



# Cómo anticipar problemas de tipo bioclimático



La simulación dinámica de escenarios en la naturaleza es una herramienta útil para entender cómo funcionan los sistemas naturales, identificar sus potenciales problemas y explorar soluciones para éstos.

El éxito en el manejo del cambio ambiental se basa en la capacidad de anticipación que tengamos. El agotamiento de los recursos naturales que sostienen las economías regionales así como el deterioro de agua, suelo y aire son verdaderas amenazas para nuestra civilización. El continuo abastecimiento de agua y alimentos, así como la conservación de nuestra salud, depende de nuestra habilidad para anticipar y prepararnos para un futuro incierto.

Los escenarios generados por procesos de simulación proveen un indicador de posibilidades (no algo definitivo) y sirven de base para realizar proyecciones que aplican las herramientas del pronóstico bioclimático en escenarios específicos. Los ecosistemas pronosticables son aquellos en los que la incertidumbre puede ser reducida a la magnitud en que, por medio de los pronósticos, estamos reportando información útil para la toma de decisiones.

La simulación no es un fin en sí misma, tampoco es una bola de cristal que pueda pronosticar el futuro con absoluto detalle y exactitud, pero sí puede ayudarnos a entender los mecanismos internos que determinan cómo trabaja un sistema, por medio de la descripción de sus procesos y transformaciones, la identificación de posibles mecanismos detrás de los ciclos y tendencias observadas durante plazos largos. Permite determinar, además, cómo

# o las dificultades del pronóstico

Carlos Gay García, René Garduño López y Walter Ritter Ortiz



mo mantiene su estabilidad el sistema, reconocer los mecanismos por los cuales puede perderla, y pronosticar futuras manifestaciones de los sistemas existentes; proyectar ciclos y tendencias, evaluar los impactos de políticas opcionales e identificar escenarios en donde la estabilidad se pierda o se restaure.

No debemos olvidar que la utilidad de un modelo se puede juzgar tanto por la cantidad de información que pueda aportarnos con el máximo posible de economía, como por la facilidad con la cual nos permita comunicarnos de forma más efectiva con dicho modelo y lo que éste representa.

#### Simulación con enfoque sistémico

Los modelos generalmente no capturan de forma precisa toda la realidad y esto se refleja en el hecho de que muchos de ellos, ampliamente usados en

el campo ambiental, deben ser continuamente ajustados y refinados. Pero, finalmente, lo más valioso de un modelo es su capacidad para detectar los cambios y las fluctuaciones, y para identificar las variables críticas responsables de dichos cambios, así como capturar y entender los efectos de retroalimentación en el sistema, ya que en los sistemas dinámicos sus elementos se modifican de manera constante y complicada, e incluso sorpresiva.

El objetivo no es por tanto desarrollar modelos que capturen todas las facetas de la vida diaria, ya que tales modelos tendrían poca utilidad al ser tan complicados como los sistemas mismos que deseamos entender. El verdadero propósito de la modelación dinámica es llegar a descubrir los principios básicos que nos conduzcan a descubrir la complejidad observada en la naturaleza. Para nosotros esto es el significado de simplicidad.

La posibilidad de comprender todo lo comprensible depende más de la estructura de nuestro conocimiento que de su contenido, de que nuestras teorías lleguen a ser tan generales y tan profundas, a estar tan integradas entre sí, que se conviertan, de hecho, en una sola teoría de una estructura unificada de la realidad.

Las estimaciones iniciales de simulación pueden ser derivadas de la información empírica o aun de sugerencias razonables de los expertos en la materia o del equipo de modeladores; ya que incluso los modelos construidos en tales situaciones de incertidumbre pueden ser de gran valor y utilidad en la toma de decisiones, proveyéndonos de un cuadro congruente de referencia, en lugar de información exacta.

El flujo de información de una variable de estado dentro de un sistema se hace a través de cadenas de trans-

formación para dirigirnos a las variables de control, cambiando así las primeras y entrando en ciclos siempre cambiantes, para al final volver a otra variable de estado o tal vez irse hacia el infinito, el cero o el comportamiento caótico. Esto nos habla de un proceso de retroalimentación, hecho tan común en los sistemas ambientales.

La retroalimentación negativa tiende a forzar las variables de estado hacia metas establecidas y es la idea básica de los sistemas dinámicos de control. La variación en el proceso de retroalimentación puede llevarnos a relaciones no lineales, las cuales se hallan presentes si una variable de control no depende de otras variables de manera lineal. Como resultado, los procesos de retroalimentación no lineales pueden exhibir comportamientos dinámicos complejos; por ello, debemos poner especial atención a la no linealidad, particularmente si se trata de efectos de retraso.

#### Autoorganización y sistemas disipativos

Los modelos son herramientas para detectar patrones o tendencias que pueden ser útiles para generar hipótesis comprobables acerca de la organización de comunidades bióticas. La abundancia relativa de grandes ensambles heterogéneos de especies tiende a ser gobernada por muchos factores independientes y, de acuerdo con el teorema de límite central, será distribuida en forma log-normal. Un alto grado de ajuste al modelo log-normal indica que la comunidad está en alto grado de equilibrio. Sin embargo, buenos ajustes a la distribución log-normal pueden ocurrir a pesar de los cambios

y condiciones en la composición de la comunidad.

La principal motivación para crear los modelos de distribución fue desarrollar un modelo general de abundancia de especies para facilitar la comparación de diversas comunidades por



sus diferencias o similitudes con los parámetros del modelo, el cual potencialmente daría información fundamental de los nichos de las especies y cómo las especies coexisten o comparten los recursos ambientales disponibles. Aunque tal modelo general sería una herramienta valiosa para el ecólogo, no parece existir tal paradigma general, revelándose que hipótesis contradictorias pueden llevarnos al

mismo modelo y diferentes modelos derivados de postulados en conflicto, pueden ser ajustados al mismo grupo de datos.

El mayor obstáculo por resolver al usar índices de diversidad es su interpretación, ya que si se da sólo el valor del índice de diversidad, es imposible decir la importancia relativa de riqueza y uniformidad, pues alta riqueza y baja homogeneidad será equivalente a un sistema de baja riqueza y alta homogeneidad.

En general podemos decir que un ecosistema será más complejo conforme sea más maduro, cualidad que aumenta con el tiempo que permanezca sin ser perturbado. La sucesión ecológica nos lleva a considerar como más maduro o más complejo un ecosistema cuando esté compuesto de un mayor número y grado de interacción de sus elementos, si se presentan largas cadenas alimenticias, un uso más completo del alimento, relaciones bien definidas o más especializadas, situaciones más predecibles, promedio de vida mayor, menor número de hijos; entonces la organización interna pasa por





perturbaciones aleatorias a ritmos cuasi-regulares.

#### La biogeografía y la escala global

Si se desea pronosticar futuros procesos de producción, será necesario tener una descripción de estos sistemas en su ambiente particular, que incluya tantos detalles relevantes como sea posible. Debemos estar interesados en todas las interacciones que controlan o alteran el número o tipo de organismos encontrados en una región dada; ya que una noche fría o una hora de fuerte viento pueden producir grandes diferencias en el mundo biológico. Tal información puede ser usada para construir una simulación pobla-

cional, la cual puede ser empleada para predecir los efectos de políticas particulares de administración. El valor de la simulación es obvio pero su utilidad reside principalmente en que analiza casos particulares.

Una teoría bioclimática debe de hacer, preferentemente, afirmaciones sobre el ecosistema como un todo global, así como de especies y tiempos en particular, y aseveraciones válidas para muchas especies y no solamente para una. La alternativa es intentar analizar la naturaleza de tal manera que pueda ser descrita en forma rigurosa, que las predicciones puedan ser derivables mediante procedimientos reproducibles, y que sean capaces de definir, en algún grado, la diferencia entre

lo que conocemos sobre bases teóricas y lo que nos falta por hacer, antes de que podamos realizar predicciones más seguras.

Una descripción matemática precisa de los sistemas productivos puede incluir cientos de parámetros, muchos de los cuales son difíciles de medir, y cuyos resultados esperados —a partir de las muchas ecuaciones diferenciales parciales simultáneas no-lineales de simulación— usualmente no tienen solución, ya que las respuestas son complicadas expresiones de los parámetros y no son fáciles de interpretar. Claramente se observa la necesidad de diferentes metodologías para tratar con estos sistemas que son intrínsecamente complejos.

El establecimiento de relaciones clima-vegetación puede ser útil para propósitos de pronóstico, ya que la vegetación refleja el ambiente, y los cambios en uno pueden llegar a resultar en cambios en el otro, y tales cambios pueden ser usados para evaluar la naturaleza y la magnitud del impacto ambiental.

Cualquier modelo puede ser considerado como una teoría surgida de los datos y necesitamos evaluar su exactitud predictiva, su generalidad, complejidad e interpretabilidad. No debemos buscar una solución a un problema específico de predicción, sino buscar aquellas características que nos permitan predicciones más generales. Identificar patrones activos, definiendo el interés en términos de utilidad para obtener algún fin, por lo que la exactitud de las predicciones no debe ser lo único a juzgar.

Se puede encontrar patrones similares de interacción en sistemas muy

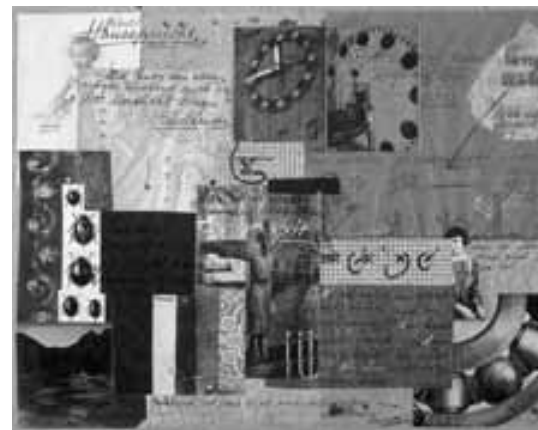
diferentes y, una vez que los patrones básicos son entendidos, todos los sistemas pueden ser comprendidos.

Los modelos nos permiten realizar deducciones, formular hipótesis y predecir resultados —así se construyen las teorías—, y en un despliegue de sistemas, las leyes se revelarán por sí mismas con este nuevo enfoque; las pautas básicas se deben clasificar y los conceptos básicos se deben inferir. Los sistemas complejos que cuentan con una gran riqueza de conexiones cruzadas muestran conductas complejas y estas conductas pueden ser complejas pautas de búsqueda de metas.

Las matemáticas de la complejidad de la naturaleza pasan de los objetos a las relaciones, de la cantidad a la cualidad y de la sustancia al patrón de la forma, eludiendo todo modelaje mecanicista; las simples ecuaciones deterministas pueden producir una in-

sospechada riqueza y variedad de comportamientos. A su vez, lo que pareciera un comportamiento aparentemente complejo y caótico puede dar lugar a estructuras ordenadas con sutiles y hermosos patrones de formas, con frecuentes ocurrencias de procesos de retroalimentación autorreforzadora donde pequeños cambios pueden ser repetidamente amplificados. La mayor contribución de Henri Poincaré fue la recuperación de las metáforas virtuales, rompiendo el dominio del análisis y las fórmulas, y volviendo a los patrones visuales.

La predicción exacta, aun para las ecuaciones estrictamente deterministas, no existe; pero ecuaciones simples pueden producir una increíble complejidad que supera todo intento de predicción. La organización del sistema complejo es independiente de las propiedades de sus componentes y su objetivo es la organización y no



la estructura, en donde la función de cada componente es participar activamente en la producción o transformación de otros componentes del sistema. El producto de su operación es su propia organización, donde toda la red se hace a sí misma continuamente.

#### Anticipación a problemas ambientales

Anticiparnos a muchos de nuestros desafíos ambientales por venir en las próximas décadas requiere un mejoramiento sustantivo en las actuales metodologías de adquisición de conocimiento científico. La simulación y el pronóstico ecológico deben emerger como un imperativo para mejorar la planeación y la toma de decisiones acerca del estado de los ecosistemas y de su capital natural productivo, ya que pueden dotarnos de la capacidad de producir, evaluar y comunicar dichos pronósticos en aquellos estados críticos que requieran un proceso de atención inmediata, que involucren ligas interdisciplinarias y análisis de sus posibles procesos de propagación y retroalimentación —incluidos los procesos evolutivos y emergentes—, y que consideren los impactos sociales y la relevancia del pronóstico en los procesos de toma de decisiones.





Con base en la nueva ciencia del enfoque sistémico se propone la creación de un modelo general de simulación y pronóstico, que de forma integrada responda a una serie de cuestionamientos sobre ecología, manejo de recursos naturales y evaluación de impacto ambiental. La visión filosófica de este modelo tiene su fundamento en el enfoque sistémico derivado de la teoría general de sistemas, cuyo proceso metodológico nos permitirá la creación de los escenarios requeridos para una mejor toma de decisiones.

Definimos el pronóstico ecológico como el proceso de predecir el estado del ecosistema, de sus servicios por aportar, su capital natural de crecimiento, contingencias y escenarios sobre el clima, uso de suelo, población humana, tecnologías, actividad económica y educativa.

A fin de utilizar aspectos de metodologías comunes en los diferentes proyectos por desarrollar, es necesario incorporar en los objetivos de este estu-

dio un proceso de descripción general de las mencionadas metodologías del enfoque sistémico a utilizar en el desarrollo de dicho modelo y en los posibles proyectos por derivarse de éste. Esto permitirá conseguir una mayor homogeneidad y cohesión de los propósitos, así como una mayor sistematización en la obtención de los objetivos planteados. El objetivo consiste no sólo en ofrecer un planteamiento coherente y sistémico de una visión unificada de la vida y el ambiente, sino también de algunas de las cuestiones críticas de la economía, sociales y personales que vivimos en nuestra época y que actúan como procesos de retroalimentación de los objetivos iniciales.

Cuando nos encontramos con un problema de tipo ambiental, o de cualquier otro tipo, y necesitamos resolverlo, además de considerar las interacciones de los factores físicos, biológicos y ecológicos, debemos tomar en cuenta también los factores económicos, culturales y legales. Si abordamos estos problemas por métodos simplistas llegaremos al diseño de experimentos y muestreos de baja calidad que nos conducirán a tomar decisiones erróneas e inadecuadas. El análisis de sistemas para la solución de estos problemas se basa en un planteamiento holístico con los modelos matemáticos requeridos para identificar, simular y predecir las características importantes de la dinámica de estos sistemas considerados como complejos.

El origen de la visión de sistemas se remonta al periodo de la Segunda Guerra Mundial y estuvo relacionado con la solución de problemas de tipo logístico. Actualmente el uso de esta perspectiva en ecología, climatología,

evaluación, manejo de recursos naturales, simulación y pronóstico de impacto ambiental, consiste en proporcionar un enfoque que permita abordar la solución de dichos problemas en los sistemas complejos (como lo son todo tipo de ecosistemas conocidos) y que además promueva el diseño de proyectos de investigación que nos ayuden a tomar decisiones adecuadas, mediante la utilización del método científico como una forma de resolver dichos problemas, basándose en una observación disciplinada y en la manipulación de las partes del mundo real que resulten interesantes en el contexto del problema en estudio.

Como climatólogos, ecólogos y administradores de los recursos naturales, frecuentemente debemos analizar sistemas que se caracterizan por una complejidad organizada, como cuando se cuenta con poca información, pocos datos y poca expectativa de generar una base de datos completa. Para esto es precisamente que ha sido diseñado y desarrollado el análisis de sistemas y sus metodologías de investigación, que permiten integrar el conocimiento ob-





tenido por medio de la descripción, la clasificación y el análisis matemático y estadístico de las observaciones del mundo real.

En el modelo tradicional los expertos interpretan los datos, eligiendo algunos de sus aspectos e ignorando otros. Necesitamos una amplia distribución de información, puntos de vista e interpretaciones, si queremos entender el significado del mundo en que vivimos; el cual debe entenderse como un mundo de procesos, no de objetos. La grandiosa meta de toda ciencia es abarcar el mayor número de hechos empíricos por deducción lógica a par-

tir del menor número de hipótesis o axiomas, como solía decir Einstein; y como Mandelbrot remarca, en un mundo cada vez más complejo, los científicos necesitan tanto las imágenes como los números, es decir la visión geométrica y la analítica.

Necesitamos partir de un marco teórico para el desarrollo, evaluación y uso de los modelos de simulación y pronóstico en impacto ambiental, climatología, ecología y manejo de los recursos naturales. Donde en el desarrollo del modelo conceptual podamos abstraer del sistema real aquellos factores y procesos que deben ser inclui-

dos dentro del modelo por ser relevantes en nuestros objetivos específicos y de tal manera que en la evaluación del modelo se compare el enfoque de sistemas con otros métodos utilizados para resolver problemas en estas y otras áreas.

El modelo puede ser de lo más simple, siempre y cuando no excluya aquellos componentes cruciales para su solución y la toma de decisiones esté basada en información de la mejor calidad acerca del sistema en estudio. En otro caso podrá ser necesario monitorear varios atributos del sistema en forma simultánea, clasificando los componentes del sistema de interés por sus diferentes funciones en el modelo. Dichos componentes se pueden clasificar como variables de estado, variables externas, constantes, variables auxiliares, transferencias de materia, energía e información, fuentes y sumideros.

Obviamente, si con los conocimientos adquiridos no podemos formular hipótesis útiles acerca de la estructura y funcionamiento del sistema, debemos concentrar nuestro esfuerzo en realizar nuevas observaciones en el sistema natural. La idea básica fundamental detrás de todo esto es que podamos realizar experimentos de simulación en la misma forma que en un laboratorio o en la naturaleza misma.

El estudio se justifica por nuestro interés en lograr un crecimiento económico sin destruir los sistemas ecológicos que forman la base de nuestra existencia. Necesitamos introducir el uso del análisis de sistemas y su simulación como herramienta de apoyo para resolver los problemas de impacto ambiental que a diario se nos presentan, para que nos ayuden en la toma

de las mejores decisiones. El análisis de sistemas y su simulación es un conjunto de técnicas cuantitativas desarrolladas con el propósito de enfrentar problemas relacionados con el funcionamiento de los sistemas complejos, como son los diferentes tipos de ecosistemas conocidos.

La utilidad del análisis de sistemas y su simulación se da tanto por el proceso de identificación y especificación de los problemas, como por el desarrollo, usos y producto final del modelo.

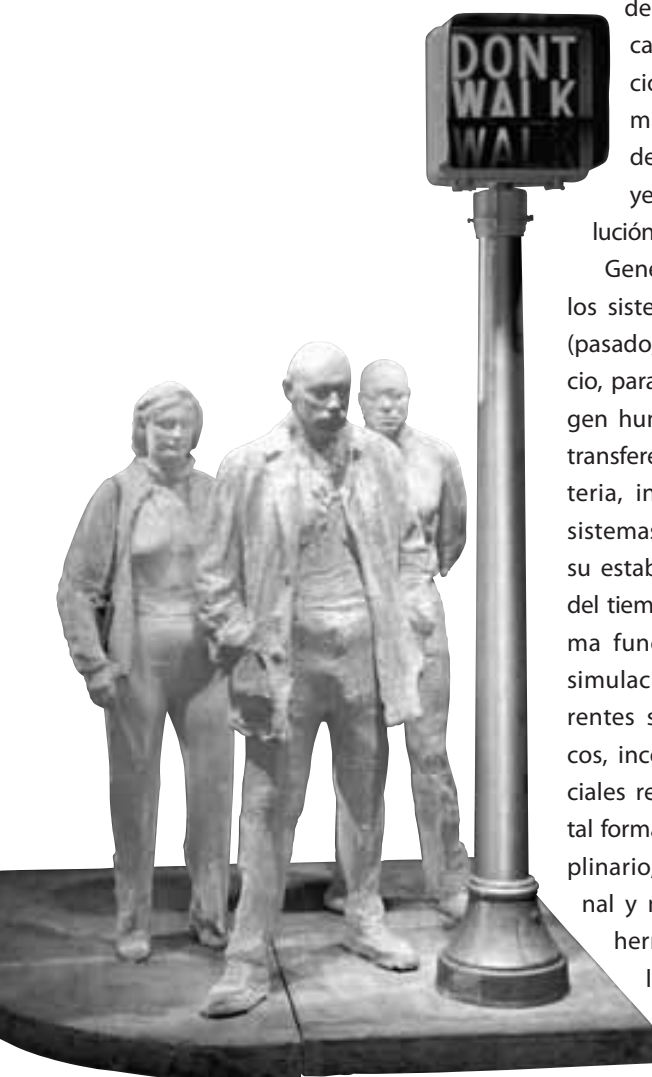
El objetivo general es el de diseñar y generar un modelo integral de simulación y pronóstico de los sistemas ecológicos bajo el enfoque de sistemas y de sistemas complejos, con aplicaciones específicas a la evaluación del impacto ambiental y el manejo de recursos naturales, del cual se puedan derivar proyectos más específicos en la solución de problemas regionales.

Generar asimismo escenarios para los sistemas ecológicos: en el tiempo (pasado, presente y futuro) y el espacio, para así evaluar el impacto de origen humano. Analizar la dinámica de transferencia productiva (flujos de materia, información y energía) de los sistemas ecológicos, para determinar su estabilidad o inestabilidad a través del tiempo y el espacio. Realizar en forma funcional el modelo integral de simulación y pronóstico de los diferentes sistemas ecológicos y climáticos, incorporando en ellos las potenciales redes de intercomunicación, de tal forma que el modelo sea multidisciplinario, multifactorial, multirrelacional y multifuncional, y que sirva de herramienta tanto para la simulación de posibles escenarios como para la toma de decisiones.

## Metodología básica

Para contestar una pregunta, demostrar una teoría o clasificar una parte del mundo real, todos coincidimos en que, dependiendo de nuestros intereses, algunas de las posibles perspectivas a elaborar serán más adecuadas y útiles que otras; los sistemas de interés presentan generalmente dos propiedades de importancia primordial. La primera, es que los sistemas pueden estar anidados, es decir que un individuo es parte de una población, una población es parte de una comunidad y así sucesivamente. La segunda, que en cualquier escala y en cualquier nivel de detalle, los sistemas naturales pueden ser estudiados usando el mismo conjunto de principios y técnicas desarrolladas y conocidas por la teoría general de sistemas, donde debemos definir cuidadosamente los límites del sistema de interés de acuerdo con el problema que estamos estudiando.

El reduccionismo actual (estudio de las partes por separado) ha demostrado ser muy eficiente en la ciencia, siempre y cuando podamos entender que las entidades complejas de la naturaleza no sólo son la suma de sus componentes más simples. Las matemáticas de la física clásica están concebidas para complejidades no organizadas y muchos de los problemas biológicos, económicos y sociales son esencialmente organizados, multivariados y complejos, por lo tanto deben introducirse nuevos modelos conceptuales, incluidos la cibernética, las teorías de la información, de juegos y de decisiones, el análisis factorial, la ingeniería de sistemas, la investigación de operaciones, etcétera. Se consideran los sistemas como un complejo de componentes interactuantes, con conceptos





característicos de totalidades organizadas, como son: interacción, suma, mecanización, centralización, competencia, finalidad, etcétera. Se debe saber aplicarlos a fenómenos concretos.

La naturaleza posee un orden que podemos comprender y la ciencia tan sólo es una descripción optimista de cómo pensar una realidad que nunca comprenderemos del todo. Sin embargo, con el enfoque sistémico comenzamos a entrever una forma enteramente nueva de comprender las fluctuaciones, el desorden y el cambio, en donde conceptos como los de atractor, retrato de fase, diagrama de bifurcación y fractal no existían antes del desarrollo de la dinámica no lineal.

En la modelación de impacto ambiental es necesario considerarlo con base en nuestros estudios de diagnóstico, simulación y pronóstico, los cuales estarán apoyados exclusivamente en las metodologías de simulación, ya que si escogemos las variables apropiadas y representamos adecuadamente las reglas que gobiernan la dinámica y el proceso de cambio en el sistema de

estudio, debemos poder predecir los cambios de dichos sistemas a lo largo del tiempo. Es decir, podríamos simular correctamente el comportamiento del sistema con base en las cuatro etapas fundamentales del proceso de desarrollo y uso del modelo descritas por Grant: desarrollo del modelo conceptual, del modelo cuantitativo, evaluación, y uso del modelo.

En primer lugar hay que identificar el problema con claridad y describir los objetivos del estudio con precisión, teniendo en mente que vamos a estudiar la realidad como un sistema. El resultado de esta fase ha de ser una primera percepción de los elementos que tienen relación con el problema planteado. La estadística y los métodos numéricos serán de gran utilidad cuando exista una gran abundancia de datos y podamos suponer que la realidad permanecerá estable. Debemos conocer los elementos que forman el sistema y las relaciones que existen entre ellos ya que, con frecuencia, para solucionar un problema es más fácil y efectivo trabajar con las relaciones.

Esto es, incluir sólo aquellos elementos que tienen una influencia razonable sobre nuestro objetivo, lo que equivale a proponer acciones prácticas para solucionar el problema.

En las diferentes fases de construcción del modelo se añadirán y suprimirán elementos con la correspondiente expansión y simplificación del modelo, incorporando en ellas, a través de un diagrama causal, los elementos clave del sistema y sus relaciones. El concepto de rizo (definido como una cadena cerrada de relaciones causales) es muy útil porque nos permite, a partir de la estructura del sistema que analizamos, llegar hasta su comportamiento dinámico. Y es a partir de aquí que podremos ver que los sistemas socioeconómicos, ecológicos y climáticos están formados por cientos de rizos positivos y negativos interconectados, e identificar las razones estructurales que nos permitan decidir cómo modificar los bucles causales que lo alteran, ya que es la estructura del sistema lo que provoca su comportamiento. Si el sistema tiene los elementos que cau-



san el problema, también tiene la forma en que se puede solucionar.

Como en las estructuras de los sistemas estables hay un número de relaciones impar y el bucle o proceso de retroalimentación es negativo, y como cualquier acción que intente modificar un elemento se ve contrarrestada por todo el conjunto de bucles negativos que superestabilizan el sistema, se neutraliza entonces en conjunto la acción o los cambios del exterior. En tales sistemas el factor limitativo es lo verdaderamente importante, ya que es dinámico, con capacidad de producir comportamientos inesperados; pero al final será el rizo negativo el que estabilice el sistema.

Con base en los objetivos del proyecto debemos decidir cuáles son los componentes del mundo real que incluiremos en nuestro sistema de interés y cómo se relacionan entre sí. También debemos bosquejar los patrones esperados de comportamiento en términos de la dinámica temporal de los componentes más relevantes del sistema, los cuales sirven como puntos de referencia en la validación del modelo, y asegurarse que éste provea el tipo de predicciones que nos permita responder nuestras preguntas y, finalmente, tomar las mejores decisiones.

Asimismo, debemos determinar por medio de los objetivos si el modelo es apropiado o no para cumplir con nuestros propósitos y, dependiendo de dichos objetivos, podemos profundi-

zar en la interpretación de las relaciones entre sus componentes y en su capacidad predictiva. En forma simultánea, nos interesa evaluar qué tan sensibles son las predicciones del modelo a aquellos aspectos que hemos representado con cierta incertidumbre, así como determinar dicha sensibilidad a posibles errores cometidos al representar la ecuación fundamental, usando relaciones estimadas a partir de un amplio grupo de especies.

Debemos definir los objetivos en términos del problema que queremos resolver o de la pregunta a responder. Las preguntas o problemas pueden surgir a partir de observaciones en el sistema real o pueden ser impuestas por la necesidad práctica de evaluar diversos esquemas de manejo. Dichos objetivos deben definir el marco conceptual para las bases, desarrollo y evaluación, así como la interpretación de los resultados del modelo.

El objetivo final del análisis de sistemas será responder las preguntas identificadas al comienzo del proyecto, lo cual implica que debemos diseñar y simular, con el modelo desarrollado, los mismos experimentos que realizaríamos en el mundo real para responder nuestras preguntas fundamentales. Si en el diseño experimental es necesario desarrollar una versión estocástica del modelo, podemos correr el número de réplicas necesarias y comparar los valores predichos en el marco de cada uno de los regímenes de nuestras variables,



para lo cual utilizaremos un análisis de varianza y detectaremos cualquier incoherencia que nos ayude a comprender el sistema y obtener sus beneficios en el proceso de desarrollo del modelo.

En forma sintética, podemos decir que con el desarrollo del modelo conceptual definimos un proceso por medio del cual abstraemos del sistema real aquellos factores y procesos a incluir en nuestro modelo por su relevancia para nuestros objetivos específicos, de tal forma que en la evaluación del modelo podamos determinar la utilidad del modelo desarrollado.

Respecto de nuestros objetivos específicos, definiremos los límites del

sistema de interés e identificaremos las relaciones entre los componentes que generan la dinámica del sistema con base en las siguientes etapas de desarrollo del modelo: definir los objetivos del modelo así como los límites del sistema de interés, clasificar los componentes de este último, identificar sus componentes, representar formalmente el modelo conceptual, y describir los patrones esperados del comportamiento del modelo.

Durante el desarrollo del modelo cualitativo trataremos de traducir nuestro modelo conceptual a una serie de ecuaciones matemáticas que en conjunto forman el modelo cuantitativo,

para lo cual usaremos los diversos tipos de información sobre el sistema real; posteriormente resolvemos todas las ecuaciones del modelo para el periodo completo de simulación. Esta simulación recibe el nombre de simulación de referencia.

Con la generación de este modelo esperamos simular adecuadamente la dinámica general y productiva del sistema, la magnitud del impacto ecológico y económico, además de pronosticar el destino de los sistemas actuales, ya que podremos generar escenarios que nos permitan derivar la mejor toma de decisiones. Asimismo, podremos conocer el grado de estabilidad de los sistemas existentes (naturales, implantados e impactados).

La elección entre un modelo analítico de la física y un modelo de simulación del análisis de sistemas implica, para el primer caso, pérdida de realismo ecológico a fin de tener más potencia matemática; para el segundo, la pérdida de potencia matemática para incluir más realismo ecológico.

Si el nivel de detalle que se busca para lograr los objetivos deseados es mayor y, por lo tanto, nos exige el uso de modelos analíticos, debemos de tratar de usarlos; sin embargo, si se observa que en el nivel analítico de detalle apropiado se requiere un modelo que resulta demasiado complejo en su manejo, debemos otra vez cambiar y regresar al uso de los modelos de simulación, es decir, regresar a la idea de que lo complejo se resuelve con lo simple.

Esto es muy importante, ya que para muchos problemas ecológicos, de manejo de recursos naturales y estudios de impacto ambiental, es necesario representar el sistema de interés de una manera muy compleja, con metodologías de análisis sistémico para



su solución, ya que no se puede hacer en forma analítica.

#### Información regional y monitoreo

Los datos regionales son críticos para la realización de pronósticos y el conocimiento de los procesos de gran escala, ya que los estudios de pequeña escala nunca serán suficientes para este propósito. Las redes de información y el monitoreo permanente son necesarios para un mejor pronóstico, así como para un mejor conocimiento de las estrategias adaptativas y de diseño con retroalimentación, evolución y otras dinámicas básicas en la naturaleza.

El proceso de planeación debe empezar con la información climática, biológica y socioeconómica existente. La mayoría de los sitios requiere pros-

pecciones para proveer información más exacta, sobre la cual podamos basar nuestras decisiones y, además, realizar los diagnósticos requeridos para la planeación. Estos deben estar centrados principalmente en la información necesaria para los procesos de toma de decisiones, mediante las mejores herramientas existentes para tales objetivos, como son los sistemas de información geográfica, fotografía aérea, sensores remotos, etcétera, y con la participación de las localidades en la adquisición regional de información.



En general, no se conocen bien los caracteres estructurales y funcionales de los ecosistemas, por lo que necesitamos muchas mediciones antes de estar en condiciones de asentar principios sólidos para la predicción.

La mayor parte de las investigaciones bioclimáticas se dirigen al estudio de las variaciones de estado, ciclos y procesos biológicos relativamente cortos, que logran un buen conocimiento de trabajo sobre periodicidades, ritmos y fenologías asociadas y llegan a comprender su importancia dentro del sistema ecológico en que operan.

Es mucho menos lo que sabemos de los ciclos largos, sus mecanismos y la posible función de ciertos fenómenos biológicos poco frecuentes y aparentemente aleatorios. 🌍

Carlos Gay García, René Garduño López,  
Walter Ritter Ortiz  
Centro de Ciencias de la Atmósfera,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### IMÁGENES

P. 21: Georg Gerster, Labbezanga, Mali, 1972. P. 22: Guillermo Kuitca, sin título, 1992. P. 23: Robert Gober, sin título, 1993-1994; Irving Penn, Blast, 1980. P. 24: Red Grooms, Ruckus Manhattan, 1976-1977. P. 25: Hannah Hoch, Meine Haussprache, 1922; Lola Álvarez Bravo, Anarquía arquitectónica de la Ciudad de Mé-

xico, ca. 1953. P. 26: Louis Lozowick, Seattle, 1926-1927; Fernand Leger, Study II for Cinematic Mural, 1938-1939. P. 27: Saul Steinberg, Wilshire & Lex, 1994. P. 28: George Segal, Pasar, no pasar, 1976. P. 29: Edward Steichen, The flatiron, 1905; George Segal, The Diner, 1964-1966. P. 30: Astrid Klein, Night matter I, 1985. Pp. 30-31: Saul Steinberg, 1973.

Palabras clave: bioclimatología, pronóstico, escenarios, toma de decisiones.

Key words: Bioclimatology, forecasting, scenarios, decision making.

Resumen: Los escenarios bioclimáticos pueden proporcionarnos información necesaria acerca de las causas de los cambios, implicaciones del curso normal de los acontecimientos y de las posibles opciones de acción, donde las políticas alternativas pueden ser consideradas a la luz de circunstancias contrastantes y medidas por su fortaleza en escenarios futuros.

Abstract: Bioclimatic scenarios can give us needed information on the causes of change, the implications of the normal course of events, and possible courses of action, where policy alternatives can be considered in the light of contrasting scenarios and their comparative strengths for potential futures.

Carlos Gay García es doctor por la Universidad de Colorado. Investigador titular en Ciencias de la Atmósfera de la UNAM y profesor en la Facultad de Ciencias desde 1973. Algunas de sus líneas de investigación son: cambio climático global, calentamiento, agujero de ozono e impactos, modelos simples de cambio climático, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. • Walter Ritter Ortiz es doctor en Biología, con especialidad en Ecología y Medio Ambiente (UNAM). Realizó su licenciatura en física y matemáticas (UAG) y la maestría en Ciencias Geofísicas, con la especialidad en Climatología (UNAM). Es investigador titular en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM), y jefe de la Sección de Bioclimatología. • René Garduño López es físico, con posgrado en Geofísica por la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde es profesor desde 1976. Es investigador titular del Centro de Ciencias de Atmósfera de la UNAM, en la línea de cambios climáticos naturales y antropógenos. Ha publicado numerosos artículos de investigación y capítulos en libros relacionados con el tema.

Recibido el 14 de febrero de 2007, aceptado el 4 de octubre de 2007.