



## Modelación Conceptual y Dinámica

### Una perspectiva transdisciplinaria de la ecología

Mario Bunge en el cuarto volumen de su *Tratado de Filosofía* (Bunge, 2012) propone que a mediados del siglo pasado diversos especialistas unieron esfuerzos para iniciar trabajos transdisciplinarios (más allá de las disciplinas clásicas como ingeniería, sociología, biología, etc.) orientados a la búsqueda de generalidades respecto del comportamiento de los sistemas, independiente del tipo que éstos fueran (ecológicos, sociales, técnicos). Podría decirse que dichos esfuerzos culminaron con lo que actualmente se conoce como 'teoría general de sistemas' (Von Bertalanffy, 1993). La base del pensamiento sistémico es que las explicaciones sobre la dinámica o comportamiento de los sistemas se deben buscar en la estructura de los mismos y que tal relación va más allá, de ahí la idea de transdisciplina, del tipo de sistema específico que se estudie (Meadows, 2008).

Keller y Golley (2000), analizando los postulados filosóficos al interior de la ecología, proponen que ésta se sustenta en dos conceptos centrales: sistema y evolución. El primero orientado a responder la pregunta ¿cómo funcionan los sistemas ecológicos?, el segundo a la pregunta ¿cómo han llegado los sistemas ecológicos a ser lo que son? De ahí que ecólogos contemporáneos que buscan unificar la ecología en un solo cuerpo teórico, propongan que ambas visiones (sistémica y evolutiva) deben ser integradas para generar un 'consenso científico' (Loreau, 2011; Matthews y col., 2011).

Uno de los principales métodos usados en el estudio sistémico es la generación de modelos (conceptuales, matemáticos o numéricos). Se entiende por modelo un esquema teórico de un sistema o realidad compleja, que se elabora para facilitar su comprensión y estudiar su comportamiento (Jopp y col., 2011). Es por ello que en el año 1995, con motivo del proyecto EIMS (An Environmental Information and Modeling System for Sustainable Development; Santibañez y Marín, 1998) financiado por la IBM International Foundation, se organiza el 'Laboratorio de Modelación Ecológica' (LME), unidad académica del Departamento de Ciencias Ecológicas (<http://antar.uchile.cl>). El objetivo principal del LME es el desarrollo de una ciencia ecosistémica para América Latina que pueda servir como base para el análisis integrado de la naturaleza, incluyendo a las sociedades humanas como partes constituyentes de ésta

El desarrollo del LME, desde un punto de vista epistemológico-conceptual, se ha basado en explorar diversas metodologías, desde los modelos conceptuales participativos (Delgado y col., 2009) a los modelos numéricos tridimensionales espacialmente explícitos (Marín y col., 2013). El basamento transdisciplinario ha facilitado poder realizar investigación en temas que involucran a las sociedades humanas y sus relaciones con los sistemas ecológicos tales como: los servicios ecosistémicos (Delgado y col., 2013), las relaciones entre desarrollo humano y cambios en el uso de la tierra (Marín y col., 2012), la propuesta de herramientas para el manejo de actividades complejas como la acuicultura (Tironi y col., 2010), metodologías de evaluación de nuevas regulaciones ambientales (Yarrow y col., 2008) y la explicación de conflictos socio-ecológicos desde una perspectiva postnormal-constructivista (Delgado y col., 2009; Marín y Delgado, 2013).



## Desarrollo de modelos conceptuales y dinámicos por medio de software iconográfico.

### *El concepto de sistema.*

El concepto de sistema fue introducido por Ludwig von Bertalanffy en su Teoría General de Sistemas (TGS) durante la década de los 30, y hasta ahora este concepto es complejo pero clave en el pensamiento científico. De acuerdo a von Bertalanffy un sistema es un "conjunto de elementos en interacción" y para él, la TGS debía constituirse en un mecanismo de integración entre las ciencias naturales y sociales y ser al mismo tiempo un instrumento básico para la formación y preparación de científicos. En su versión más sencilla, las principales características de los sistemas son sus componentes, interacciones y estructura. Así, un sistema es un conjunto de componentes relacionados por interacciones entre ellos (Fig. 1). Componentes e interacciones, identificadas en un momento dado, constituyen la estructura de un sistema.

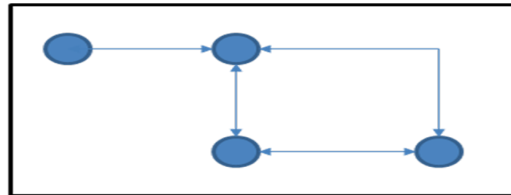
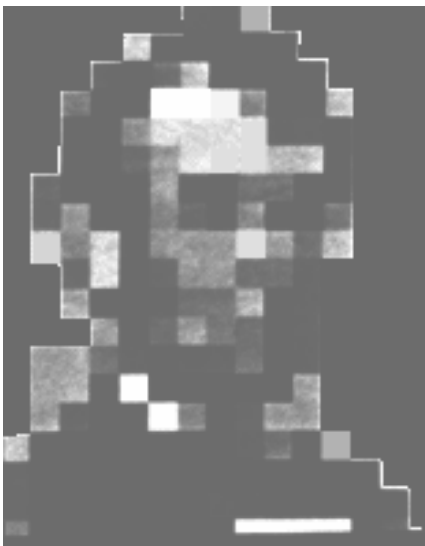


Figura 1: La representación grafica de un sistema en su versión más simple no es más que un conjunto de componentes (círculos) y sus interacciones (flechas).



La perspectiva de Von Bertalanffy, al considerar los sistemas como entidades compuestas de partes en interacción, permite verlos desde una aproximación holista, donde la comprensión de este es imposible si se estudian los componentes de forma aislada. Esta aproximación holista o pensamiento sistémico, permite el reconocimiento de la estructura y el manejo de sistemas complejos. Sin embargo, este proceso requiere la mayoría de las veces, sacrificar la comprensión de detalles de cada componente para concentrarse en el análisis de las interacciones y/o del sistema como una totalidad. Un ejemplo sencillo de esto puede ser demostrado por un holograma creado por Harmon, quien presenta un retrato en bloques de Abraham Lincoln (recuadro). Si se analiza cada uno de los cuadros de este retrato por separado, aún teniendo un detalle máximo en cada cuadro, no es posible relacionar el retrato a un rostro conocido. Sin

embargo, si se mira todo el retrato, es posible reconocerlo. Vale decir, se sacrifican



detalles por una comprensión de la totalidad. Sin embargo, aunque este ejemplo muestra de manera simple la utilidad de la visión sistémica, el desconocimiento de cómo se estructuran los sistemas ambientales y su creciente complejidad, dificultan su estudio ya que no se relaciona con algo conocido (previamente) u obtenido de la memoria (personal o colectiva); sino que debe ser abordado como un ejercicio de procesamiento de información.

### **Modelos conceptuales de ecosistemas**

Si se parte de la base que los ecosistemas son sistemas complejos (i.e. multi-componentes, multi-causales y multi-escalares), entonces su conocimiento no puede derivarse exclusivamente de estudios observacionales o experimentales. De hecho, para algunos autores como Funtowicz y Ravetz (2000) tal aplicación de la ciencia normal, Kuhniana, es simplemente errónea. La ecología de ecosistemas requiere de estrategias metodológicas capaces de sintetizar el conocimiento adquirido y orientar aquel por obtener. Para ello una de las estrategias utilizada es la generación de modelos conceptuales. Sin embargo, un modelo por general que sea, siempre deja partes del sistema fuera. De hecho, la síntesis de información ha sido definida por van den Belt (2004) como "el arte de dejar cosas fuera".

Existen varias definiciones de modelación conceptual. Una de las que, desde nuestra perspectiva, recoge la esencia de esta actividad intelectual es la propuesta por Moody (2005): "La modelación conceptual es el proceso de documentar formalmente el dominio de un problema con el propósito de comprenderlo y comunicarlo entre distintos actores o socios" ("stakeholders" en el original; pág. 244). Si asociamos los modelos conceptuales al concepto de FES-sistema (Delgado y Marín, 2005) con bases en el enfoque ecosistémico, entonces la generación de éstos debe incluir a los actores sociales, los procesos socio-económicos y hacerse cargo de las diversas visiones generadas (Delgado y col., 2009; Marín y col., 2008). De hecho, un FES-sistema es un modelo conceptual (observador-dependiente) de un ecosistema; una unidad espacialmente explícita donde los componentes (bióticos, abióticos y sociales) y límites espaciales dependen de las preguntas a responder, los observadores que las formulan y el contexto social en el que ellas se plantean (Delgado y Marín, 2005; Delgado y col., 2009; Guimaraes, 2013).

Heemskerk y col. (2003), Marín y Delgado (2008), Marín y col. (2013) y Delgado y col. (2013) incentivan el desarrollo de la modelación conceptual como una de las mejores alternativas para el desarrollo de la interdisciplina y de la transdisciplina. Marín y Delgado (2008) discuten el aporte del desarrollo de modelos conceptuales en ecología de ecosistemas usando *la parábola del elefante*. Ésta ha sido usada para sugerir que la realidad puede ser vista de maneras diversas dependiendo de la perspectiva desde la cual se mira. De hecho, hace una década el efecto de la perspectiva en el análisis de los ecosistemas fue identificado como un problema a resolver (Jørgensen y Müller, 2000; Waltner-Toews y col., 2003). El estudio de los ecosistemas como foco de análisis y su manejo integrado, requieren que quienes los estudiamos compartamos nuestras visiones de forma de generar una estructura coherente. En el artículo mencionado (Marín y Delgado, 2008), hemos querido llamar la atención sobre la necesidad de descubrir a los elefantes (i.e. el ecosistema como



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

unidad y no solo algunos de sus componentes!). Estamos convencidos que ello es necesario para el estudio de los problemas ecológicos actuales.

Para generar un modelo conceptual, es fundamental la idea de que no existe, a priori, un modelo correcto sino distintas visiones de un ecosistema. Estas visiones difieren, en la mayoría de los casos, debido a diferencias en la base conceptual empleada para el análisis del ecosistema (e.g. proceso-funcional; poblacional-comunitaria) y a la percepción de los investigadores y actores sociales que lo construyen. Cada día aumenta la complejidad de los estudios ecosistémicos, como por ejemplo con la incorporación del hombre en los ecosistemas (Delgado y Marin, 2005), donde las perspectivas para el desarrollo de modelos conceptuales ha tenido grandes avances, respecto a metodologías y enfoques. Sin embargo, si se considera que un modelo conceptual es por sobre todas las cosas un instrumento de comunicación, entonces conviene que se desarrollen tantos modelos como interesados existan en un ecosistema. Alternativamente, un modelo conceptual puede ser visto como una proposición, por parte de un grupo de investigadores, respecto de cómo éstos ven el ecosistema para ser entregado para su discusión a una comunidad de actores sociales.

En otros casos, la publicación de modelos conceptuales tiene por objetivo resumir, desde el punto de vista de sus proponentes, la literatura referida a un tema específico. Un ejemplo de ello es el artículo de McIntyre y Lavorel (2007), en el que resumen los cambios vegetacionales relacionados al uso de la tierra. Otro ejemplo es el trabajo de Whipple y col. (2005), en el que generan un modelo conceptual sobre el alga *Phaeocystis* como una guía para futuras investigaciones. Aún en otros casos, los modelos conceptuales se emplean para poner a prueba hipótesis mecanicistas en sistemas complejos (i.e. ecosistemas). Por ejemplo, Parysow y Gertner (1997) proponen una metodología de "experimentación virtual" por medio de modelos conceptuales, aplicándola específicamente para estudiar el efecto de la lluvia ácida sobre el crecimiento de bosques. Su uso también puede verse en problemas ecológicos complejos como la gestión ambiental de la Bahía de Mejillones del Sur en Chile (LME, 2012), en las propuestas de restauración de la subcuenca del humedal del Río Cruces en Valdivia (Fischer, 2013) y para el diseño de estrategias de manejo para el Fiordo Aysén (Marín y col., 2008).

Aun cuando los modelos conceptuales son muy utilizados para la comprensión de problemas ecológicos-ecosistémicos complejos (síntesis de información y conocimiento), es conveniente enumerar algunas de las principales características a tener en cuenta en su desarrollo y uso:

1. *Un modelo solo refleja el estado del conocimiento al momento de su generación.* Por tanto, debe ser permanentemente revisado de modo que sea modificado sobre la base de nuevos conocimientos. Esto es, debe ser concebido como una estructura adaptativa.

2. *Un modelo es el reflejo de quienes lo diseñaron.* Debido a ello y en especial si va a ser empleado bajo un enfoque de manejo ecosistémico, éste debe ser analizado por una amplia variedad de actores sociales y usuarios.

3. *Un modelo solo sirve para los propósitos para los cuales fue diseñado.* Por tanto, éstos deben ser claros desde el inicio de forma que exista acuerdo respecto del propósito central para su desarrollo.



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

4. *Un modelo conceptual es una herramienta de comunicación entre actores.* Por tanto, no reemplaza la comunicación efectiva entre los mismos, simplemente es instrumental a ella. Por ejemplo, si los actores clave para el problema del humedal Río Cruces no han desarrollado estrategias efectivas de comunicación, es poco probable que un modelo conceptual las genere (Delgado y col., 2009).

5. *Un modelo no puede resolver las incertezas, solo las incorpora.* Por tanto, en ausencia de información sobre el ecosistema en cuestión, solo se pueden hipotetizar procesos y relaciones, los que más temprano que tarde deberían ser considerados en proyectos de investigación, en especial si tales incertezas juegan un rol eco-social importante.

El LME viene desarrollando modelación conceptual de ecosistemas desde hace ya casi dos décadas. Esto es posible de ver en la tesis de Luisa Delgado (1996), donde se desarrollan modelos conceptuales desde una aproximación proceso funcional y se aplica al estudio comparativo de contenidos de cobre en bosques de tipo mediterráneo en Chile central. Luego en 1998, Manuel Contreras desarrolla modelos del flujo de carbono en el ecosistema de Río Clarillo, donde enfatiza una aproximación poblacional-comunitaria basada en la estructura trofo-dinámica de los macro-invertebrados bentónicos para el estudio de éste. Y así consecutivamente desde la fecha señalada, se han desarrollado trabajos de pre y postgrado que aplican modelos conceptuales para describir y explicar problemas ecológicos, ecosistémicos y eco-sociales (e.g. Sepúlveda, 2010; Von Bernath, 2013; Fischer, 2013).

Cuando las escalas espaciales de los problemas ecológicos trascienden los ecosistemas e implican un conjunto de sistemas interactuantes, como por ejemplo en el caso de las cuencas hidrográficas (escala de paisaje), las aproximaciones tradicionales utilizadas en la ecología (e.g poblacional y/o comunitaria) no son suficientes para dar cuenta del alcance del problema, así como tampoco éstos tienen la capacidad de analizar todos los componentes bióticos y abióticos que en éste se encuentran (Marín y Delgado, 2008). Es por ello que el enfoque de ecosistemas, basado en el análisis de procesos y funciones ecosistémicas, es un enfoque innovador (Delgado y col., 2013, De Groot y col. 2012). La ciencia ecosistémica cada día avanza en la incorporación de herramientas interdisciplinarias para el estudio y comprensión de éstos (Verardi, 2013) y hace uso de enfoques multidisciplinarios para su enfoque y aproximación. Para el estudio de estos sistemas complejos, llamados aún ecosistemas en ecología, Marín y col. (2008) han propuesto una metodología para el desarrollo de modelos conceptuales, denominada "tormenta de ideas" (del inglés brainstorming). Ésta se basa en que los ecosistemas han transitado de ser sistemas naturales aislados a sistemas naturales que interactúan con los sistemas sociales, donde estos últimos constituyen el componente racional (Delgado y col, 2009; Marín y col, 2008), y donde las interacciones son específicas y únicas según el lugar geográfico que los define como entidades de un sistema. Este método para la construcción de modelos conceptuales ha tenido repercusión a nivel internacional. Por ejemplo, Guimaraes y col. (2013) lo aplican a una problemática en las islas Azores, donde postulan que el conocimiento científico es primordial para el desarrollo de políticas públicas para la gestión de los recursos naturales. También mencionan que a veces la falta de éxito se debe a la no integración de la diversidad de conocimientos existentes respecto a un sistema. Por tanto, ellos usan el método de lluvia de ideas generado en el LME como una herramienta transdisciplinaria en la construcción de modelos conceptuales para la sostenibilidad de sistemas ecológico-sociales.



### **Sistemas socio-ecológicos.**

El medio ambiente se puede considerar un sistema dinámico debido que está compuesto por una gran cantidad de elementos que interactúan entre sí y están en continuo cambio. Estos elementos no solo corresponden a los factores bióticos (organismos) y abióticos (suelo, sedimentos) sino también a las sociedades humanas, su desarrollo económico y cultural. Ello aumenta la complejidad de los sistemas ambientales ya que el hombre constantemente crea nuevos componentes y procesos, y disminuye o acelera otros provocando, muchas veces, efectos negativos que se devuelven a la sociedad como resultados de estas modificaciones (Fig. 2). Todo esto, sumado a factores estocásticos que pueden provocar cambios en un momento dado, produce una alta incerteza al tratar hacer predicciones sobre cambios futuros en algún sistema particular.

Una aproximación conceptual al estudio de los sistemas ambientales, es el concepto de FES-sistema FES (sistema físico-ecológico-social), desarrollado con el objetivo de analizar de manera integrada una región definida en el planeta. Este concepto incorpora explícitamente 3 componentes para analizar la relación sociedad naturaleza: las sociedades humanas, los componentes bio-ecológicos (bióticos y abióticos) y la geografía local, además enfatiza en el hecho de que el estudio de los sistemas, en la práctica, no puede contener todos los componentes del sistema sino solo los necesarios para responder las preguntas planteadas.

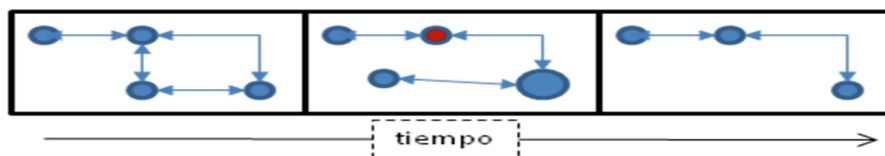


Figura 2: Un sistema dinámico es uno en el los componentes y sus interacciones no se mantienen fijos, si no que varían en el tiempo tanto en cantidad (ej: número de componentes e interacciones) como en calidad (ej: dirección, tipo, forma de los componentes e interacciones).

### **La idea de complejidad**

La teoría de la complejidad está asociada a conceptos tales como dinámicas no lineales, auto-organización, emergencia, etc. y es un tópico de estudio en física, termodinámica, teoría de sistemas y en sistemas ecológico. Aunque la mayoría de los autores está de acuerdo con las características que definen complejidad, existen marcadas diferencias en la forma en que estas se expresan y en la medida en que confieren mayor o menor diversidad de mecanismos al ambiente. Para Margaleff la complejidad de los sistemas se relacionaba con la energía y con cambios energéticos. Holling afirma que la complejidad en sistemas ambientales emerge de la asociación de un gran número de elementos interactuantes junto con algunos procesos controladores, mientras que Strevens concibe la complejidad en relación a la fuerza, intensidad, tipo y duración de las interacciones. Es así como estos sistemas pueden



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

llegar a ser extremadamente complejos cuando sus componentes no pueden ser separados para ser estudiados, debido a las fuertes interacciones a corto plazo que presentan y que están influyendo en el comportamiento del mismo. Un ejemplo de una interacción fuerte es cuando producto de la interacción entre dos componentes uno de estos desaparece del sistema, como cuando se extinguen poblaciones locales producto de su sobre-explotación.

Pero existen otras visiones mas subjetivas del concepto de complejidad, como la propuesta de Flood, donde afirma que "en general, parecemos asociar la complejidad con cualquier cosa que encontramos difícil de entender". Esta noción de complejidad tendría dos componentes, uno subjetivo, relativo al observador, y otro objetivo, respecto de la "cosa" observada. Siguiendo esta misma línea, incluso hay quienes afirman que la complejidad no sería una propiedad intrínseca de los sistemas, si no que estaría relacionada con la manera en que el observador interactúa con él. Otros autores afirman que si bien hay un componente de la complejidad que sería observador dependiente, la cantidad de maneras en que podemos interactuar con estos sería proporcional a su complejidad intrínseca. Este es el caso de los sistemas socio-ecológicos, donde además de la complejidad intrínseca de los sistemas naturales, la interacción de estos con las sociedades (sistemas sociales) añade a la noción de complejidad una dimensión observador-dependiente. Algunas de las principales características de los sistemas complejos están indicadas en la Tabla 1.

Tabla1: Algunas características de sistemas complejos

<b>Características estructurales</b>	<b>Características dinámicas</b>
Gran número de componentes	Comportamiento no-lineal
Gran número de conexiones	Comportamiento caótico
Alta diversidad de componentes y conexiones	Tendencia al comportamiento catastrófico
Asimetría	Auto-organización
Interacciones fuertes	Múltiples estados estables
Organización jerárquica y holárquica	Comportamiento adaptativo

Considerando el gran número de componentes e interacciones, y las particulares características de comportamiento y estructura de los sistemas complejos, se hace imposible incluir *todos* los componentes e interacciones en el análisis de los sistemas socio-ecológicos, con lo que se hace necesario delimitar el sistema que se desea estudiar de acuerdo a las preguntas que se desean responder.



### ***Definición de modelación y conceptos asociados***

La modelación es una herramienta importante en el estudio de los sistemas ecológicos ya que permiten observar y representar la naturaleza de forma simple. Existen tres conceptos básicos necesarios desde el inicio del proceso de modelación de sistemas de cualquier tipo, y que conforman la estructura elemental de cualquier modelo.

**Reservorios:** corresponde a los componentes del sistema; pueden ser considerados como depósitos que almacenan algo y que potencialmente pueden traspasarlo a otros componentes del sistema. Por ejemplo un tranque es un reservorio de agua que es traspasado a los campos agrícolas a través de canales de regadío.

**Procesos:** interacciones del sistema, es el desarrollo de la actividad del sistema que determina el contenido de los reservorios en el tiempo como flujos de materia y energía. Por ejemplo, el flujo de agua desde el tranque hacia los campos es un proceso que disminuye la cantidad de agua en el reservorio tranque.

**Variable de estado:** La variable de estado corresponde a la unidad de transferencia o "moneda de cambio" entre los componentes del sistema, ya sea en gramos, watts, litros, etc. Es clave definirla tempranamente antes de definir los reservorios y procesos a modelar.

### ***Modelos conceptuales desde una perspectiva sistémica***

Los modelos conceptuales son un esquema que representa de forma simplificada, como se piensa que funciona un sistema, es decir, es una representación de la estructura del sistema, en términos de reservorios o componentes (cajas) y procesos o interacciones (flechas). Estos modelos son escritos como diagramas con el objetivo de organizar la información y el conocimiento científico para así facilitar la comprensión del sistema. Por tanto, sirve como herramienta de comunicación entre los actores involucrados en proyectos de investigación multi-disciplinaria.

Los componentes de un modelo conceptual son definidos por el investigador, por lo tanto representan solo aquellos elementos que el investigador sabe que afectan al sistema y que considera importantes para el estudio, esto implica que la calidad del modelo es dependiente de la calidad de nuestro conocimiento y de la disponibilidad de los datos. Volviendo al ejemplo de la foto de Lincoln, es claro que solo una persona que ha visto a este personaje puede asociarlo con él, mientras que otra persona que no lo tiene registrado en su memoria puede asociarlo a cualquier otro personaje o a ninguno.

La complejidad de los sistemas ecológicos puede llevar a pensar en un modelo igualmente complejo, pero un modelo conceptual tiene como objetivo sintetizar la información que se tiene del sistema para poder entenderlo. Por esta razón, solo incorpora los elementos relevantes (o elementos clave) para responder una pregunta particular, tratándose de un diagrama simplificado, el cual representa un sistema idealizado. Este tipo de modelos, generalmente son escritos como diagramas de cajas y flechas donde las cajas representan los reservorios, y las flechas los procesos. Por





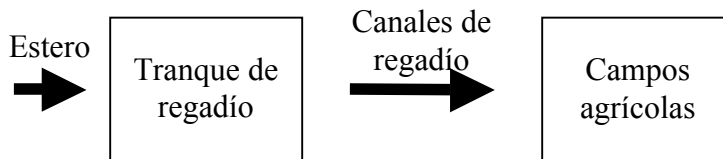
## Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

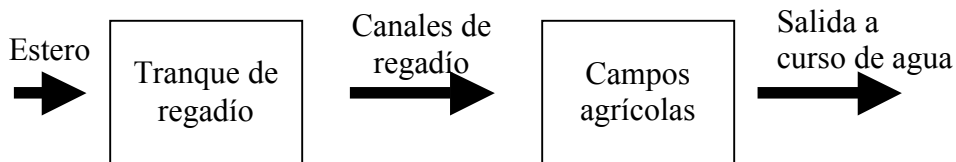
Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

ejemplo, para saber cuánta agua pierde diariamente un tranque de regadío, se podría pensar en un sistema donde las variables que pueden afectar este proceso no solo dependen de la salida hacia los campos de cultivo sino también de la evaporación, infiltración, precipitación, etc., lo cual también está afectando el volumen de agua en el tranque. Pero, probablemente estas variables no sean (en términos de volumen de agua) tan importantes como las salidas hacia los campos agrícolas al medirlo de forma diaria. En este caso entonces un modelo conceptual se vería así:



En general, el desarrollo de un modelo conceptual es un proceso iterativo, esto quiere decir que luego de hacer un diagrama general de cómo se piensa que funciona sistema, este modelo se puede ajustar cuantas veces sea necesario hasta obtener un modelo que represente lo que sabemos del sistema y que permita responder las preguntas planteadas. Así, si luego de generar el modelo anterior, además se quiere saber cuánta de esa agua vuelve a un curso de agua, entonces, se podría refinar:



Se espera que un modelo conceptual represente un balance entre la incorporación de detalle suficiente para representar la estructura y procesos importantes del sistema y que sea suficientemente simple para ser útil en generar hipótesis y organizar las ideas. Un buen modelo conceptual permite al investigador determinar qué datos están disponibles y si estos son suficientes para responder las preguntas planteadas, ayudando a estimar el grado de entendimiento de los componentes clave del sistema.

En resumen los pasos básicos para la construcción de un modelo sistémico conceptual son:

- 1 Establecer cuál es el problema a resolver, es decir, definir la pregunta.
- 2 Delimitar el sistema.
- 3 Buscar información sobre el sistema, sus componentes, propiedades, como cambian en el tiempo, las interacciones entre componentes, cambios físico-químicos, etc. Además se deben buscar datos o mediciones en la zona de estudio o una zona con características similares.
- 4 Establecer cuáles son los componentes, flujos e interacciones que se incluirán en el modelo, en base a la pregunta y a la información recopilada.



### **Modelos numéricos de ecosistemas**

Aun cuando se podría pensar que el desarrollo de modelos matemáticos orientados a problemas ecológicos ha sido parte de la ecología desde sus inicios (e.g. Lotka, 1956), la modelación de ecosistemas, desde el punto vista de la sociología de la ciencia, se consolida hace 38 años cuando se publica el primer número de la revista *Ecological Modelling* en el año 1975 (Jørgensen, 1975). El subsecuente desarrollo de la informática y de los sistemas computacionales, hizo posible el tránsito desde los modelos matemáticos, basados en el planteamiento y solución de ecuaciones diferenciales (e.g. el tipo de artículos que publica la revista *Theoretical Biology* cuyo primer número aparece en Enero 1961), a la modelos numéricos basados en aproximaciones (e.g. ecuaciones de diferencia y métodos de integración numérica) posibles de ser implementadas en computadoras. En la actualidad, existen tres grandes formas de desarrollar modelos numéricos de ecosistemas: i) mediante el uso de programas computacionales con interfaces iconográficas que simplifican la modelación (e.g. Marín y col., 2012), ii) mediante el uso de modelos diseñados para el análisis de ecosistemas específicos tales como el Princeton Ocean Model, POM, para ecosistemas marinos (e.g. Rosales & Sepúlveda, 1998) y el MOHID para estuarios y fiordos (e.g. Marín y col., 2013), y iii) el desarrollo de modelos 'a medida' construidos en lenguajes de programación como MatLab, R o Python (Eklof y col, 2012; Allesina y Levine, 2011). El primer tipo de modelos puede ser desarrollado en múltiples plataformas, desde pequeños computadores portátiles hasta aquellos de oficina. Los otros dos, sin embargo, requieren del uso de estaciones de trabajo poderosas de forma que los modelos corran en tiempos reales razonables (< 1 mes). Por otra parte, los modelos del primer tipo suelen ser a-espaciales, esto es, en los cuales el espacio no es modelado; en tanto que el segundo puede ser espacialmente explícito, llegando para el caso de los ecosistemas acuáticos a ser tridimensionales. Alternativamente, se pueden usar otras técnicas de modelación para incluir el espacio como son los autómatas espaciales, los que se describen más adelante.

Rykiel (1996) propone que el desarrollo, calibración y validación de un modelo contra datos empíricos, son actividades que separan a los científicos en "empiricistas" y "modeladores". En los inicios del LME, propusimos que una de las formas de construir puentes entre ambos tipos de ciencia, era por medio del uso de programas computacionales basados en modelación iconográfica (Marín, 1997). Pese a que el uso de técnicas de iconográficas tiene limitantes, como la de no poder modelar el espacio de forma explícita, su uso es frecuente en ecología. Por ejemplo, la revista *Ecological Modelling* en sus 38 años, ha publicado más de 200 artículos en los que se describen modelos implementados con dicha técnica. Aun cuando el LME comenzó desde entonces a incentivar el desarrollo de modelos en la docencia de pre y postgrado, hubo que esperar nueve años para la primera tesis doctoral que usó modelación numérica (Rodríguez, 2004) y once años para los primeros seminarios de título (Altamirano, 2006; Tironi, 2006). Con posterioridad, se han desarrollado otras dos tesis de postgrado (Paredes, 2013; Bachmann, 2009) y otro seminario de título (Fischer, 2009).

Si bien la mayor parte de los procesos ecológicos pueden ser modelados con base en su dinámica temporal con omisión del espacio, la heterogeneidad espacial y los procesos que la modifican son parte importante de la estructura y dinámica de los



## Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

ecosistemas. Para el caso de los ecosistemas acuáticos, la heterogeneidad espacial se asocia a los movimientos del agua, proceso conocido como hidrodinámica. Existen para los ecosistemas acuáticos, al menos, dos formas de modelar procesos ecosistémicos si se quiere incluir el espacio de manera explícita: i) desarrollo de modelos numéricos que implementan las ecuaciones tridimensionales de la hidrodinámica acoplados a procesos ecológicos (Rosales y Sepúlveda, 1998; Campuzano y col., 2008; Marín y Campuzano, 2008; Marín y col., 2013), y ii) desarrollo de modelos que simplifican la hidrodinámica por medio del uso de autómatas espaciales asociados a sistemas de información geográfica (Marín y Delgado, 2001). Desde nuestros comienzos hasta ahora, el LME ha desarrollado modelos del primer tipo para el ecosistema marino antártico (Santibañez y Marín, 1998), para los ecosistemas estuarinos de los fiordos australes de Chile (Campuzano y col., 2008; Marín y col., 2013) y recientemente para el humedal del Río Cruces en Valdivia (Proyecto Fondecyt Río Cruces; <http://ecosistemas.uchile.cl>). En todos estos casos, el trabajo de modelación ha incluido una estrecha colaboración con otros grupos en Portugal, Argentina, Brasil y Holanda. Por otra parte, muchos de los modelos hidrodinámicos disponibles, y el POM y MOHID no son la excepción, cuentan con grupos de apoyo y desarrollo que juegan un rol vital al momento de iniciar el desarrollo de aplicaciones (<http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/>; <http://www.mohid.com>). Desde esta perspectiva, la generación de modelos numéricos de ecosistemas es una empresa científica de alta colaboración internacional.

El desarrollo del autómata espacial del kril antártico (*Euphausia superba*) como una forma de modelar la dinámica espacial entre un organismo presa (el kril), sus depredadores naturales (pingüinos) y la flota pesquera, es quizá uno de los mejores ejemplos que podemos describir respecto del uso transdisciplinario de técnicas de modelación (Marín y Delgado, 2001). Una de las etapas del proyecto EIMS (Santibañez y Marín, 1998), con el que se desarrolló el autómata, incluyó entrenamiento para los investigadores respecto de técnicas avanzadas de modelación espacial por medio de Sistemas de Información Geográfica. El entrenamiento, obviamente, no incluía la modelación de la circulación marina antártica y su efecto en la distribución del kril. Sin embargo, sí incluía un ejemplo de un autómata diseñado para estudiar la dispersión del fuego en incendios forestales afectados por corrientes de viento. La metodología usada en dicho ejemplo fue transferida al modelo del kril, cambiando el viento por corrientes marinas y el fuego por kril. Nuevamente, la filosofía detrás de dicha transferencia es la búsqueda de isomorfismos entre sistemas provenientes de distintas disciplinas que caracteriza al pensamiento sistémico transdisciplinario (von Bertalanffy, 1993). Por tanto, el desarrollo de modelos numéricos de ecosistemas se beneficia por un constante flujo de nuevas técnicas y conceptos en áreas tan diversas como los sistemas sociales, tecnológicos y que están disponibles en revistas internacionales de sistemas.



### **Modelos dinámicos**

Los modelos dinámicos son modelos cuantitativos contruidos, por lo general, sobre la base de modelos conceptuales. Ellos incorporan un conjunto de expresiones matemáticas para cada uno de sus elementos (reservorios y procesos). Estas expresiones representan el valor de la variable estado bajo circunstancias particulares.

Existe una gran variedad de tipos de modelos en ecología (Ej: modelos de balance de masa y energía, genética poblacional, de optimización, de estructura poblacional y comunitaria, ecosistémicos, etc.). La decisión de cual se utilizará depende de la aproximación que elija el investigador para resolver un problema particular. Pero lo que tienen en común, es que para realizar un modelo dinámico, se debe tener un conocimiento básico que permita describir el cambio en el tiempo de las variables que son traspasados entre los distintos reservorios, mediante ecuaciones que reflejen estos flujos y la variabilidad en el sistema. Elegir las ecuaciones y los parámetros a utilizar es uno de los primeros pasos cuando se quiere desarrollar un modelo dinámico. Existe mucha literatura disponible con ecuaciones que pueden ser útiles para una infinidad de casos. A modo de ejemplo, una de las más comunes es la ecuación del modelo de crecimiento poblacional exponencial (sin restricción al crecimiento) es:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = r(t)N$$

Donde N es el número de individuos, t es el tiempo y r es la tasa de crecimiento de cada individuo. Esta ecuación indica que el cambio en el número de individuos en el tiempo ( ) depende de la tasa de crecimiento en el tiempo (r(t)), multiplicado por el número total de individuos de una población (N). Esta ecuación, se puede utilizar en diversos modelos pero lo que cambia son los parámetros. La estimación de los parámetros es el proceso de encontrar valores para los distintos términos en las ecuaciones de nuestro modelo cuantitativo. Estos valores se pueden obtener de los datos recolectados, sin embargo, muchas veces no están disponibles todos los datos necesarios, por lo tanto, se deben estimar a partir de la información disponible para lo cual hay varias técnicas. Cuando se desarrolla un modelo cuantitativo, se deben hacer algunas pruebas para comprobar que funcione correctamente. En primer lugar, revisar las ecuaciones utilizadas y que las unidades en que se mide la concentración en los reservorios sean iguales. Y que sean consistentes con las unidades de los flujos los cuales son función del tiempo. Es decir, si los reservorios se describen en términos de volumen (m<sup>3</sup>) y la pregunta se relaciona con cambios diarios, entonces la unidad de flujo deberá ser m<sup>3</sup>/día.

Luego se debe analizar la lógica de los resultados obtenidos para detectar si hay valores extraños o que lleven a conclusiones poco realistas. Si esto ocurre se debe revisar nuevamente la construcción de modelo, las ecuaciones y los parámetros utilizados. El esquema de la Figura 3 muestra de forma resumida los pasos para crear un modelo de simulación. Una vez construido el modelo conceptual del sistema bajo análisis y definidas las ecuaciones que describen su dinámica, el próximo paso es realizar simulaciones que permitan analizar el desempeño del modelo en el tiempo bajo diferentes condiciones o escenarios.

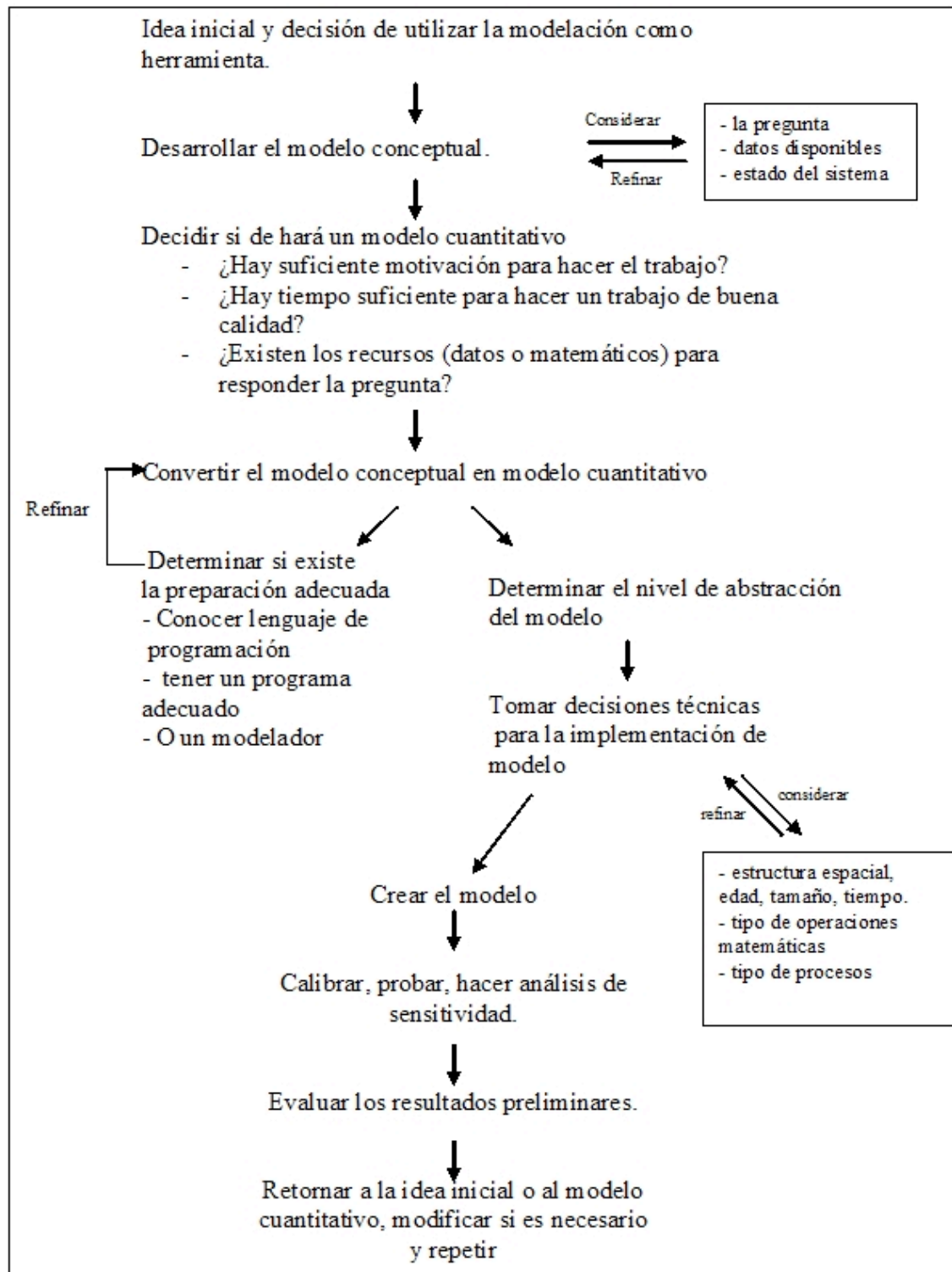


Figura 3. Esquema de los pasos para generar un modelo de simulación de un sistema.



## **Simulación**

Las personas empleadas en empresas privadas ó gubernamentales en cargos de consultores, asesores y técnicos suelen enfrentarse a problemas débilmente definidos, y para los que se dispone de pocos datos, muchas veces de muy baja frecuencia para la dinámica del sistema en cuestión (e.g. datos obtenidos una vez al año en un humedal) y con pocos datos históricos. En estas ocasiones, los modelos de simulación permiten elaborar propuestas de acción, siempre y cuando se trabaje con hipótesis realistas, basadas en el conocimiento existente del sistema en estudio o sistemas similares en otras partes. Para esto se utiliza la "dinámica de sistemas" que es una metodología para analizar sistemas complejos con la ayuda de software de simulación. Esta fue formulada por Jay Forrester en la década del sesenta. Originalmente, Forrester aplicó la dinámica de sistemas para modelar y solucionar problemas en corporaciones industriales. Posteriormente, generalizó su aproximación a temas sociales como la economía, criminología y salud y finalmente la utilizó en las ciencias físicas y biológicas como la ecología. Existe una serie de programas disponibles para la modelación y simulación de sistemas dinámicos, entre los que se incluyen PowerSim, STELLA, ithink, y Vensim.

## **Definición de simulación**

Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de software existente en el mercado, han hecho que esta sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas. Según Thomas H. Taylor la simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos de tiempo. Esta definición es en un sentido muy amplio, pues puede incluir desde una maqueta, hasta un sofisticado programa de computadora. En un sentido más estricto, H. Maisel y G, Gnugnoli, definen simulación como *"una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos períodos de tiempo"*. Otros estudiosos del tema, definen simulación como *"el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema."*

## **Etapas en el desarrollo de una simulación**

Los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación son:

Definición del sistema: Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer un análisis del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.

Formulación del Modelo: Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables que forman parte de él, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa al modelo.

Colección de datos: Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo se puede obtener de registros contables, de órdenes de trabajo, de órdenes de compra, de opiniones de expertos y si no hay otro remedio por experimentación.

Implementación del modelo en la computadora: Con el modelo definido, el siguiente paso, es decidir si se utiliza algún lenguaje como Fortran, Basic, etc., ó se utiliza algún paquete como STELLA, Vensim, etc., para procesarlo en la computadora y obtener los resultados deseados.

Validación: Una de las principales etapas de un estudio de simulación es la validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar un modelo son:

- a) La opinión de expertos sobre los resultados de la simulación
- b) La exactitud con que se predicen datos históricos
- c) La exactitud en la predicción del futuro
- d) La comprobación de falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar el sistema real.
- e) La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados que arroja el experimento de simulación.

Experimentación: La experimentación con el modelo se realiza después de que éste ha sido validado. La experimentación consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.

Interpretación: En esta etapa del estudio, se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a estos se toma una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de una decisión. Es obvio que los resultados que se obtienen de un estudio de simulación ayudan a soportar decisiones del tipo semi-estructurado, es decir, la computadora en si no toma la decisión, sino que la información que proporciona ayuda a tomar mejores decisiones y por consiguiente a sistemáticamente obtener mejores resultados.



### ***Ventajas del uso de simulación***

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La técnica de simulación puede ser utilizada como un instrumento pedagógico para enseñar a estudiante habilidades básicas en análisis estadísticos, análisis teóricos, etc.
- La simulación de sistemas complejas puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en el sistema y a entender mejor de interrelaciones entre estas variables.
- La técnica de simulación puede ser usada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales se tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.
- La técnica de simulación se puede utilizar también para entrenamiento de personal. En algunas ocasiones se puede tener una buena representación de un sistema, y entonces a través de él es posible entrenar y dar experiencias a cierto tipo de personal.
- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede ser usada para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir en el comportamiento del sistema.
- La utilización de software de modelación iconográficos permite visualizar la estructura de los sistemas analizados de forma sencilla y de fácil comprensión. Esto facilita el trabajo multi-disciplinario al ofrecer un lenguaje común para el análisis de sistemas dinámicos.

Por otra parte, las técnicas de simulación presentan el problema de requerir equipo computacional sofisticado y recursos humanos muchas veces costosos. Además, generalmente se requiere bastante tiempo para que un modelo de simulación sea desarrollado y perfeccionado.

### ***Modelación dinámica con el software Stella***

STELLA es un software de modelación dinámica basado en iconos (modelo iconográfico), es un sistema experimental pensante, y puede ser utilizado como un laboratorio de aprendizaje con animación.

STELLA permite simular dinámicas temporales definidas por ecuaciones diferenciales mediante iteraciones consecutivas tomando pequeños intervalos de tiempo ( $dt \rightarrow \Delta t$ ). En otras palabras, STELLA aplica métodos numéricos a la resolución iconográfica de ecuaciones diferenciales.





# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

Por lo tanto este software es útil para la construcción de modelos conceptuales y matemáticos, los que son desarrollados de forma simultánea. Estos modelos han sido una herramienta importante en el desarrollo del "pensamiento sistémico", en su práctica, filosofía y difusión.

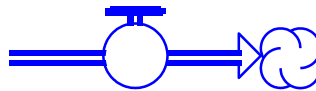
## ***El lenguaje de la simulación dinámica con STELLA***

**Reservorios:** Elemento del sistema donde algo es acumulado, guardado y potencialmente traspasado a otro elemento del sistema. En general, estos cambios son en cantidad de materia ó energía en el tiempo. En términos generales, describe el estado del sistema.



**Variable de estado:** La variable de estado corresponde a la unidad de transferencia o "moneda de cambio" entre los reservorios del modelo, ya sea en gramos, watts, litros, etc.

**Procesos o Flujos:** Entrada ó Salida de materia ó energía, son las tasas de cambio y están determinados en forma de ecuación diferencial, establecen el movimiento de partículas en el sistema.



**Convertidor:** Convierte entradas en salidas, puede mantener valores constantes, definir entradas externas al modelo, calcular relaciones algebraicas.

**Conector:** Flujo de información, simbolizan la interacción entre variables,



A continuación se muestran una serie de ejemplos clásicos de modelo que se pueden construir utilizando el software de modelación iconográfica STELLA.

## ***Un modelo de crecimiento poblacional***

La primera contribución significativa a la teoría de la ecología de poblaciones fue la de Thomas Malthus, un clérigo inglés, quién en 1798 publicó Ensayo sobre el Principio de la Población. Malthus introdujo el concepto de que la demanda de recursos naturales requeridos por una población que aumenta en determinado momento tiene que exceder el suministro; por ejemplo, si una población crece de manera exponencial, esto resulta en un incremento en la competencia por los medios de subsistencia, alimentos, refugios, etc. Este concepto ha sido denominado la "Lucha por la Existencia". El modelo de crecimiento exponencial se describe como:



# Universidad de Chile

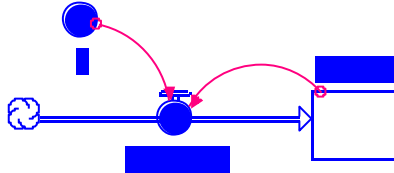
Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

Donde  $r$  es la tasa de crecimiento Poblacional y  $N$  el número de individuos de la población

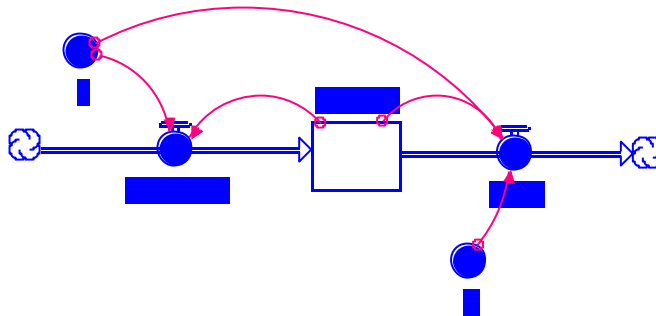
En Stella:



Aun cuando el modelo de crecimiento exponencial es útil, carece del realismo necesario para un buen trabajo ecológico, debido a esto se utiliza el Modelo de Crecimiento logístico:

$$\frac{dN}{dt} = rN\left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad \text{o} \quad \frac{dN}{dt} = rN - \frac{rN^2}{K}$$

Donde se agrega el parámetro  $K$  que simboliza la capacidad de carga del sistema.  
En Stella:



Ahora supongamos que la población que estamos modelando son Liebres, las que son consumidas por una población de Zorros. Para esto utilizaremos un set de ecuaciones que representaran la interacción hospedero/presa, desarrolladas en la década de los años 1920, por A. J. Lotka y V. Volterra. Este fue el primer intento de representar matemáticamente un modelo de población que llegara a un balance cíclico con un promedio (característico) de la media de la densidad de una población, por ejemplo, para lograr un equilibrio dinámico. La curva de Lotka-Volterra asume que la destrucción de la presa es una función, no solo del número de los enemigos naturales, sino también de la densidad de la presa, por ejemplo, en relación con el chance de encuentro. Se predijo que las poblaciones de la presa y del predador fluctuarían de una manera regular (Volterra llamó a esto "la ley de ciclos periódicos"). El modelo de Lotka-Volterra es una sobresimplificación de la realidad, ya que estas curvas se derivan de cálculo infinitesimal, porque en la naturaleza la asociación rara vez es continua a través del tiempo (ya que los ciclos de vida son finitos). El cambio en el número de presas (Liebres) en el tiempo, va a estar determinado por su propio crecimiento poblacional menos los individuos extraídos por depredación, los que serán muertos según una probabilidad de encuentro que es denso dependiente ( $g$ ):



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

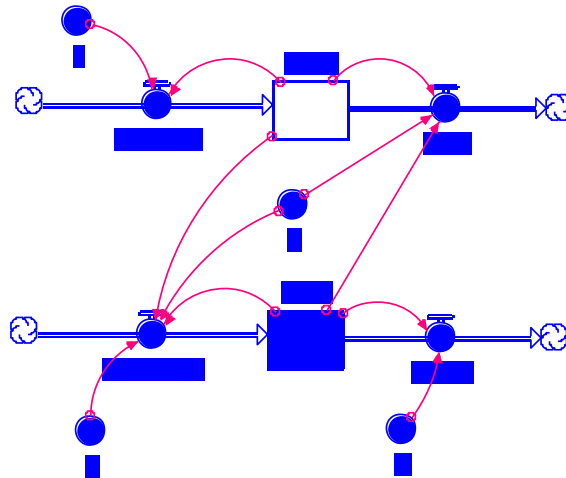
Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

$$\frac{dL}{dt} = r L - g L Z$$

Mientras que el cambio en los depredadores (Zorros) estaría determinado por su mortalidad natural ( $m$ ) y la cantidad de presas necesarias para generar un nuevo depredador ( $w$ ):

$$\frac{dZ}{dt} = g w L Z - m Z$$

En Stella:



## Conceptos importantes – Glosario.

**Variable de estado:** La variable de estado corresponde a la unidad de transferencia o “moneda de cambio” entre los componentes del modelo, ya sea en gramos, watts, litros, etc. Es clave tenerla relativamente clara una idea de la variable de estado antes de definir los reservorios y procesos a modelar.

**Sistema:** Si bien el concepto de sistema es utilizado cotidianamente en una variedad de contextos, para los fines de la modelación dinámica este tiene un significado más específico. En esta sección del informe utilizaremos el término sistema para referirnos a cualquier colección de entidades que incluyan cuatro componentes; reservorios, procesos, convertidores y sus interrelaciones.

**Reservorios:** El concepto de reservorio se refiere a un elemento del sistema donde algo es acumulado, guardado y potencialmente traspasado a otro elemento del sistema. Este algo puede ser biomasa, individuos de una población, etc.

**Procesos:** Entenderemos como procesos a cualquier actividad que ocurra en nuestro sistema que determine el contenido de los reservorios en el tiempo. Son las causas de que exista un traspaso entre los reservorios de nuestro sistema.

**Convertidores:** Los convertidores son variables sistémicas que los flujos entre los reservorios del sistema. Su papel principal es definir las tasas de cambio de los diferentes procesos de nuestro sistema, a la vez definiendo también la variación en el tiempo de los contenidos de los reservorios.

**Condiciones iniciales:** Una vez definido nuestro modelo, con sus reservorios y flujos, es necesario definir las condiciones de partida de nuestra simulación, es decir, los valores iniciales para los reservorios y las tasas de intercambio para los flujos. Estas



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

son las condiciones iniciales de un modelo. Un modelo, al ser una representación de la realidad, necesariamente no es la realidad. Existe una infinidad de componentes, flujos o factores en general que no están incluidos en nuestro intento de representar la realidad. Las condiciones de borde y funciones forzantes son un intento de resumir esa realidad que no incorporamos en nuestro modelo.

**Condiciones de borde:** Son los valores iniciales para todas las entradas del sistema, en relación a los componentes, interacciones y la variable de estado definidos en nuestro sistema.

**Funciones forzantes:** Corresponde a la serie de ecuaciones (elegidas por el investigador, de acuerdo a la pregunta que se quiera responder) que influyen sobre nuestro sistema, pero que no fueron incorporadas en la estructura de nuestro sistema.

**Salto de tiempo:** El salto de tiempo (o  $dt$ ) corresponde al intervalo de tiempo entre cada iteración de las ecuaciones del modelo. En cierto sentido se podría entender como la definición (como el grano de un monitor, o los pixeles de una foto) temporal del modelo.

**Estrategias de modelación:** Las estrategias de modelación se refieren a la cantidad de tiempo simulado, y la consideración en este de un tiempo de inicialización del modelo antes de intentar extraer resultados. En general los primeros momentos de un modelo muestran una alta inestabilidad. El tiempo de duración de la etapa de inicialización dependerá de cada modelo, pero generalmente la señal de que un modelo se estabilizó es bastante clara.

## Futuros posibles

James J. Kay, experto en ecosistemas y uno de los defensores de la idea del uso de ciencia post-normal en ecología (Kay, 2000), siempre propuso que los ecólogos debíamos ser narradores que diéramos a conocer las múltiples alternativas en las que un ecosistema puede cambiar en el tiempo. Estas alternativas no solo dependen del hecho que los ecosistemas son multi-componentes, multi-escalares y multi-procesos, sino que también de la incerteza con la cual los estudiamos y de nuestros sesgos al hacerlo. Lo mismo se puede por tanto decir respecto del análisis de la ciencia ecosistémica a futuro, si empleamos para su análisis la aproximación sistémica. Es por ello que hemos titulado esta sección "futuros posibles"; la idea es que el lector sepa que quienes hemos pensado respecto del futuro de aquello en lo que trabajamos, lo presentamos como alternativas dentro de las tantas que podrían existir. El análisis se realizó sobre la base de responder la pregunta: ¿cómo vemos a la generación de modelos de ecosistemas en los siguientes 30 años?, usando la técnica de 'lluvia de ideas' que desarrollamos en el pasado (Marín y col., 2008).

Datos, datos y más datos: no nos cabe ninguna duda de que la generación de modelos de ecosistemas depende en gran medida de la disponibilidad de datos y que en la medida que avance el primero, se requerirá cada vez de una mayor cantidad y frecuencia de información de terreno. Una de las soluciones para ello, y que en la actualidad ya existe para algunas variables y ecosistemas, es el desarrollo de sistemas autónomos de toma de datos, conectados a través de Internet a los centros de estudio académico (e.g. LME, 2012). Ello, sin embargo, requerirá de una capacidad de



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

almacenamiento masivo de datos. Por otra parte, nos ha parecido importante destacar la idea de que las grandes fuentes de financiamiento de la investigación científica (e.g. Fondecyt en Chile) deberían hacer esfuerzos para disponer de bases de datos provenientes de los proyectos que financian, más allá de las publicaciones que se requieren de cualquier proyecto financiado.

De los modelos ecológicos a los socio-ecológicos: hace ya un tiempo que la comunidad científica aceptó la idea de que estamos viviendo en el antropoceno, una era caracterizada por la presencia dominante de la especie humana a escala planetaria y con influencia en casi todos los ámbitos imaginables. Es por ello que vemos que los modelos ecosistémicos deberían transitar desde los sistemas ecológicos a los sistemas socio-ecológicos, incorporando no solo los efectos antropogénicos sino que las incertezas propias del devenir y conocimiento humanos. Es desde esta perspectiva que vemos que a futuro debería existir un mayor acercamiento entre las ciencias sociales y la ecología de forma de poder responder a la creciente demanda de modelos que incorporen ambos tipos de componentes y procesos.

Ecosistemas y evolución: la aceptación respecto de la inminencia o presencia actual del cambio climático a nivel global, ha forzado a muchos ecólogos sistémicos a plantearse la necesidad de poder incorporar en sus modelos las potenciales respuestas a futuro de los componentes biológicos. Ello implica acercar las visiones sistémicas y evolutivas de manera de tener una base sólida para propuestas respecto de futuros cambios en los ecosistemas (Loreau, 2011). Aun cuando tal esfuerzo es compartido por nosotros en cuanto a su necesidad, ello representa también un problema al momento de validar los modelos resultantes. Sin embargo, la validación es uno de los temas más controversiales respecto de los modelos ecológicos (Rykiel, 1996; Oreskes y col, 1994) y seguramente lo seguirá siendo. Ello, sin embargo, no debería usarse como un obstáculo insalvable para detener la necesaria conjunción de modelos sistémico-evolutivos, que deberían ser el siguiente gran salto en el desarrollo de modelos ecológicos.

Formación de nuevos modeladores: decir que faltan modeladores de sistemas ecológicos o socio-ecológicos en Chile en particular, y América Latina en general, es subestimar el problema. Nuestros esfuerzos en contribuir a la formación de nuevos modeladores han demostrado que ello requiere de tiempo y de generar las condiciones para que tal educación sea hecha desde una perspectiva transdisciplinaria. Por tanto, aquí se presenta la disyuntiva: seguir proponiendo la necesidad de contar a futuro con una unidad académica que continúe con el desarrollo iniciado hace casi veinte años, versus, dejar que el desarrollo de la ciencia local tome el camino que la contingencia dicte cuando llegue el momento. Ciertamente que nuestra visión del desarrollo de la ecología a futuro sugiere que el Departamento de Ciencias Ecológicas debería seguir con el apoyo al desarrollo de líneas múltiples tales como las que hoy existen, incluyendo la visión sistémica. Por otra parte, existen en la actualidad investigadores jóvenes que se están formando en otras partes del mundo y que al terminar vendrán a nuestro país con el propósito de contribuir al desarrollo de la ecología. Si se considera que algunos de ellos están formándose en los ámbitos requeridos para el desarrollo de estudios sistémicos en ecología, creemos que el mantener y desarrollar la visión ecosistémica es un punto importante para los siguientes 30 años del DCE.



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

Centros de transdisciplina o multidisciplina: la necesidad de proponer explicaciones, narrativas y eventualmente soluciones a los problemas eco-sociales (e.g. cambio climático) que enfrentamos en la actualidad y a futuro, requerirá de intensificar e incentivar las interacciones entre distintos especialistas. Ello requerirá la adecuación del sistema universitario actual a una mayor flexibilidad respecto de la adscripción académica a compartimentos estancos como lo es en la actualidad. El desarrollo de proyectos sistémicos eco-sociales podría a futuro requerir de la generación de Centros al interior de la Universidad en los cuales interactúen ecólogos, matemáticos, meteorólogos, geofísicos, sociólogos, historiadores, etc. Dichos centros deberían, además, estar abiertos a la participación social proveniente de los actores que forman parte de los socio-ecosistemas a analizar. Existen variadas formas de lograr lo anterior, el punto es que se debería iniciar el proceso de análisis de forma de asegurar que cuando llegue el momento, el sistema universitario estará preparado para responder al desafío que significa dar respuestas a la sociedad respecto de su propio devenir en condiciones de alta incerteza.

Ética, moral, robótica y automatización: Es un hecho del desarrollo actual, que los sistemas informáticos tienden cada vez más a la automatización y a la inteligencia artificial. De continuar, uno podría plantearse un futuro en el cual muchas decisiones pasen por aceptar los resultados que generen modelos "inteligentes". Sin embargo, aun en presencia de tales sistemas, se requerirá la presencia de seres humanos que tengan la capacidad de contextualizar, integrar e interpretar el resultado de los modelos de forma que éstos tengan un sentido social, éticamente y moralmente validados. Es por ello que se hace necesario reforzar los programas de pregrado y postgrado en temáticas como filosofía de la ciencia, epistemología y otros que contribuyan a una visión integral de los futuros ecólogos.

Modelos remotos y colaboración internacional: hace un tiempo atrás, si se nos hubiera preguntado qué es lo que se necesita para desarrollar modelos tridimensionales de sistemas ecológicos, seguramente hubiésemos dicho que una capacidad fundamental era el poseer grandes sistemas informáticos. Hoy, tal perspectiva ha cambiado y la respuesta va más bien por poseer un efectivo sistema de comunicación, i.e. Internet. Existen en la actualidad muchos sistemas informáticos disponibles en el mundo que pueden albergar grandes modelos y en los cuales se pueden desarrollar interfaces de colaboración entre colegas de todo el mundo. Ello requiere más bien que los grupos académicos generen interacciones con colegas en todo el mundo. La facilitación de dichas interacciones por medio de sistemas eficientes de comunicación debiera ser uno de los desafíos de las instituciones académicas a nivel Latinoamericano.

Al terminar este documento queremos dejar un mensaje de entusiasmo respecto del futuro de la ecología de ecosistemas o socio-ecosistemas. Cuando partimos con el LME éramos un pequeño grupo y aun lo somos. Sin embargo, por medio de la colaboración internacional hemos podido desarrollar un estilo de hacer ciencia que creemos seguirá siendo válido por algún tiempo. En la medida que la humanidad se encamina hacia una intervención cada vez mayor en la ecología del planeta, se necesitarán científicos capaces de entender, y por qué no, anticiparse al futuro, con el propósito de evitar, si ello es posible, respuestas catastróficas. La generación de modelos de sistemas complejos, con toda seguridad, jugará un rol fundamental en tales desafíos y nosotros estaremos ahí para aceptarlos como lo hemos hecho durante ya 18 años.



# Universidad de Chile

Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

## Bibliografía de referencia

- Allesina S, Levine JM. 2011. A competitive network theory of species diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:5638-5642.
- Altamirano T. 2006. Modelación del flujo de nitrógeno en la subcuenca de Mañihuales, Aysén. Seminario de Título para optar al título de Biólogo Ambiental con mención en medio ambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 48 pp.
- Bachmann PL. 2009. Comparación de la exportación de nitrógeno desde un ecosistema forestal versus un ecosistema pastoril, a través de la aplicación de modelos de simulación. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Biológicas con mención en ecología y Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 77 pp.
- Bunge M. 2012. *Ontología II: Un mundo de sistemas. Tratado de Filosofía. Volumen 4.* Editorial Gedisa, Barcelona España, 403 pp.
- Campuzano FJ, Leitão PC, Gonçalves MI, Marín VH, Tironi A. 2008. Hydrodynamical vertical 2D model for the Aysén fjord. In: Neves R, Bretta JW, Mateus M. (eds.) *Perspectives on integrated coastal zone management in South America.* IST Press, Lisboa, Portugal. pp. 555-566.
- Contreras MA. 1998. Flujo de carbono en el ecosistema Río Clarillo. Autotrofia v/s heterotrofia. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias c/ Mención Biología. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 147 pp.
- De Groot R, Brander L, van der Ploeg S, Costanza R, Bernard F, Braat L, Christie M, Crossman N, Ghermandi A, Hein L, Hussain S, Kumar P, McVittie A, Portela R, Rodriguez LC, ten Brink P, van Beukering P. 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services* 1:50-61.
- Delgado LE, Marín VH, Bachmann PL, Torres-Gómez M. 2009. Conceptual models for ecosystem management through the participation of local social actors: the río Cruces wetland conflict. *Ecology and Society* 14:50. (visita: agosto 2013) <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss1/art50/>
- Delgado LE, Marín VH. 2005. FES-sistema: un concepto para la incorporación de las sociedades humanas en el análisis medioambiental en Chile. *Ambiente y Desarrollo de CIPMA* 21:18-22.
- Delgado LE, Sepúlveda MB, Marín VH. 2013. Provision of ecosystem services by the Aysén watershed, Chilean Patagonia, to rural households. *Ecosystem Services* (visita: agosto 2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.04.008>.
- Delgado LE. 1996. Estudio comparativo de contenidos de cobre en bosques de clima mediterráneo de Chile central. Tesis para optar al grado de Magister en ciencias Biológicas c/ mención en ecología. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 80 pp.
- Eklöf A, Helmus MR, Moore M, Allesina S. 2012. Relevance of evolutionary history for food web structure. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279:1588-1596.
- Fischer MF. 2009. Nutrientes en ecosistemas acuáticos someros: un modelo dinámico del fósforo en el Humedal Río Cruces. Seminario de Título para optar al título de Biólogo Ambiental con mención en medio ambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 48 pp.
- Fischer SK. 2013. Modelo conceptual para la restauración ecológica de humedales: caso de estudio El Humedal de Río Cruces. Seminario de Título para optar al título de Biólogo Ambiental con mención en medio ambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 102 pp.
- Funtowicz SO, Ravetz JR. 2000. *La Ciencia Posnormal.* Icaria Editorial S.A., Barcelona.
- Guimarães MH, Ballé-Béganton J, Bailly D, Newton A, Boski T, Dentinho T. 2013. Transdisciplinary conceptual modeling of social-ecological system, a case study application in Terceira Island, Azores. *Ecosystem Services* 3:22-31.
- Jopp F, Reuter H, Breckling B. 2011. *Modelling complex ecological dynamics. An introduction to ecological modelling.* Springer Verlag, Berlín. 397 pp.
- Jørgensen SE, Müller F. 2000. *Handbook of ecosystem theories and management.* Lewis Publishers, London.



# Universidad de Chile

## Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

### Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

- Jørgensen, SE. 1975. About "Ecological Modelling". *Ecological Modelling* 1:1-2.
- Kay JJ. 2000. Ecosystems as self-organising holarchic open systems: narratives and the second law of Thermodynamics. In Jørgensen SE, Müller F (eds.) pp. 135-159. *Handbook of ecosystem theories and management*.
- Keller DR, Golley FB. 2000. The philosophy of ecology. From Science to synthesis. The University of Georgia Press, Georgia, USA. 366 pp.
- LME 2012. Plan de Gestión Ambiental de la Bahía Mejillones del Sur. Informe final. (visita: agosto 2013) [http://ecosistemas.uchile.cl/bmejillones/documentos/informes/Informe\\_final.pdf](http://ecosistemas.uchile.cl/bmejillones/documentos/informes/Informe_final.pdf) 65 pp.
- Loreau M. 2011. Linking biodiversity and ecosystems: towards a unifying ecological theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 365:49-60.
- Lotka AJ. 1956. *Elements of mathematical biology*. Dover Publications, Inc. New York. 465 pp.
- Marín VH, Campuzano FJ. 2008. Un modelo hidrodinámico-barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41° S y los 46°S. *Ciencia y Tecnología del Mar* 31:125-136.
- Marín VH, Delgado LE, Bachmann P. 2008. Conceptual PHES-system models of the Aysén watershed and fjord (Southern Chile): testing a brainstorming strategy. *Journal of Environmental Management* 88:1109-1118.
- Marín VH, Delgado LE. 2001. A spatially explicit model of the Antarctic krill fishery off the South Shetland Islands. *Ecological Applications* 11:1235-1248.
- Marín VH, Delgado LE. 2013. From ecology to society and back: the (in)convenient hypothesis syndrome. *International Journal of Sustainable Development* 16:46-65
- Marín VH, Rodríguez LC, Niemeyer HM. 2012. A socio-ecological model of the Opuntia scrublands in the Peruvian Andes. *Ecological Modelling* 227:136-146.
- Marín VH, Tironi A, Paredes MA, Contreras M. 2013. Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecological Modelling* 264:7-16.
- Marín VH. 1997. A simple-biology, stage-structured population model of the spring dynamics of *Calanus chilensis* at Mejillones del Sur bay, Chile. *Ecological Modelling* 105:65-82.
- Matthews B, Narwani A, Hausch S, Nonaka E, Peter H, Yamamichi M, Sullivan KE, Bird KC, Thomas MK, Hanley TC, Turner CB. 2011. Toward an integration of evolutionary biology and ecosystem science. *Ecology Letters* 14:690-701.
- Mcintyre S, Lavorel S. 2007. A conceptual model of land use effects on the structure and function of herbaceous vegetation. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 137:183-191.
- Meadows DH. 2008. *Thinking in systems. A primer*. Chelsea Green Publishing, Vermont, USA. 218 pp.
- Moody DL. 2005. Theoretical and practical issues in evaluating the quality of conceptual models: current state and future directions. *Data & Knowledge Engineering* 55:243-276
- Oreskes N, Shrader-Frechette K, Belitz, K. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science* 263:641-646.
- Paredes MA. 2013. Estudio de la dinámica del microfitoplancton de los fiordos australes mediante modelación numérica: efectos de los cambios en la proporción nitrógeno orgánico / nitrógeno inorgánico. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias con mención en ecología y Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 181 pp.
- Parysow P, Gertner G. 1997. Virtual experimentation: conceptual models and hypothesis testing of ecological scenarios. *Ecological Modelling* 98:59-71
- Rodríguez LC. 2004 Valoración de servicios ecosistémicos y cambio en el uso del suelo. La importancia del capital social en los Andes Peruanos. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias con mención en ecología y Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. 147 pp.
- Rosales S, Sepúlveda A. 1998. Modelling the transport of krill in the South Shetland marine ecosystem: a biological model coupled to the Princeton Ocean Model. In: Santibañez F, Marín VH (eds.) pp. 298-310. *Computer tools for sustainable management of arid and Antarctic ecosystems*. Alfabeta Artes Gráficas, Santiago de Chile.
- Rykiel EJ Jr. 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229-244.





# Universidad de Chile

## Facultad de Ciencias-Laboratorio de Modelación Ecológica

### Documento de Consulta- Curso: Modelación dinámica y espacial 2016

---

- Santibañez F, Marin VH. 1998. An environmental information and modeling system (EIMS) for sustainable development. Computer tools for sustainable management of arid and Antarctic ecosystems. Alfabeta Artes Gráficas, Santiago de Chile. 317 pp.
- Sepúlveda MB. 2010. Análisis de los servicios ecosistémicos de la cuenca del Río Aysén: selección de metodologías de valoración económica y pago por servicios ambientales (PAS). Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero en Recursos naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 105 pp.
- Tironi A, Marin VH, Campuzano FJ. 2010. A management tool for assessing aquaculture environmental impacts in Chilean Patagonian fjords: integrating hydrodynamic and pellets dispersion models. *Environmental Management* 45:953-962.
- Tironi A. 2006. Herramienta de gestión para la salmonicultura en Bahía Chacabuco. Seminario de Título para optar al título de Biólogo Ambiental con mención en medio ambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 42 pp.
- Van den Belt M. 2004. Mediated modeling. A system dynamics approach to environmental consensus building. Island Press, Washington, D.C.
- Von Bernath Z. 2013. Propuesta teórica de una estrategia de pago por servicios ecosistémicos (PSE) para el humedal del Río Cruces. Seminario de Título para optar al título de Biólogo Ambiental con mención en medio ambiente. Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 108 pp.
- Von Bertalanffy L. 1993. Teoría general de sistemas. Fondo de Cultura Económica, México, 311 pp.
- Waltner-Toews D, Kay JJ, Neudoerffer C, Gitau TH. 2003. Perspective changes everything: managing ecosystems from inside out. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1:23-30.
- Whipple SJ, Patten BC, Verity PG. 2005. Life cycle of the marine alga *Phaeocystis*: A conceptual model to summarize literature and guide research. *Journal of Marine Systems* 57:83-110
- Yarrow MM, Tironi A, Ramírez A, Marín VH. 2008 An applied assessment model to evaluate the socioeconomic impact of water quality regulations in Chile. *Water Resources Management* 22:1531-1543.