, mientras que no se produce transmutación en las actividades de captura.

Computación de ecosistemas.

Este concepto de transmutación ecológica nos va a permitir capturar de forma inmediata la lógica de algunos sistemas de mediana complejidad como los mostrados en los ejemplos del apartado 3.6

2.2 Biocomplejo

La codificación simbólica del grafo de biorrelaciones da lugar a una descripción estática de alto nivel del ecosistema que se llamará **biocomplejo** y que se almacena en la base de datos de núcleo de computación.

Un biocomplejo se puede definir a través de las siguientes estructuras de bases de datos.

Lista de actores: contiene todos identificadores de los todos actores

Actor 1	Actor 2	Actor 3	Actor N
---------	---------	---------	-------	---------

Lista de actividades: Contiene los identificadores de todas las actividades

Actividad 1	Actividad 2	Actividad 3	Actividad N
-------------	-------------	-------------	-------	-------------

Tabla de afinidades: Tiene la siguiente estructura:

Afinidad 1	Afinidad 2	Afinidad 3	..... .....	Afinidad N
Actor Origen1	Actor Origen 2	Actor Origen 3	..... .....	Actor Origen N
Actividad Destino 1	Actividad Destino 2	Actividad Destino 3	..... .....	Actividad Destino N

Tabla de atribuciones: Tiene la siguiente estructura:

Atribución 1	Atribución 2	Atribución 3	..... .....	Atribución N
Actividad Origen1	Actividad Origen 2	Actividad Origen 3	..... .....	Actividad Origen N
Actor Destino 1	Actor Destino 2	Actor Destino 3	..... .....	Actor Destino N

2.3 Modelos de computación.

Los modelos de computación son los modelos matemáticos concretos sobre los que se define a nivel de funcionamiento el oráculo.

La selección de uno de estos modelos, junto a la especificación concreta de los valores cuantitativos de los parámetros fijos, determina completamente la intención del gestor del oráculo, siendo las demás capas de proceso, en cierto modo opacas o independientes del gestor, en el sentido de que por debajo de este nivel, las capas de computación están más dedicadas al “cómo se hace” que al “qué se hace”.

Fundamentalmente podemos distinguir los siguientes tipos de motores de computación.

- Modelos de tiempo continuo.
 - **VEDO** Vector (sistema vectorizable) de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias
 - **VEDP** Vector (sistema vectorizable) de Ecuaciones Diferenciales Parciales
- Modelos de tiempo discreto de paso fijo
 - **VEDD** Vector (sistema vectorizable) de Ecuaciones Diferenciales Discretas
- Modelos de tiempo discreto de paso arbitrario
 - Orientados a eventos.
 - Redes de juego sobre grafos.

2.4 Normalización termofísica.

Este bloque se fundamenta sobre un marco teórico que va a establecer un conjunto de normalizaciones sobre todas las magnitudes que se introduzcan al oráculo como parámetros fijos.

El objetivo dotar a dichos parámetros de una semántica que sea independiente de las escalas de espacio, tiempo, y energía en las que se sitúa el del ecosistema. En particular se intentará independizar el significado de los parámetros fijos de la dimensión (fractal) del espacio biotópico en el que se desarrollan las actividades.

Siempre que sea posible, por tanto, se intentarán expresar todos los parámetros que definen el sistema en unidades puras de información.

Para lograr este objetivo se va a utilizar como marco de referencia a la mecánica estadística (ME). Las conclusiones de esta teoría van a determinar cual es el nivel de información cero. A partir de esta referencia de información cero, que caracterizaría al ecosistema que sería de esperar si éste fuese un sistema cerrado y obedeciese a la ME, vamos a obtener un sistema particular de unidades de medida en el que se van a poder expresar los parámetros y afinidades como factores de escala positivos susceptibles de ser convertidos en unidades de información mediante la aplicación de transformaciones logarítmicas.

Dado que la complejidad de esta tarea excede el ámbito de este trabajo, no la abordaré aquí, quedando planteada como objetivo para la elaboración de una Tesis Doctoral.

2.5 Capa de abstracción del computador.

Los elementos de abstracción del computador son los elementos que permiten independizar la constitución particular del motor de computación, del modelo de computación elegido para implementar el oráculo.

Por ejemplo, si el computador es de tiempo continuo (analógico), hay que convertir el modelo de computación en un VEDO.

El caso más frecuente que nos vamos a encontrar es que el computador sea convencional (digital y de tiempo discreto), y el modelo de computación sea un VEDO. La capa de abstracción tiene que implementar los algoritmos numéricos de integración de las ecuaciones diferenciales. Las alternativas algorítmicas más utilizadas son:

- Euler
- (Runge Kutta,
- Adams Bashforth Moulton
- otros

Estos algoritmos pueden además combinarse con técnicas de predicción-corrección para mejorar sus características.

Otro caso interesante es cuando el modelo de computación es el orientado a eventos. En este caso, tenemos dos alternativas básicas.

- a) Utilizar un computador convencional, en cuyo caso hay que disponer una capa de abstracción que implemente un motor de causalidad (emulador de causalidad virtual) que sea capaz de ordenar en el tiempo las fechas de los eventos virtuales disparados por cada actividad. Esta opción sin duda la más barata, y permite además que el motor sea completamente independiente de la aplicación.
- b) Utilizar Hardware dedicado para implementar directamente el modelo de computación. Esta opción es sin duda la más eficiente, pero es cara y poco flexible.
- c) Utilizar sistemas multiproceso con elementos convencionales conectados a través de redes de comunicación estándar (TCP/IP sobre Ethernet o similar). Esta opción combina de alguna forma las ventajas de las anteriores, y permite plantear un compromiso de optimización en el diseño.

2.6 Interfaz de selección de algoritmos.

Este bloque es sencillamente una interfaz H/M que ofrece al gestor la posibilidad de elegir el algoritmo de abstracción que desea utilizar, así como los valores de los parámetros (paso de simulación, precisión requerida, etc.).

2.7 Elementos accidentales.

Los elementos accidentales son factores cuya concreción resulta ajena a la dinámica interna establecida por el grafo de biorrelaciones. Es decir, son elementos que se imponen al modelo, no en función de su dinámica interna sino desde 'fuera del ecosistema'.

La inserción de elementos accidentales, además de ser preceptiva para poder elaborar oráculos físicamente realizables, resulta de gran utilidad para la evaluación de factores que por una u otra razón no pueden ser incluidos en la dinámica propia del modelo.

Computación de ecosistemas.

Son elementos accidentales los siguientes:

2.7.1 Inicio y detención de la computación.

Este elemento debe contener parámetros los estados iniciales del sistema, así como el valor de la fecha virtual de inicio de la computación y las condiciones de detención de la simulación (fecha de final de simulación o condiciones internas de interrupción)

2.7.2 Fuentes no autónomas.

Permiten introducir alteraciones en el ecosistema a través de fuentes que figuran en el grafo de biorrelaciones. Este elemento debe contener la especificación en el tiempo del estado que ofrecerá la fuente hacia el ecosistema. Esto puede hacerse de dos formas: Conteniendo directamente una fórmula o una tabla que genere estado en función del tiempo (fuentes deterministas) o bien conteniendo ciertos parámetros de ruido que permitan generar el estado a partir de una fuente de ruido durante la simulación.

Las fuentes no autónomas resultan ideales para modelar

- Ciclos externos (Astronómicos, climáticos, etc.)
- Ciclos biológicos cuando no se quiere modelar directamente el proceso de generación del ciclo en el modelo de computación.
- Actores cuya escala de evolución temporal es demasiado rápida como para poder dirigirla con el modelo de computación del oráculo. Estos actores se van a modelar típicamente con fuentes estocásticas

2.7.3 Generador de ruido de servicio.

Vamos a considerar también como elemento accidental el generador de ruido de servicio, que permite a los actores añadir ruido a su estado aunque dicha adición esté totalmente determinada por sus parámetros fijos. Esto se hace así para dar al gestor del oráculo la posibilidad de cambiar desde fuera el algoritmo particular de generación de números aleatorios que se va a utilizar en la simulación.

2.7.4 Catástrofes.

Las modelos de catástrofes son modificaciones que alteran el estado del oráculo de forma puntual en determinados instantes de tiempo.

Las catástrofes se van a especificar mediante una tabla de cuatro columnas (además del identificador), según el siguiente prototipo

Identificador	Fecha de activación (aaaammddhhmmss)	Tipo ("R" ó "I" según se describe más abajo)	estructura con sus elementos o apuntador
Erupción Karakatoa	188302621324370000	R	{{A1,R1},{A2,R2},.....}
Inicio Computación	200704232314873293	I	{Condiciones Iniciales} {{A1,C11},{A2,C12}...}
Diluvio Universal	-30001223112345000	I	{{A1,2},{A2,2}{A3,2}..... }
Aplicación pesticida	20070423231487329	R	{{A1, I1},{A2,I2}...}

Computación de ecosistemas.

Vamos a considerar dos tipos: de catástrofes

Renormalizaciones:

En las renormalizaciones (catástrofes “R”) que ocurren en fecha t_c , el estado en instante de fecha t_c^+ se recalcula, en función del estado en el instante anterior t_c^- y los parámetros P de la renormalización.

$$X(t^+) = C(X(t^-), P_C) \quad \text{Eq (2. 1)}$$

La descripción de cada catástrofe debe contener la especificación de los parámetros P_C y de la función $C(\bullet, \bullet)$. Con frecuencia la función es una división de determinados estados por un factor.

Imposiciones:

En las imposiciones, (catástrofes “I”) que ocurren en fecha t_c el estado en el tiempo t_c^+ se impone directamente y se cambia su valor al indicado por la catástrofe.

$$X(t_c^+) = X_C \quad \text{Eq (2. 2)}$$

Al igual que las fuentes no autónomas, las catástrofes pueden, dependiendo de su mecanismo de generación, ser deterministas o estocásticas.

Los modelos de catástrofes resultan útiles para:

- Simular acciones cuya escala temporal es demasiado grande en relación con el tiempo de de la simulación, como:
 - Sucesos Geológicos
 - Factores metereológicos,
 - Sucesos astronómicos
 - Sucesos exobiológicos (Alteraciones biológicas procedentes del exterior del ecosistema, plagas,)
- Refreshar los estados con el resultado de las observaciones en los oráculos de observación o en los oráculos de control.
- Realizar experimentos virtuales para predecir los impactos que una determinada acción de control tiene sobre la evolución del ecosistema.
- Evaluar usando el oráculo los efectos de sucesos que pudieren tener lugar en el sistemas reales.

2.8 Adaptador de salida de datos.

Este elemento tiene como función transformar los datos de la salida del oráculo de manera que la información que se ofrezca al usuario sea:

Significativa: La información que se produce ha de estar claramente asociada a una semántica bien definida.

Inteligible: El tiempo de adquisición de los datos por el usuario debe ser lo más corto posible. En este sentido son mejores los datos expresados en forma gráfica que los numéricos.

Prudente: Los datos deben proporcionarse de manera que su calidad pueda conocida por el usuario. (Se debe adjuntar o superponer también información sobre su rango de validez, precisión y fiabilidad).

Computación de ecosistemas.

Concisa. Se deben eliminar las redundancias y filtrar todos los datos que no interesen.

Accesible. Se deben poder recuperar los datos relativos a cualquier fecha virtual dentro del intervalo de interés.

2.9 Codificación cuantitativa del ecosistema.

Este apartado no corresponde a ningún bloque funcional de la Figura 2. 1, sino que se refiere de forma general a la semántica de los valores numéricos que van a definir el perfil y el estado del ecosistema.

Tanto el perfil, como el estado del oráculo se codifican mediante valores numéricos que tienen una correspondencia conceptual directa con magnitudes susceptibles de ser medidas en el ecosistema enfocado, y que en consideración a esta correspondencia voy a llamar observables.

En definitiva, un observable es cualquier valor numérico contemplado en el modelo que es susceptible de ser contrastado con la observación del sistema enfocado.

Podemos considerar entonces a los observables como operadores que aplicados a un conjunto de elementos del ecosistema dan lugar a un valor o a una estructura numérica.

Voy a representar los observables actuando sobre los elementos del ecosistema de dos formas.

- 1) Con el nombre del observable y a continuación entre corchetes el nombre del elemento
- 2) Cuando los elementos estén numerados, con el nombre del observable y el número del elemento como subíndice.

Ejemplos:

$$\begin{aligned} \text{Edad}[\text{Dumbo}] &= 6.2 \times 10^7 \text{ s.} \\ \text{Masa}[\text{Hormiga}] &= 1.2 \times 10^{-6} \text{ kg.} \\ \text{Duracion}[\text{Pino}] &= 3.1 \times 10^9 \text{ s.} \end{aligned}$$

O bien si los elementos están ordenados de manera que:

$$\{\text{Elefante}, \text{Hormiga}, \text{Pino}, \dots\} \equiv \{1, 2, 3, \dots\}$$

Podemos decir también que

$$\begin{aligned} \text{Edad}_1 &= 6.2 \times 10^7 \text{ s.} \\ \text{Masa}_2 &= 1.2 \times 10^{-6} \text{ kg.} \\ \text{Duracion}_3 &= 3.1 \times 10^9 \text{ s.} \end{aligned}$$

Esta segunda forma es más adecuada cuando la naturaleza de los elementos está clara y queremos hacer énfasis en las magnitudes, mientras que la primera es mejor cuando tenemos varias clases de elementos mezclados y queremos especificar, por ejemplo a que tipo, o a que elementos en concreto nos estamos refiriendo.

Los observadores más comunes que vamos a manejar en este estudio; y algunos más que se establecen desde ahora con el objetivo de asentar formalmente el desarrollo de la tesis (y en especial los temas relativos al apartado 2.4 Normalización termofísica), son los que pueden verse en la tabla. Los números entre paréntesis se refieren a comentarios que se incluyen debajo.

Observable	Símbolo	Aplicable a	Unidades
Cardinal (1)	$N[\bullet], N_i$	Actores, conjuntos,	Adimensional

Computación de ecosistemas.

Observable	Símbolo	Aplicable a	Unidades
		Ecosistemas	
Exergía(2)	$X[\bullet], X_i$	Actores, Ecosistemas	<i>jul.</i>
Diámetro(3)	$\phi[\bullet], \phi_i$	Actores, biotopos. Ecosistemas	<i>m.</i>
Lebesguiano (4)	$I[\bullet], I_i$	Actores, biotopos	$1\text{leb.} = (1m)^\mu$
Densidad de cardinal (5)	$n[\bullet], n_i$	Actores	leb^{-1}
Densidad de exergía (6)	$x[\bullet], x_i$	Actores	$\text{jul.}\text{leb}^{-1}$
Masa (7)	$M[\bullet], M_i$	Actores	<i>kg.</i>
Densidad de masa (8)	$m[\bullet], m_i$	Actores	leb^{-1}
Dimensión fractal (9)	$\mu[\bullet]$	Actores, Biotopos, series temporales o estados colectivos de ecosistemas	Adimensional
Coefficiente de reparto(10)	$\beta[\bullet], \beta_i$	Atribuciones	Adimensional
Tasa (11)	$X[\bullet], X_i$	Actividades	<i>Hz.</i> , s^{-1}
Semitasa(12)	$\alpha[\bullet], \alpha_i$	Afinidades	$\sqrt{\text{Hz.}} s^{-1/2}$
Entropía(13)	$S[\bullet], S_i$	Estados definidos por distribuciones normalizadas Ecosistemas	<i>bit.</i> <i>nep.</i> $\frac{\text{jul.}}{^\circ K.}$
Temperatura (14)	$\theta[\bullet], \theta_i$	Actores, fuentes, sumideros	$\text{jul.}\text{bit}^{-1}$ $^\circ K.$
Factor de Calidad. (15)	$Q[\bullet], Q_i$	Actores, ecosistemas	<i>s.</i>

Tabla 2. 7 Observadores más frecuentes

- 1) El cardinal es número de elementos que tiene un conjunto. Aplicado a la ecología suele significar el número de individuos que contiene un actor.
- 2) En este estudio, la exergía es el observable más importante de un ecosistema. La exergía es la energía útil (susceptible de ser convertida en trabajo) que contiene un actor. La exergía puede ser utilizada por una actor para realizar sus actividades, o ser cedida a otras partes del ecosistema.

Exergía = Energía Libre + Energía Cinética + Energía potencial Gravitatoria

La exergía de un actor renormaliza con el cardinal del actor a través de un parámetro fijo que es la exergía unitaria media por individuo y se simboliza como $XU[\bullet]$.

Computación de ecosistemas.

El promedio temporal de la exergía total que contiene un ecosistema se puede obtener de forma aditiva a partir de sus componentes y es uno de los parámetros fundamentales característicos del mismo.

- 3) Voy a llamar diámetro a una medida de la longitud de un objeto, realizada de acuerdo con un cierto conjunto de convenciones de medida.
- 4) Voy a utilizar la palabra **lebesguiano**, para designar (en una sola palabra por motivos de economía en la programación) la medida de lebesgue de un conjunto. De esta manera no se explicita la diferencia entre áreas, volúmenes, etc., y se independizan las descripciones de la dimensión (fractal) de los objetos con los que estamos trabajando. Defino asimismo la unidad de medida del lebesguiano como el lebesgue, siendo $1 \text{ leb.} = (1m)^\mu$ en donde μ es la dimensión (fractal) del objeto.

El lebesguiano es una medida topométrica del Interior de un conjunto, y por ello he escogido la simbología $I[\bullet]$ para designar al observable.

- 5) La densidad de cardinal es el número de elementos individuales que contiene un actor dividido por el lebesguiano del biotopo en el que está definido.
- 6) La densidad de exergía es la exergía del actor dividida por el lebesguiano del biotopo en el que está definido.
- 7) Normalmente este observable se aplica a actores individuales, cuyas partes se desplazan coherentemente en el espacio, y se refiere a la inercia asociada a este movimiento (masa locomotriz). Por lo general este observable renormaliza con el lebesguiano del actor individual a través de un parámetro fijo que es su densidad específica. En ecología y si la dimensión del actor individual es 3 esta densidad suele ser muy cercana a la del agua.
- 8) Densidad de masa. Es la masa del actor dividida por el lebesguiano del biotopo en el que está definido el actor.
- 9) Dimensión (fractal). Sirve para definir el parámetro μ al que se refieren las unidades del lebesguiano de un actor o de un biotopo.

También tiene aplicación para estimar 'el tamaño' en unidades de información de un estado estacionario definido por un atractor A en el espacio de fases, ya que existe una relación entre la dimensión del atractor $\mu[A]$, su diámetro $\phi[A]$, la cantidad de información $S[A]$ que se requiere para especificar un estado concreto dentro del mismo con un cierto error ε .

$$S[A] \approx \mu[A] \log_2 \left(\frac{\phi[A]}{\varepsilon} \right) \quad \text{Eq (2. 3)}$$

- 10) Los coeficientes de reparto son propiedades de las atribuciones e indican cual es la fracción de la exergía que ha sido puesta en juego en una actividad concreta, que se transmuta hacia un determinado actor.
- 11) La tasa es el número medio de veces que ocurre una determinada actividad en la unidad de tiempo. Sus unidades son pues las mismas que las de una frecuencia.
- 12) La **semitasa** o con más generalidad, tasa parcial es una propiedad de las afinidades. En determinados modelos, la tasa de una actividad se obtiene de forma proporcional al producto de las semitasas de las afinidades que confluyen en la actividad. Dado que este producto ha de tener unidades de frecuencia según el punto anterior, la semitasa ha de tener, bajo la hipótesis de que se consideren simétricas las dos afinidades con respecto a la actividad, las mismas unidades que la raíz cuadrada de una frecuencia.

Computación de ecosistemas.

- 13) Entropía. Tiene sentido para actores que contienen estados U definidos por funciones de distribución normalizadas $\rho_i[U]$, que cumplen que: $\sum_i \rho_i[U] = 1$; por ejemplo, distribuciones dependientes de la edad o la exergía individual de los componentes del actor. En estas ocasiones, el observable de entropía sobre el estado U se puede calcular (en unidades de bit.) como.

$$S[U] \approx \sum_i p_i \log_2(p_i) \quad \text{Eq (2. 4)}$$

También se pueden calcular entropías para ecosistemas completos, a partir del conocimiento de las distribuciones de población, una vez normalizadas, de los actores que los componen.

Por ejemplo, para la exergía $X[\bullet]$ se define el observable asociado de entropía como:

$$S[X[\{\text{actores}\}]] = \sum_{\text{actor}} (\bar{X}[\{\text{actor}\}] \log_2 \bar{X}[\{\text{actor}\}]) \quad \text{Eq (2. 5)}$$

En donde se ha utilizado la exergía normalizada al total del ecosistema

$$\bar{X}[\bullet] = \frac{X[\bullet]}{X} \quad \text{con} \quad X = \sum_{\text{actor}} X[\text{actor}] \quad \text{Eq (2. 6)}$$

Dependiendo del observable que se elija para establecer las poblaciones (corrientemente: o bien $X[\bullet]$, o bien $x[\bullet]$, o bien $N[\bullet]$, o bien $n[\bullet]$) se van a obtener diferentes valores de la entropía que por lo general no renormalizan entre sí. Esto quiere decir que estos (normalmente cuatro) observables contienen informaciones diferentes del sistema, Cada uno de ellos evalúa la cantidad de información que se necesita para codificar el estado del ecosistema bajo unas hipótesis de clasificación diferentes. Estos varios observadores de entropía, y su evolución en el tiempo, se van a constituir como observables fundamentales que van a caracterizar el ecosistema de forma global. En general denotaré a cada uno de estas entropías (en unidades de bit.) como:

$$S_x[\text{ecosistema}] \equiv S[X[\{\text{actores}\}]]$$

$$S_x[\text{ecosistema}] \equiv S[x[\{\text{actores}\}]]$$

$$S_N[\text{ecosistema}] \equiv S[N[\{\text{actores}\}]]$$

$$S_n[\text{ecosistema}] \equiv S[n[\{\text{actores}\}]]$$

- 14) Temperaturas. La temperatura es una magnitud que no está bien definida en un sistema que no está en equilibrio. Esto significa que no existe un protocolo único de medición o de asignación de la misma a los elementos de un ecosistema. Sin embargo, cuando se aborde la tarea de la renormalización termofísica aludida en el apartado 2.4 de este trabajo, se aprovecharán sus unidades y filosofía de definición para establecer ciertos parámetros calificativos de los actores que van a compartir sus unidades y que por ello denominaré de forma genérica temperaturas.

Denotaré estas 'temperaturas' con el símbolo $\theta[\bullet]$ para distinguirlas del símbolo T que reservo para la duración de un objeto.

- 15) Factor de calidad. El factor de calidad de es un concepto heredado del electromagnetismo. El factor de calidad es igual al cociente entre la exergía y la potencia disipada por un actor o un ecosistema, tiene unidades de tiempo, y está relacionado con la eficiencia del sistema como acumulador de exergía.

Computación de ecosistemas.

El factor de calidad de un ecosistema y su evolución en el tiempo define, junto a la exergía y las entropías antes definidas que se consideren pertinentes, el macroestado de un ecosistema.

2.9.1.1 Transformación logarítmica de los observables.

Vamos a denotar el logaritmo de un observable positivo añadiendo una 'L' al final del nombre del observable. Así por ejemplo:

$$XL[\bullet] = \log(X[\bullet])$$

... denota como $XL[\bullet]$ al logaritmo del observable exergía.

En general es conveniente trabajar de forma rutinaria en las computaciones con los logaritmos de los observables positivos, en lugar de con los propios observables. exceptuando a las entropías que son valores sobre los que ya se ha tomado el logaritmo, por los siguientes motivos.

- 1) Para poder representar adecuadamente los enormes rangos de escala que pueden adoptar los valores numéricos de las variables de estado o de los parámetros que pueden tener variaciones, como hemos visto en la introducción, del orden de hasta las 50 octavas
- 2) Para que la formulación local de los sistemas que sigue la ley de Malthus pueda expresarse de forma más sencilla. Esto tiene sentido desde el momento en que esta ley es básica porque va a gobernar siempre la evolución de los actores a escalas suficientemente pequeñas de tiempo. La ley de Malthus se expresa mediante la ley diferencial:

$$\frac{dX[\bullet](t)}{dt} = rX[\bullet](t) \quad \text{Eq (2. 7)}$$

Haciendo el cambio de observable $XL[\bullet] = \ln(X[\bullet])$ resulta la ley más sencilla:

$$\frac{dXL[\bullet](t)}{dt} = r \approx cte. \quad \text{Eq (2. 8)}$$

A escalas mayores de tiempo, la Eq (2. 8)Eq (2. 8)Eq (2. 8)Eq (2. 8)Eq (2. 8) permite definir la tasa de reproducción instantánea $r(t)$ como:

$$r(t) = \frac{dXL[\bullet](t)}{dt} \quad \text{Eq (2. 9)}$$

- 3) Para impedir el artefacto numérico de los saltos de cuadrante cuando se utilizan modelos continuos. (ver la Figura 2. 8) Este artefacto se produce porque debido al tamaño finito del paso de integración se estima la pendiente de forma incorrecta, y si estamos cerca del 0 en una variable de estado, es posible que la trayectoria estimada salte de cuadrante hacia un lugar en el que los valores de alguna variable de estado que debería ser positiva se hace negativa.

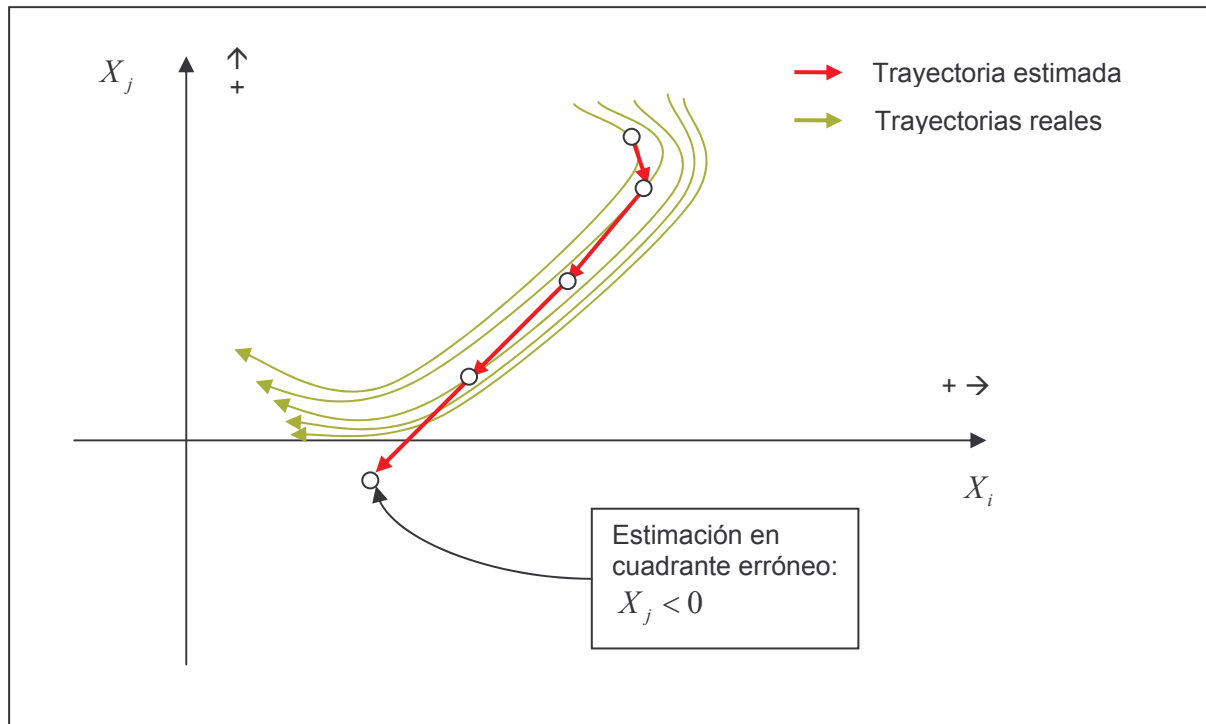


Figura 2. 8 *Artefacto de salto de cuadrante*

- 4) Para adaptar la representación de cada parámetro o variable de estado a la escala del fenómeno que representa. Esto es indispensable en sistemas en los que pueden convivir actores cuyas escalas sean muy distintas.
- 5) Para aumentar la velocidad de la computación cuando se utilizan capas de abstracción de modelos de computación continuos VEDO, VEDP, etc., que utilizan algoritmos de integración de paso variable, para evitar que la aparición de valores muy grandes de las derivadas de las variables de estado dé lugar a una ralentización de la computación, a veces drásticas.

3. Aplicaciones.

En este apartado voy a incluir algunos ejemplos y aplicaciones de la metodología expuesta. Empezaré por definir las hipótesis de un modelo de computación sencillo basado en VEDO.

3.1 Hipótesis del modelo de computación.

Las hipótesis que nos van a definir el paso del biocomplejo al modelo de computación van a ser las siguientes.

- 1) El estado de cada actor va a quedar, a lo largo del tiempo, determinado por un solo escalar positivo: su exergía $X[actor](t)$
- 2) El perfil de cada actor contiene, además de su identificación, otro único descriptor, su exergía unitaria o exergía por individuo $XU[actor]$, de manera que se puede calcular el cardinal del actor como:

$$N[actor](t) = \frac{X[actor](t)}{XU[actor]}$$

- 3) Las afinidades quedan especificadas por un solo escalar positivo $\alpha[actor, actividad]$
- 4) Las atribuciones van a quedar especificadas por otro escalar positivo, la tasa de reparto de la actividad $\beta[actividad, actor]$, que indica que fracción de la exergía puesta en juego en la actividad se redirige hacia el actor recolector de la actividad.
- 5) La tasa de actividad de cualquier actividad $\lambda(A)$ a la que llega una sola afinidad procedente de un actor: "1", cuya semitasa es $\alpha["1"]$, va a venir dada por la expresión:

$$\lambda[A](t) = \alpha["1"]^2 \frac{X["1"]}{XU["1"]} = \alpha["1"]^2 N["1"](t) \quad \text{Eq (3. 1)}$$

- 6) La tasa de actividad de cualquier actividad $\lambda(A)$ a la que llegan dos afinidades procedentes de dos actores "1" y "2", cuyas semitasas son $\alpha["1"]$ y $\alpha["2"]$, va a venir dada por la expresión:

$$\lambda[A](t) = \alpha["1"]\alpha["2"] \frac{X["1"](t)X["2"](t)}{XU["1"]XU["2"]} = \alpha["1"]\alpha["2"] N["1"](t)N["2"](t) \quad \text{Eq (3. 2)}$$

- 7) El valor de exergía que cada actor contribuyente aporta a una actividad, cada vez que ésta tiene lugar es igual al valor de su exergía por individuo: $XU[actor]$; por tanto la exergía puesta en juego por la actividad cada vez que se produce es:
 - a. Para actividades con un solo contribuyente "1";:

$$X[A] = XU("1")$$

- b. Para actividades con dos contribuyentes: "1" y "2":

$$X[A] = XU("1") + XU("2")$$

- 8) El cardinal de todos los actores es un número mucho mayor que la unidad de forma que tiene sentido la aproximación continua. Por ello el modelo de computación es un VEDO cuyos elementos se pueden calcular utilizando los siguientes teoremas diferenciales aparecen en el siguiente apartado, y que se deducen directamente de 6), 7) y 8)
- 9) Las fuentes tienen asociado un actor que contiene un término de suministro de exergía (potencia energética "P" constante).

3.2 Teoremas de determinación de los términos del modelo de computación

A partir de las hipótesis establecidas en el apartado anterior, podemos calcular todos los elementos del VEDO. En general el VEDO estará constituido por una ecuación diferencial ordinaria por cada actor, y dicha ecuación contendrá un término por cada una de las flechas (atribuciones o afinidades) que están conectadas al mismo.

Las formas funcionales de dichos términos van a venir dadas por los siguientes teoremas:

- 1) La disminución en la exergía por unidad de tiempo de un actor "1" debido a la contribución en una actividad (o sumidero) en la que es el único contribuyente vale:

$$\Delta \frac{dX["1"](t)}{dt} = -XU["1"]\alpha["1"]^2 N["1"] = -\alpha["1"]^2 X["1"](t) \quad \text{Eq (3. 3)}$$

- 2) La disminución en la exergía por unidad de tiempo de un actor "1" debido a la contribución en una actividad (o sumidero) en la que contribuye junto a otro actor "2", que puede ser el mismo, vale:

$$\Delta \frac{dX["1"](t)}{dt} = -XU["1"]\alpha["1"]\alpha["2"]N["1"](t)N["2"](t)$$

Lo que en definitiva resulta, poniendo los cardinales en función de las exergías:

Eq (3. 4)

$$\Delta \frac{dX["1"](t)}{dt} = -\frac{\alpha["1"]\alpha["2"]}XU["2"]} X["1"](t)X["2"](t)$$

- 3) El aumento de la exergía por unidad de tiempo de un actor "3" debido a la atribución de una actividad A cuya tasa de reparto es $\beta[A, "3"] = \beta$, y que tiene un solo actor contribuyente "1" (sin importar que "3" y "1" sean el mismo actor) vale:

$$\Delta \frac{dX["3"](t)}{dt} = +\beta XU["1"]\alpha["1"]^2 N["1"] = +\alpha["1"]^2 \beta X["1"](t) \quad \text{Eq (3. 5)}$$

- 4) El aumento de la exergía por unidad de tiempo de un actor "3" debido a la atribución de una actividad que tiene dos actores contribuyentes: "1" y "2" (sin importar de que "3" y "1" ó "3" y "2" sean el mismo actor) vale:

$$\Delta \frac{dX["3"](t)}{dt} = \alpha["1"]\alpha["2"]\beta \frac{XU["1"] + XU["2"]}XU["1"]XU["2"]} X["1"](t)X["2"](t) \quad \text{Eq (3. 6)}$$

Computación de ecosistemas.

- 5) El aumento de la exergía por unidad de tiempo de un actor "F" asociado a una fuente, debido a la acción de dicha fuente, es constante e igual al valor de la potencia exergética $P["F"]$ de la fuente.

$$\Delta \frac{dX["F"](t)}{dt} = P["F"] = cte. \quad \text{Eq (3. 7)}$$

- 6) Un sumidero se modelan exactamente igual que una fuente sin atribuciones.

Vamos a ver a continuación como, a partir de sencillos grafos de biorrelaciones, y mediante el auxilio de estos teoremas podemos obtener de forma natural los modelos más paradigmáticos y elementales de la ecología demográfica.

- 1) La ley Malthus.
- 2) La ley logística de Verlhus.
- 3) Las ecuaciones de Lotka-Volterra.

3.3 La ley de Malthus

Vamos a obtener en primer lugar la ley de crecimiento exponencial de Malthus dada por

$$\frac{dX[\bullet](t)}{dt} = rX[\bullet](t) \quad \text{Eq (3. 8)}$$

3.3.1 Grafo de biorrelaciones.

El grafo de la figura corresponde a una bacteria que se multiplica sin control ni limitación alguna.

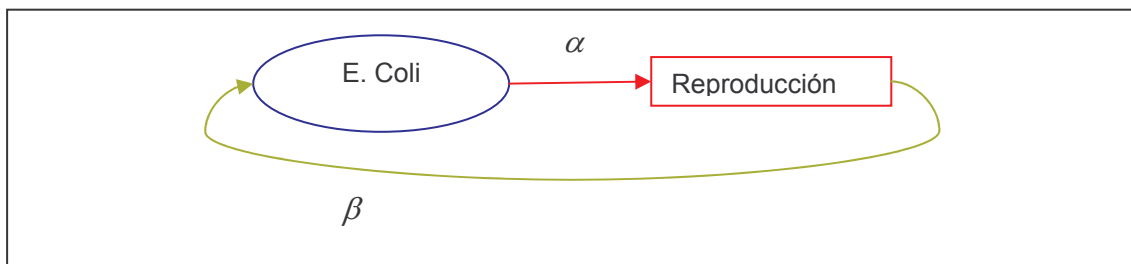


Figura 3. 1 Grafo de biorrelaciones de la ley de Malthus

3.3.2 Modelo de computación. Ecuaciones.

Vamos a llamar para abreviar $X = X[".Coli"]$. En virtud de los teoremas 1) y 3), tenemos:

$$\frac{dX}{dt} = -\alpha^2 X + \beta\alpha^2 X = \alpha^2(\beta - 1)X \quad \text{Eq (3. 9)}$$

Que se ve inmediatamente que tiene la misma forma funcional que la ley de Malthus. Identificando, se obtiene inmediatamente la relación entre los parámetros:

$$r = \alpha^2(1 - \beta) \quad \text{Eq (3. 10)}$$

3.4 La ley logística de Verhulst. Limitación por fuentes.

Vamos a obtener ahora la ley de crecimiento logístico de Verhulst. Dicha ley se expresa como:

$$\frac{dX[\bullet]}{dt} = rX[\bullet]\left(1 - \frac{X[\bullet]}{K}\right) \quad \text{Eq (3. 11)}$$

3.4.1 Grafo de biorrelaciones.

El grafo de biorrelaciones que vamos a utilizar va a ser el siguiente. Este caso es estructuralmente parecido al anterior, pero ahora el actor está conectado también a un sumidero mediante una afinidad doble.

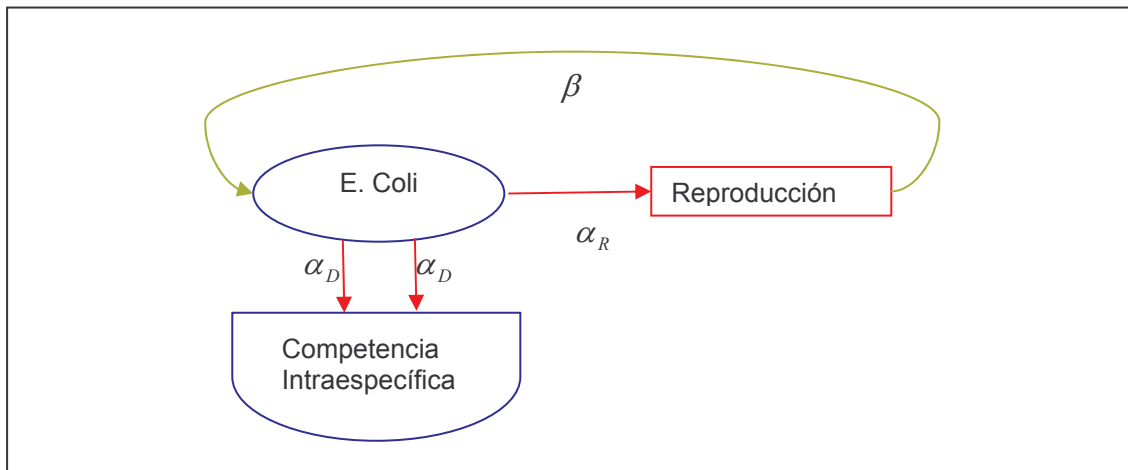


Figura 3. 2 Grafo de biorrelaciones correspondientes al modelo logístico

3.4.2 Modelo de computación. Ecuaciones

Llamaremos de forma similar a como hicimos antes:

$$X = X["E.Coli"](t)$$

$$XU = XU["E.Coli"]$$

Aplicando sucesivamente los teoremas 1), 2) , 2) y 3) tenemos que

$$\frac{dX}{dt} = \alpha_R^2 X - \frac{\alpha_D^2}{XU} X^2 - \frac{\alpha_D^2}{XU} X^2 + \beta \alpha_R^2 X = \alpha_R^2 (\beta - 1) X - 2 \frac{\alpha_D^2}{XU} X^2$$

Computación de ecosistemas.

Simplificando y reordenando esta expresión obtenemos;

$$\frac{dX}{dt} = \alpha_R^2 (\beta - 1) X \left(1 - \frac{X}{\frac{\alpha_R^2 (1 - \beta) XU}{2\alpha_D^2}} \right) \quad \text{Eq (3. 12)}$$

Que tiene una forma funcional igual a la ecuación de Malthus. Identificando ambas ecuaciones, obtenemos las relaciones entre los parámetros r y K y los del grafo de biorrelaciones.

$$r = \alpha^2 (\beta - 1) \quad \text{Eq (3. 13)}$$
$$K = \frac{\alpha_R^2 (\beta - 1)}{2\alpha_D^2} XU$$

3.5 Ecuaciones de Lotka-Volterra.

Vamos a obtener ahora las ecuaciones de Lotka-Volterra para un sistema compuesto por dos actores; un depredador (Y) y una presa (X), y mediado por una actividad de captura. Las ecuaciones son las siguientes:

$$\frac{dX}{dt} = k_1 X - k_2 XY \quad \text{Eq (3. 14)}$$

$$\frac{dY}{dt} = -k_3 Y + k_4 XY$$

3.5.1 Grafo de biorrelaciones.

Vamos a partir del siguiente grafo de biorrelaciones:

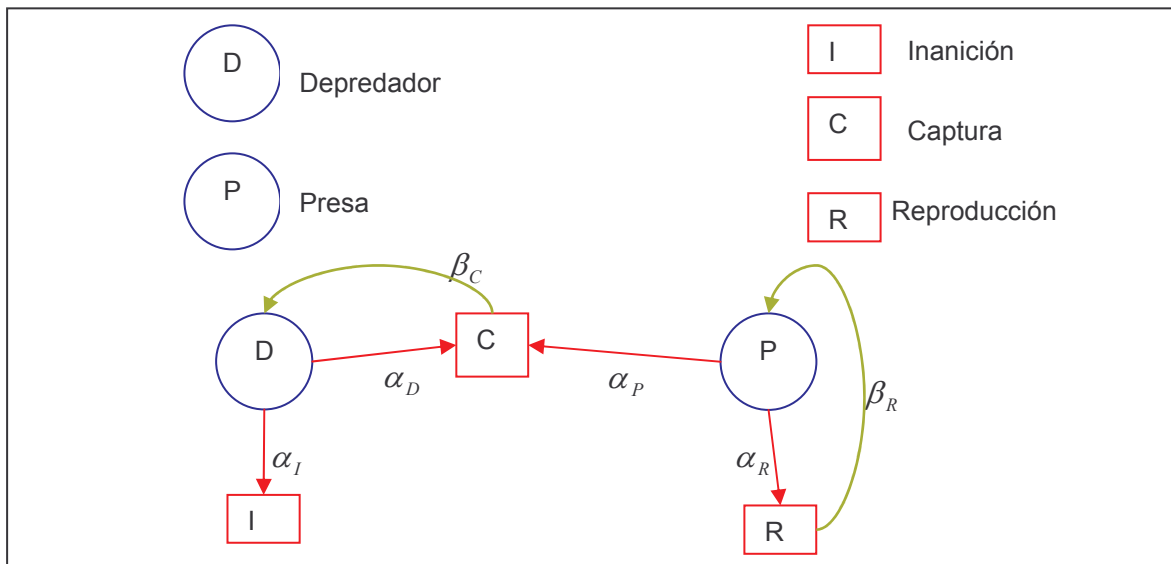


Figura 3. 3 Diagrama de Lotka-Volterra

En el grafo aparecen dos actores, el depredador (D) y la presa (P). Ambos están interconectados por una actividad de captura cuya única atribución revierte en el depredador. Por otra parte, el depredador está conectado en un bucle malthusiano con una actividad de reproducción, mientras que el depredador está conectado a una actividad o sumidero de inanición.

3.5.2 Modelo de computación. Ecuaciones.

Para abreviar ser compatibles con la expresión anterior de las ecuaciones de Lotka-Volterra, vamos a llamar:

$$X = X[P](t)$$

$$Y = X[D](t)$$

$$XU = XU[P]$$

$$YU = XU[D]$$

Computación de ecosistemas.

Pasemos a escribir la ecuación para las presas (X). Usando sucesivamente los teoremas 2), 1) y 3) tenemos que:

$$\frac{dX}{dt} = -\alpha_R^2 X + \beta_R \alpha_R^2 X - \frac{\alpha_D \alpha_P}{YU} XY \quad \text{Eq (3. 15)}$$

A continuación vamos a escribir la ecuación para los depredadores (Y) utilizando sucesivamente los teoremas 1),2 y 4) lo que resulta en

$$\frac{dY}{dt} = -\alpha_I^2 Y - \frac{\alpha_D \alpha_P}{XU} XY + \beta_C \alpha_D \alpha_P \frac{XU + YU}{XU \cdot YU} XY \quad \text{Eq (3. 16)}$$

Agrupando las ecuaciones y los términos semejantes resulta:

$$\frac{dX}{dt} = \alpha_R^2 (\beta_R - 1) X - \frac{\alpha_D \alpha_P}{YU} XY \quad \text{Eq (3. 17)}$$

$$\frac{dY}{dt} = -\alpha_I^2 Y + \frac{\alpha_D \alpha_P}{XU} \left(\beta_C \frac{XU + YU}{YU} - 1 \right) XY$$

Que tiene la misma forma funcional que la Eq (3. 14). Identificando los términos, resultan para los parámetros de la Eq (3. 14) las expresiones:

Eq (3. 18)

$$k_1 = \alpha_R^2 (\beta_R - 1) \quad k_2 = \frac{\alpha_D \alpha_P}{YU}$$

$$k_3 = \alpha_I^2 \quad k_4 = \frac{\alpha_D \alpha_P}{XU} \left(\beta_C \frac{XU + YU}{YU} - 1 \right)$$

3.6 Otros ejemplos.

En este apartado vamos a proponer, sin analizarlos en detalle algunos ejemplos de modelado de sistemas ecológicos más complejos que pone de manifiesto la potencia del método.

3.6.1 Modelo de saciedad para Lotka Volterra

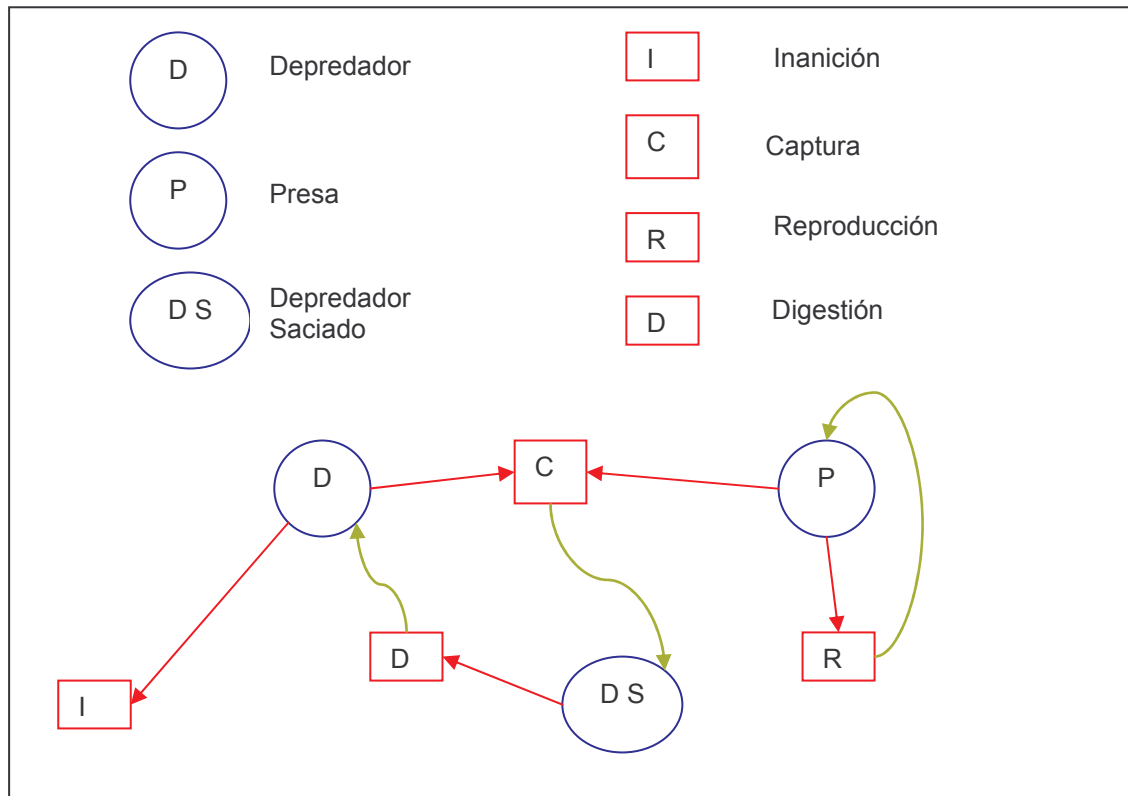


Figura 3. 4 Lotka Volterra con limitación de consumo por saciedad

El modelo original de Lotka Volterra supone que los depredadores están siempre activos, lo cual no es razonable puesto que necesitan dedicar un tiempo no nulo a las actividades de captura y digestión. En este diagrama se muestra un diagrama de biorrelaciones que corrige este efecto. Básicamente el diagrama es idéntico al de Lotka-Volterra, pero la salida de la actividad de captura se redirige hacia un actor intermedio (El depredador saciado), cuyo estado se relaja hacia el depredador normal mediante otra actividad (digestión).

3.6.2 Migración difusiva

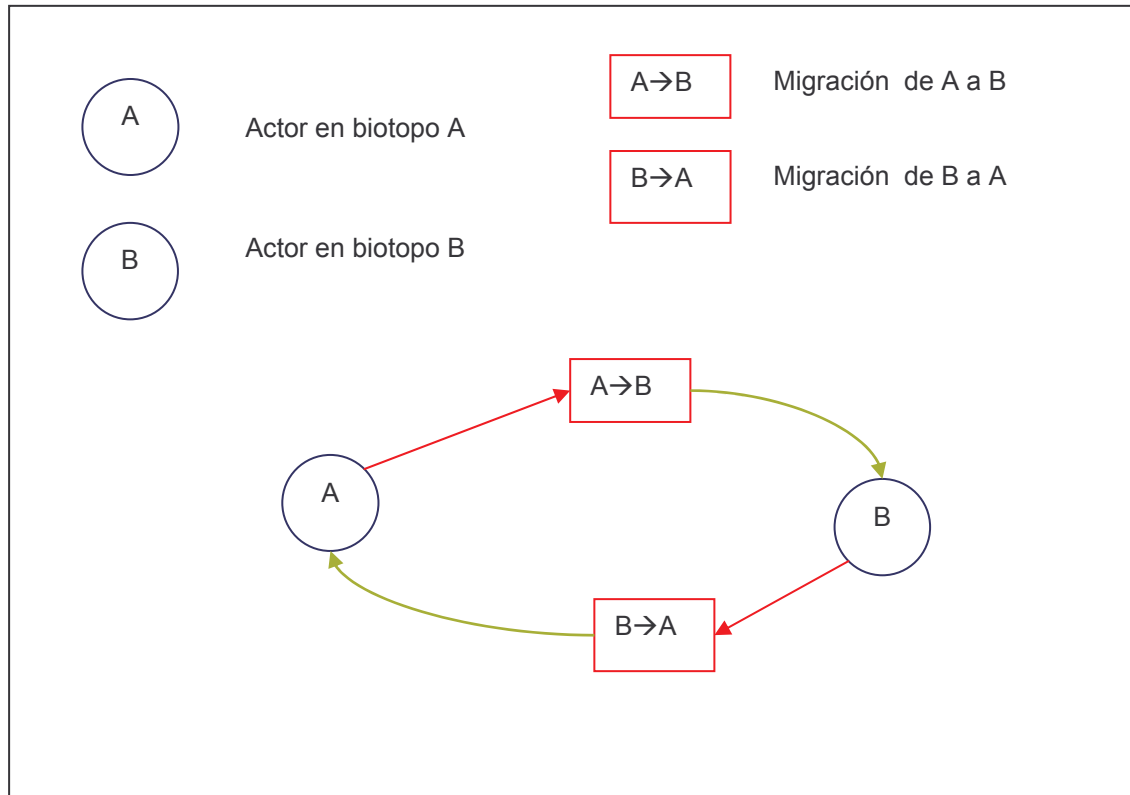


Figura 3. 5 *Migración difusiva*

En este ejemplo los actores son comunidades de una misma especie que se encuentran situadas en biotopos diferentes, entre los cuales existe una cierta permeabilidad, o posibilidad de paso desde uno hacia el otro. Las migraciones en los dos sentidos están representadas por sendas actividades que transfieren individuos de una comunidad a la otra.

3.6.3 Fecundación cruzada

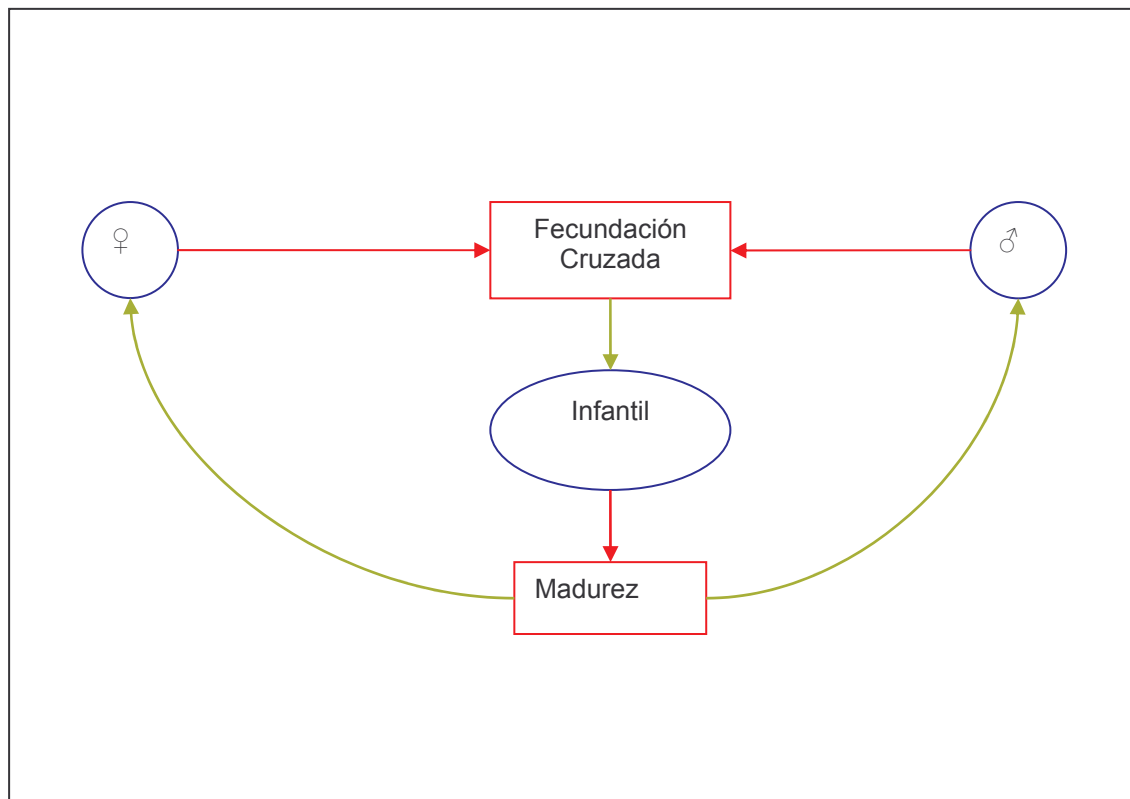


Figura 3. 6 Fecundación cruzada en lepidópteros (con renovación total)

Este ejemplo muestra otro caso de actores que perteneciendo a la misma especie tienen roles diferentes.

Los actores son los dos estadios adultos sexuados, y un estado infantil indiferenciado de una misma especie de un lepidóptero típico que se reproduce con un ciclo de renovación total (los adultos mueren tras finalizar el ciclo reproductivo)

A través de la actividad de fecundación cruzada se realiza una atribución al estadio infantil, que está conectado mediante una afinidad al proceso de maduración, que atribuye de nuevo a los dos estadios adultos.

3.6.4 Ecología de la malaria.

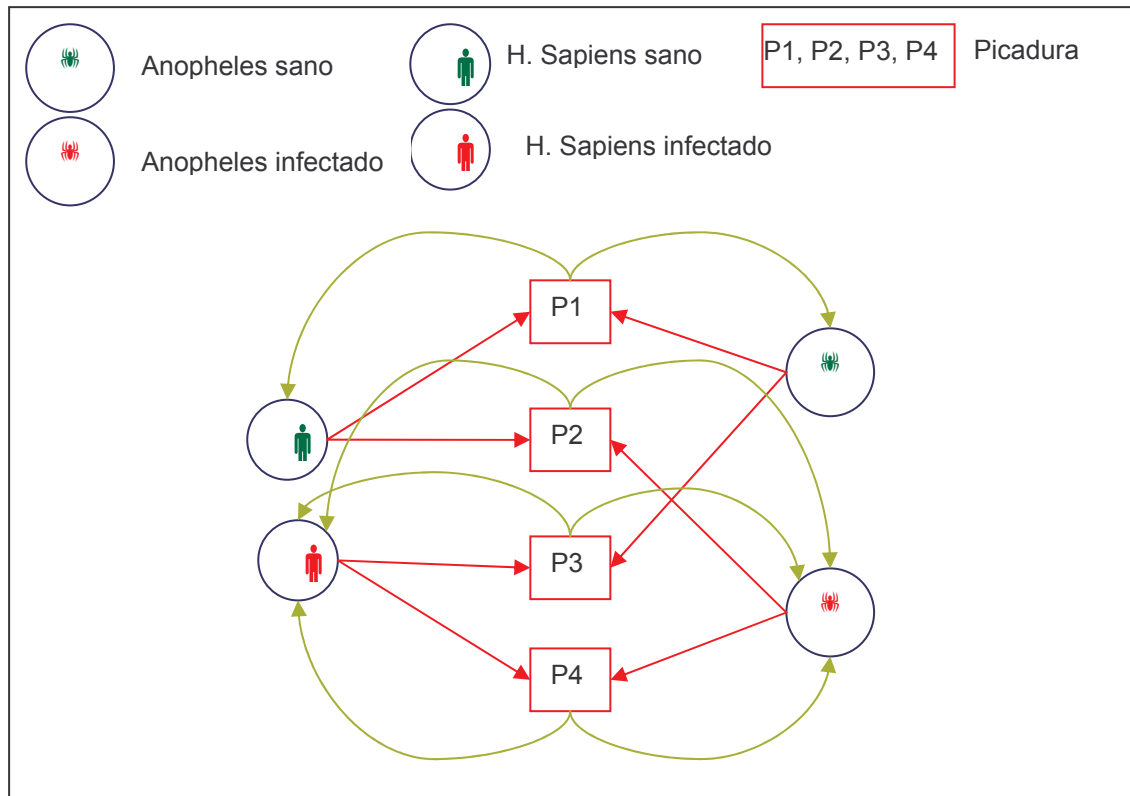


Figura 3.7 Ciclo de contagio de la malaria

Este es un ejemplo algo más complejo que ilustra la propagación de una enfermedad producida por un parásito (*Plasmodium Falciparum*).

Como es conocido, *P. Falciparum*, utiliza como vector para la propagación entre humanos a un huésped intermedio que es mosquito Anopheles. El planteamiento de este ecosistema entre especies resulta inviable debido entre otras cosas a las diferencias de escala entre los actores que habría que postular, y por otras consideraciones.

Sin embargo, el modelo de cuatro actores que se propone captura de forma adecuada la dinámica del problema al nivel de escala epidemiológico, abstrayendo las características particulares del propio organismo parásito, que en realidad resultan irrelevantes en este nivel de descripción.

4. Aportaciones originales.

Este trabajo contiene (hasta donde el autor tiene conocimiento) las siguientes aportaciones originales.

- 1) El concepto de transmutación ecológica.
- 2) La definición precisa de un modelo de referencia de oráculo específicamente orientado a la computación de ecosistemas y estructurado en base a la separación del problema en niveles de abstracción independientes.
- 3) La definición precisa de un modelo lingüístico (el grafo de biorrelaciones) que permite la descripción y el análisis automatizado de cualquier ecosistema a nivel lógico con el detalle que se desee.
- 4) Una estrategia concreta de asignación de parámetros que permite convertir grafos de biorrelaciones en sistemas de ecuaciones diferenciales.

5. Direcciones futuras de progreso.

Durante la elaboración de este trabajo he identificado las siguientes líneas de investigación, que serán las que marquen la elaboración de mi tesis doctoral.

- 1) Indagar en el significado que tienen de los actores en las descripciones de alto nivel de los ecosistemas que se han diseñado en este trabajo. Proporcionar además criterios para:
 - ... elegirlos adecuadamente en la síntesis de modelos de ecosistemas.
 - ... determinarlos adecuadamente en la observación de ecosistemas.
- 2) Establecer de forma precisa lo que entendemos por estado de un ecosistema e identificar estrategias que permitan eliminar las variables ocultas de los modelos.
- 3) Sistematizar unos criterios de reducción de información que permitan que grafos de biorrelaciones puedan reducir su tamaño de manera que su complejidad no supere a la necesaria para los objetivos que se pretendan.
- 4) Establecer unos mecanismos concretos que de forma sistemática permitan convertir los grafos de biorrelaciones en modelos matemáticos que puedan ser procesados de forma eficiente por un computador.
- 5) Establecer basándose en los principios y metodología de la mecánica estadística, una serie de referencias que permitan que la parametrización de todos los elementos de información sea autocontenida y tenga significado propio, tanto desde el punto de vista del actor, como desde el punto de vista del observador del ecosistema.
- 6) Proporcionar una interpretación de los elementos numéricos que aparecen en los modelos desde el punto de vista de la teoría de la información.
- 7) Identificar, y en lo posible cuantificar, las limitaciones que presenta el estudio de la ecología demográfica a través de modelos computacionales.
- 8) Poner de manifiesto la necesidad de construir una teoría que permita la validación rutinaria computerizada de los modelos de la ecología demográfica, demostrando que la validación 'entendible' de los mismos es, en la práctica, inalcanzable incluso si trabajamos con modelos de complejidad media-baja; y que dicha capacidad de validación es indispensable para poder usar oráculos de control cuyo riesgo esté controlado.
- 9) Mostrar cómo los sistemas ecológicos pueden tender, ante circunstancias que los modifican bruscamente a corto plazo en un sentido, a reaccionar violentamente en el sentido contrario cuando se consideran intervalos de tiempo mayores.

6. Convenciones y nomenclatura.

Término	Significado
Actividad	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones que representa una acción dinámica que implica la intervención de uno varios actores y que supone una modificación del estado del ecosistema
Actor	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones. Los actores pueden contener exergía, que utilizan para activar o mantener sus relaciones o para estabilizar sus estructuras de información internas.
Afinidad	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones que representa a los elementos de información que relacionan una actividad con sus actores contribuyentes
Atribución	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones que representa a los elementos de información que relacionan una actividad con sus actores recolectores
Biocomplejo	Codificación simbólica de un grafo de biorrelaciones
Catástrofe	Modificación externa que afecta al estado de un ecosistema de forma puntual en el tiempo
Exergía	Energía útil (susceptible de ser convertida en trabajo) de la que dispone un actor para realizar sus actividades, o ceder a otras partes del ecosistema. La exergía se puede calcular como: Exergía=Energía Libre+Energía Cinética+Potencial Gravitatorio
Factor de Calidad	Cociente entre la exergía almacenada y la potencia disipada por un sistema
Fecha	Número que identifica un instante de tiempo y que mantiene una relación de orden, en relación a los instantes que ocurren antes o después
Fuente	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones que representa un aporte externo de exergía al ecosistema
Grafo de biorrelaciones	diagrama que permite capturar los elementos conceptuales básicos de un ecosistema
Hidrómero	Microagregado estable de moléculas de agua con la estructura tetraédrica del hielo
Lebesguiano	Medida de Lebesgue de un conjunto
Modelo	Estructura lógica que permite a un sujeto construir un objeto (el oráculo) de cuyo comportamiento espera extraer cierta cantidad de información sobre el comportamiento de otro objeto (objeto enfocado) que por alguna razón resulta de su interés.
Octava	Logaritmo en base 2 de una relación entre dos magnitudes, por los general frecuencias, tiempos, números de onda o distancias
Oráculo	Sistema físico en que se materializa un modelo de computación.
Semitasa	Parámetro de una afinidad que se utiliza para determinar la tasa de la actividad a la que apunta

Computación de ecosistemas.

Sumidero	Elemento constitutivo de un grafo de biorrelaciones que representa a los elementos de información que relacionan las pérdidas de energía de un ecosistema
Tasa	Número medio de veces que ocurre una actividad en la unidad de tiempo.
Transmutación	Cambio en la naturaleza de un actor inducido por una actividad
VEDD	Vector de Ecuaciones en Diferenciales Discretas
VEDO	Vector de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias
VEDP	Vector de Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales

7. Referencias bibliográficas

- [1] B. Mandelbrot (1982). The fractal geometry of nature.
- [2] Barry Commoner 1977. The Poverty of Power. ISBN 0-394-40371-
- [3] Berryman, A (1992). The origins and evolution of predator-prey theory. *Ecology*. Vol. 73.
- [4] Cannon, Walter B. 1939. The Wisdom of the Body, 2nd Edition. W. W. Norton. New York.
- [5] Falconer Keneth. Fractal Geometry (Mathematical Foundations and applications)
- [6] Fernández A. & Couce A. (2005). Un Modelo Sobre La Dinámica Poblacional De Cadenas Tróficas: Aplicación Al Caso Del Pulgón Del Algodonero (Aphis Goshipii).
- [7] Fernández Fernández A. (1994) .Estudio de caos y bifurcaciones en sistemas no lineales. (PFC UPM 1994).
- [8] Fernández Fernández A. (1994) Análisis multirresolución. La transformación Wavelet. (UPM 1994).
- [9] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson. Complete UML Training Course
- [10] H.T.Odum (1996) Environmental Accounting: Emery and Environmental Decision Making, Wiley.
- [11] Harrison, G. W. (1979). Global stability of predator-prey interactions. *J. Mathematical Biology*, vol. 8.
- [12] Ilya Prigogini (1977) Self organization in non equilibrium system.
- [13] In M. Gilpin and I. Hanski, eds. Metapopulation dynamics: brief history and concep-control. *Bulletin of the Entomological Society of America* 15:237–240.
- [14] J. Gallego Berenguer. Atlas de parasitología.
- [15] Levins, R. (1969). Some demographic and genetic consequences of environmental heterogeneity for biological control.
- [16] Lorenzo González M (2000) Influencia del ruido gaussiano correlado en la sincronización de sistemas caóticos. Universidad de Santiago de Compostela.
- [17] Lotka, A.J (1920). Undamped Oscillations Derived from the Law of Mass Action, *J. Am. Chemical Soc.*, vol. 42.
- [18] Lotka, A.J (1920). Undamped Oscillations Derived from the Law of Mass Action, *J. Am. Chemical Soc.*, vol. 42.
- [19] Margalef R. 1996 Ecología 9 Edición. ISBN-84.282-0405-5
- [20] McLaughlin, JF; Roughgarden, J (1991). Pattern and stability in predator-prey communities: How diffusion in spatially variable environments affects the Lotka-Volterra model. *Theoretical Population Biology* Vol. 40.
- [21] Milton, J G; Belair, J (1990). Chaos, noise, and extinction in models of population growth. *Theoretical Population Biology*. Vol. 37.

Computación de ecosistemas.

- [22] P. Glansdorff, Ilya Prigogini Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations (ISBN: 0471302805)
- [23] P. Puig Adam (1965) Curso Teórico-Práctico de ecuaciones diferenciales aplicadas a la ciencia y a la técnica. Tomo II. .
- [24] Philip M. Morse (1971) Termofísica. Selecciones científicas Torres Quevedo 7-9
- [25] Roger Penrose (1989). La mente nueva del emperador.
- [26] Sprott J.C., Wildenberg, Yousef Azizi (2005). A simple spatiotemporal chaotic Lotka–Volterra model
- [27] T.M.Cover and J.M.Thomas: Elements of Information Theory (Wiley & Sons)
- [28] Turchin P. (2001)Does population ecology have general laws? [Oikos](#), Volume 94.
- [29] Volterra, V. (1931). *Leçon sur la Theorie Mathematique de la Lutte pour la Vie*, Gautier-Villars.
- [30] Wangersky P J (1978) Lotka-Volterra Population Models. *Ann. Rev. Ecol. Sys.*