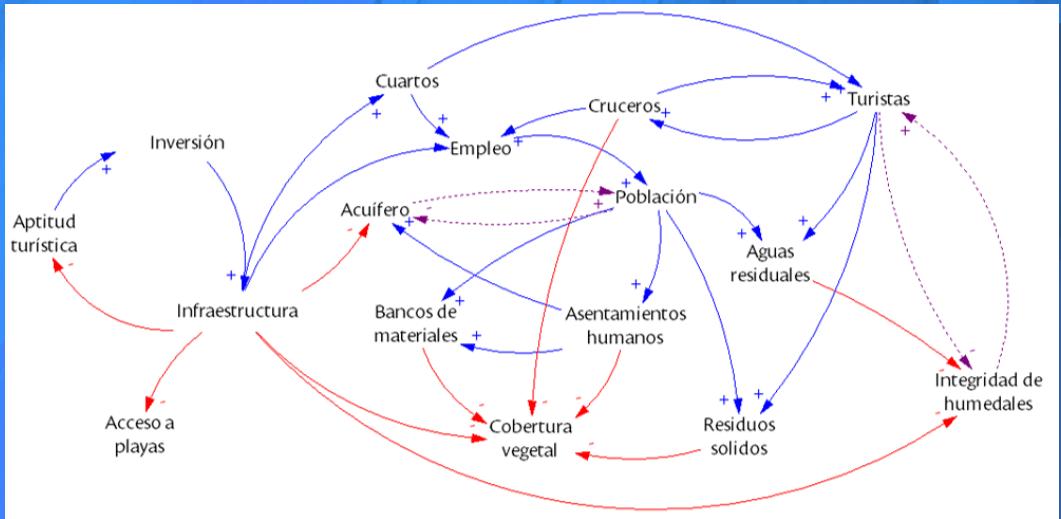
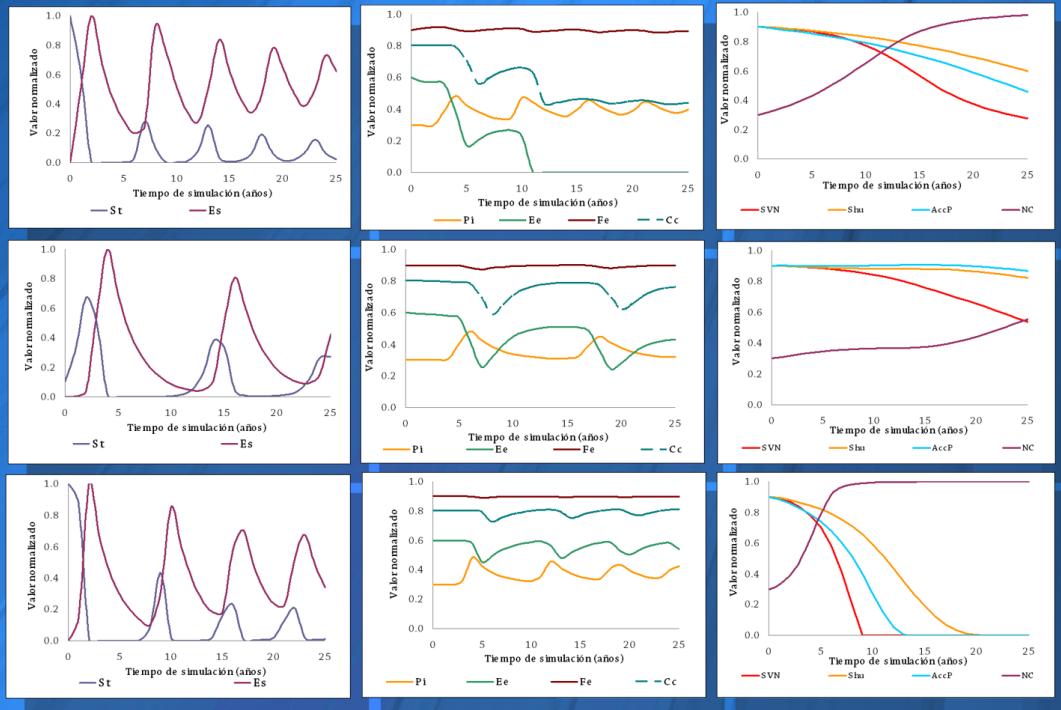


MANUAL

Modelación y Simulación

Dinámica de Sistemas Socioambientales



MANUAL

Modelación y Simulación Dinámica de Sistemas Socioambientales

AUTORES:

ELVIRA TATIANA MERINO BENÍTEZ

LUIS ANTONIO BOJÓRQUEZ TAPIA



UNAM



LANCIS

Laboratorio
Nacional
de Ciencias
de la Sostenibilidad



**INSTITUTO
DE ECOLOGÍA
U N A M**

MANUAL: MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DINÁMICA DE SISTEMAS SOCIOAMBIENTALES

Responsable del proyecto:
Luis Antonio Bojórquez Tapia

Autores:
Elvira Tatiana Merino Benítez
Luis Antonio Bojórquez Tapia

Edición:
Esmeralda Osejo Brito

Diseño y maquetación:
Elizabeth Ortiz Caballero

Citar el documento como:
Merino-Benítez, T. y L. A. Bojórquez-Tapia. 2021. *Manual: Modelación y simulación dinámica de sistemas socioambientales*. México: UNAM.

Este documento se realizó con apoyo del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) **1V100118** *Análisis integrado de sistemas socio-ambientales acoplados: desarrollo de capacidades para la evaluación de la vulnerabilidad costera*; y del Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y Tecnológica CONACyT (FOMIX) **YUC-2018-04-01-88958** *Sistema de conocimiento para la gestión del Ordenamiento Ecológico del Territorio del Estado de Yucatán*. La primera autora agradece al Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM, y el apoyo de CONACyT 1003060.



Licencia Creative Commons: Atribución-NoComercial-CompartirIgual (el usuario puede compartir y modificar el contenido sin fines comerciales, siempre y cuando se haga referencia explícita a la fuente original).

Índice

1. GUÍA DE USO	5
2. INTRODUCCIÓN	6
3. ENFOQUE SISTÉMICO	8
4. MODELACIÓN	11
4.1 AXIOMATIZACIÓN	14
4.2 SIMULACIÓN DINÁMICA	15
4.2.1 Modelos de depósitos y flujos (<i>modelación constitutiva</i>)	16
4.2.2 KSIM (<i>modelación exploratoria</i>)	18
5. EJEMPLOS	22
5.1 COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE MODELACIÓN	22
5.2 KSIM EN HOJA DE CÁLCULO	29
6. REFERENCIAS.....	33

1. Guía de uso

En este manual aprenderás sobre modelación de sistemas socioambientales. Podrás aprender sobre diferentes procedimientos de construcción, justificación y visualización de modelos, así como los puntos teóricos y prácticos clave de la modelación dinámica basados en las disposiciones del Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico (2014) de México.

Puntualmente, aprenderás:

- Cuál es el papel de la etapa de pronóstico del ordenamiento ecológico para el monitoreo de los lineamientos y estrategias ecológicas que define el reglamento federal.
- A visualizar la implementación del enfoque sistémico con respecto a las disposiciones del reglamento federal, a través de un modelo de depósitos y flujos (técnica de modelación constitutiva y cuantitativa) y de la KSIM (técnica de modelación exploratoria y cualitativa).
- A construir una KSIM en una hoja de cálculo.

ÍCONOS DEL MANUAL:



DEFINICIÓN



ATENCIÓN



HERRAMIENTA



TIP



EJEMPLO



Un *sistema socioambiental* se define como una entidad híbrida que abarca una multitud de aspectos (social, cultural, político, económico, etcétera) y cuya composición incluye un conjunto de subsistemas conectados en una arquitectura sumamente intrincada, con mecanismos causales múltiples que operan simultáneamente. Estos sistemas están caracterizados por (1) múltiples componentes, (2) interacciones no lineales, (3) incertidumbres intrínsecas, y (4) propiedades adaptativas a través del tiempo (Eakin et al. 2011, 2017; Zaccarelli et al. 2008). Los dos subsistemas principales de un sistema socioambiental son el biofísico y el socio-institucional.

2. Introducción

El Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico, 2014, establece que la etapa de pronóstico tiene por objeto “examinar la evolución de los conflictos ambientales, a partir de la previsión de las variables naturales, sociales y económicas” (Artículo 44, D.O.F., 2003). Esto es, el pronóstico complementa la representación más bien estática del análisis de aptitud y ayuda a vislumbrar las consecuencias que tendrían los planteamientos sectoriales en la capacidad del territorio de mantenerse en condiciones deseables.

En la práctica, el pronóstico involucra la integración de una visión global sobre las causas de transformación territorial. Esta visión requiere la aplicación de una perspectiva basada en el enfoque sistémico (que se explica más adelante), el cual posibilita el esclarecimiento de los procesos que conducen a la concurrencia (existencia simultánea) de actividades sectoriales incompatibles, de los efectos a distancia y de la acumulación de impactos ambientales.



El reglamento federal indica que el pronóstico debe considerar, como mínimo, los siguientes patrones de degradación ambiental (Artículo 44, D.O.F., 2003):

- Procesos de cambio de uso de suelo.
- Conservación de la biodiversidad (como la extinción de especies sujetas a protección).
- Efectos del crecimiento poblacional (como la demanda de infraestructura urbana, la producción de residuos y aguas residuales y su manejo).
- Deterioro de servicios ambientales (como el consumo y la calidad de agua)
- Impactos ambientales acumulativos.

Estas disposiciones reglamentarias sugieren claramente que el pronóstico debe realizarse con la finalidad de que sea el marco de referencia en el monitoreo del ordenamiento ecológico.

Para analizar las causas y consecuencias de los cambios de uso de suelo en los sistemas socioambientales, comúnmente se utilizan herramientas de modelación dinámica. Los modelos dinámicos permiten simular y proyectar estos procesos como retroalimentaciones entre los subsistemas biofísico y socio-institucional de los sistemas socioambientales. Según el objetivo y la disponibilidad de información, los modelos pueden integrar fuerzas forzantes (*drivers*, en inglés), decisiones de actores (agentes de cambio) e impactos.

Los resultados del pronóstico constituyen el marco de referencia para monitorear la efectividad del proceso de ordenamiento ecológico. Desde el punto de gestión territorial, el pronóstico involucra la transformación de un conjunto de variables (naturales, sociales y económicas) en una serie de *indicadores ambientales* que se usan para verificar el proceso de ordenamiento ecológico. El reglamento federal establece la obligatoriedad de contar con dichos indicadores ambientales para medir la “efectividad de los lineamientos y estrategias ecológicas en la solución de los conflictos ambientales” (Artículo 14, fracción IIIb, D.O.F., 2003) y juzgar objetivamente “la permanencia ajuste o la corrección de los programas [de gobierno]” en el territorio (Artículo 6, fracción VI, D.O.F, 2003).



El término *indicador ambiental* está definido como una “variable que permite evaluar la efectividad de los lineamientos y estrategias ecológicas” (Artículo 3, fracción XIII, D.O.F, 2003) que se utiliza para (1) “identificar cambios en la calidad de los recursos naturales o la evolución de los conflictos ambientales”; y (2) “facilitar la comparación de sitios monitoreados en el corto, mediano y largo plazos” (Artículo 16, D.O.F, 2003).

3. Enfoque sistémico

El enfoque sistémico (García 2006) es un marco teórico fundamental para indagar en las causas y la evolución de los conflictos ambientales en el contexto de un sistema socioambiental. Este enfoque permite generar una explicación formal de los procesos o mecanismos concretos que están detrás de los conflictos ambientales a través de los denominados modelos sistémicos. Los modelos sistémicos son representaciones de un sistema (una entidad compleja cuyos componentes están interconectados) en términos de su composición, estructura (o arquitectura), mecanismos causales y entorno (Bunge 2004).



El Reglamento de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Ordenamiento Ecológico, 2014, define *conflicto ambiental* como una “concurrencia de actividades incompatibles en un área determinada”; y *actividades incompatibles* como “aquellas que se presentan cuando un sector disminuye la capacidad de otro para aprovechar los recursos naturales, mantener los bienes y los servicios ambientales o proteger los ecosistemas y la biodiversidad de un área determinada” (Artículo 3, D.O.F, 2003).

La cualidad más importante de los modelos sistémicos, en este contexto, es que permiten la identificación de las propiedades de un sistema que se repiten siempre bajo las mismas circunstancias. Estas propiedades son lo que se conoce como *patrones*. La importancia de este tipo de modelos es que permiten pasar de representaciones de patrones que únicamente consideran relaciones causa → efecto (o, más técnicamente, entrada → salida), también conocidos como de “caja opaca”, a representaciones que consideran las relaciones causa → mecanismo → efecto (o, entrada → mecanismo → salida), también conocidas como de “caja translúcida”; es decir, donde se puede “ver” el mecanismo que originó un determinado efecto.

- Un *sistema* es una entidad compleja cuyos componentes están interconectados.
- La *composición de un sistema* es el conjunto de todos los elementos de un sistema.
- La *estructura*, o arquitectura, de un sistema es el conjunto de todas las conexiones entre dichos elementos. Estas conexiones pueden ser de distinta índole: información, en el caso de los sistemas conceptuales (que se componen por atributos intangibles, como los conceptos o los juicios subjetivos); materiales y energía, en el caso de los sistemas concretos (que se componen por atributos tangibles, como la vegetación o la infraestructura); o ambas.
- Los *mecanismos* de un sistema son los procesos que ocurren en un sistema y que le confieren sus propiedades particulares (por ejemplo, la transformación de los ecosistemas por la deforestación). Típicamente, estos mecanismos involucran una larga secuencia de fenómenos que ocurre ordenadamente y dentro de un período determinado y que se retroalimentan entre sí.
- El *entorno* de un sistema es la serie de factores externos con los que un sistema interactúa (por ejemplo, el contexto económico y político en el que se inserta un sistema en particular).

Ante la complejidad inherente de los sistemas socioambientales, es menester centrar la atención del pronóstico en los mecanismos esenciales (indispensables para el funcionamiento del sistema; por ejemplo, la infiltración de agua en el suelo de un bosque) que determinan las características de un sistema. Además, conviene categorizar los elementos que lo componen de acuerdo con qué tan críticos resultan para la integridad de un sistema determinado. Para tal fin, resulta práctico establecer tres tipos de elementos (Gajpal *et al.* 1994): *elementos vitales*, cuya desaparición colapsa el sistema; *elementos necesarios*, cuya transformación modifica drásticamente el sistema; y *elementos deseables*, que se relacionan con la calidad o valor que se le atribuye al sistema.

De esta manera, el enfoque sistémico facilita la tarea de generar indicadores ambientales a partir del conjunto de elementos naturales, sociales y económicos que estructuran un sistema socioambiental. Precisamente en esto radica la importancia de conocer los mecanismos esenciales, ya que a través de ellos se pueden establecer conexiones lógicas entre los patrones de degradación ambiental y los lineamientos y estrategias ecológicas.

Consecuentemente, un conflicto ambiental se representa como una interacción entre mecanismos antagonistas (incompatibles) con repercusiones negativas sobre un elemento socioambiental o un mecanismo esencial. De forma similar, la degradación de los bienes y servicios ambientales se representa como la inte-

racción antagónica entre una actividad sectorial y un mecanismo esencial. Evidentemente, la severidad de los conflictos o los procesos de degradación ambiental dependerá del grado de la afectación y la índole del mecanismo esencial afectado. Por tanto, las actividades en extremo perniciosas se representan como una afectación directa o indirecta sobre un elemento vital, la cual puede ocasionar el colapso del sistema, en caso de que lo interrumpa por completo.



Consideremos una carretera en las inmediaciones de un manglar, el cual presenta claras señales de estar desapareciendo paulatinamente. Por el contrario, en zonas alejadas de una carretera el manglar se encuentra en perfectas condiciones. Sin duda, este patrón sugiere una *conexión carretera → manglar*, aunque no explica por qué la carretera podría causar tal efecto. Para ello, es preciso contar con una descripción más completa del sistema socioambiental al que pertenecen los elementos carretera y manglar, lo cual se logra introduciendo al modelo un elemento adicional (cauce superficial) y el entorno (una región semiárida con escorrentimientos escasos). De esta manera, se vuelve posible inferir el mecanismo que origina el conflicto de la siguiente manera: carretera con alcantarillas insuficientes (entrada) → reducción del flujo de agua hacia el manglar (sobre todo durante el estiaje) al estar bloqueado el único cauce permanente (mecanismo) → degradación del manglar (salida).

4. Modelación

Llevar a la práctica el enfoque sistémico en el pronóstico involucra la conceptualización o abstracción de un sistema socioambiental a través de un modelo matemático (Acevedo 2013). Dicho modelo es una representación simplificada de un aspecto de la realidad, basada en conceptos, hipótesis y teorías de cómo funciona el sistema real. Esto ayuda a reducir la complejidad del sistema a una forma y tamaño manejables (Stokey y Zeckhauser 1978, Ford 2010) para facilitar la toma de decisiones. Debido a las características de la información disponible para el ordenamiento ecológico, esta tarea implica la síntesis de datos cuantitativos y cualitativos sobre las entidades geográficas, los conflictos ambientales y el comportamiento de los sectores.

La construcción y el uso de un modelo es un proceso iterativo (que se repite muchas veces), que consta de los siguientes pasos (Ford 2010):

1. Familiarizarse con el problema: definir las preguntas a responder con el modelo y, a partir de ello, determinar los elementos (actores, procedimientos y políticas), límites e interrelaciones más significativas.
2. Construir un diagrama causal (diagrama de las causas de un conflicto ambiental según las perciben los actores involucrados).
3. Especificar las ecuaciones, parámetros y unidades a utilizar.
4. Estimar los parámetros.
5. Ejecutar el modelo y comparar con el modo de referencia.
6. Hacer análisis de sensibilidad, los cuales consisten en simular múltiples valores de las variables más importantes para ver si los cambios en los parámetros llevan a cambios importantes en las salidas del modelo.
7. Definir escenarios a simular.
8. Probar el impacto de las políticas.



- Los diagramas de causalidad ayudan a desarrollar una idea conjunta de la situación y compartir el entendimiento del sistema que tienen los miembros de un grupo.

En el desarrollo de los modelos siempre hay cierto grado de incertidumbre. Éste puede generarse al hacerse simplificaciones, supuestos e interpretaciones, o puede deberse a la variabilidad en la capacidad de acceso a los datos necesarios para establecer los parámetros del modelo. La incertidumbre puede ser técnica (en términos de los parámetros y estados iniciales del modelo), metodológica (en términos de la estructura y relaciones funcionales del modelo) o epistemológica (en términos de si el modelo es adecuado o completo) (Pruyt 2007).



Una manera de manejar la incertidumbre técnica es a través del uso de herramientas estadísticas, de distribución de probabilidades o de simulación (Monte Carlo).

Durante el planteamiento del pronóstico es necesario desarrollar diversos modelos que representen la interacción de los sectores con los recursos naturales y con otros sectores. Así, los modelos y las simulaciones que se generan en el pronóstico tienen como objetivo ser una herramienta que permita identificar las posibles tendencias y riesgos asociados a los conflictos ambientales en la región analizada. Asimismo, los modelos pueden contribuir a identificar procesos y recursos naturales esenciales de los cuales depende la integridad funcional de los ecosistemas. Una vez identificados, es de suma importancia encontrar los valores límite (umbrales) de las actividades sectoriales que no se deben rebasar si se desea que dichas actividades puedan coexistir de manera sustentable con los procesos y recursos naturales y con las actividades de otros sectores.

En la mayoría de los casos de planeación se trabaja en condiciones de alta incertidumbre, es decir, están involucradas incertidumbres técnicas, metodológicas y epistemológicas. Esto implica que los modelos predictivos tradicionales no resultan suficientes para análisis como el pronóstico del ordenamiento ecológico. En estos contextos, es más útil la modelación exploratoria, la cual permite aproximaciones basadas en escenarios. Según Bankes (1993), la modelación exploratoria es el proceso que responde a la pregunta “¿qué pasaría si...?”. Este proceso permite considerar el modelo no como un símil de la realidad, sino como un medio para realizar experimentos computacionales que puedan revelar cómo el mundo se comportaría bajo ciertas suposiciones.

Los modelos exploratorios usan los datos disponibles y el poder de cómputo para realizar una serie de experimentos para visualizar y analizar múltiples posibilidades de evolución de un sistema bajo una gama de condiciones. Los productos de estos modelos pueden servir como base para las discusiones y la evaluación de consecuencias de posibles intervenciones y, por lo tanto, son un sustento para decisiones más racionales e informadas (Bankes 1993, 2002; Lempert y Groves 2010; Lempert et al. 2006; Agusdinata 2008, Kwakkel *et al.* 2010).

Para analizar la evolución de los conflictos ambientales, el Manual del Proceso de Ordenamiento Ecológico (SEMARNAT, 2006:34-37) recomienda contrastar tres escenarios: tendencial, contextual y estratégico.

- **Escenario tendencial:** supone que las actividades que se desarrollan en el territorio sigan su curso normal, es decir como hasta el momento se han venido desarrollando. En la construcción de este escenario se deben analizar las tasas de cambio calculadas a partir del análisis histórico de las variables y hacer una proyección a futuro. Este tipo de escenario muestra cómo se podrían exacerbar los conflictos ambientales de no tomarse ninguna medida preventiva o correctiva.
- **Escenario contextual:** analiza los cambios que generaría la aplicación de nuevos programas gubernamentales que se hayan proyectado para el área de ordenamiento, así como de proyectos de gran impacto de los sectores privado y social. Este tipo de escenario muestra cómo se podría modificar la aptitud territorial con la ejecución de proyectos sectoriales específicos.
- **Escenario estratégico:** identifica el tipo de intervenciones que se requieren para prevenir los conflictos ambientales y el deterioro de los bienes y servicios ambientales. Se denomina estratégico porque sirve de fundamento para generar el patrón de ocupación del territorio y las regulaciones que deben incluirse en el programa de ordenamiento ecológico que se elabora en la etapa de propuesta. En este escenario se deben reflejar las expectativas de la sociedad en cuanto al desarrollo a futuro del área a ordenar. Este tipo de escenario muestra cómo se podrían resolver los conflictos ambientales con la implementación de estrategias ecológicas concretas.



Para el desarrollo de estos escenarios, se debe utilizar información estadística o descriptiva contenida en planes o programas de desarrollo de los sectores (gubernamentales y privados), así como información proporcionada por los representantes sectoriales.



Sigamos el ejemplo del manglar y la carretera. El proceso de desaparición del manglar constituye el escenario tendencial; revertir la degradación del manglar involucraría el siguiente escenario estratégico: carretera con nuevas alcantarillas (entrada) → restauración del flujo de agua hacia el manglar (estrategia) → recuperación del manglar (salida). Como resultado, los indicadores ambientales posibles que se derivan del mecanismo generado por la implementación de esta estrategia son el gasto (medido en m^3/s) y la cobertura de manglar (medida en ha). Para los dos casos, es menester determinar los valores de estos indicadores y asignarles variables lingüísticas; por ejemplo: inadecuado, suficiente y excelente.

4.1 AXIOMATIZACIÓN

El uso de modelos como elementos de justificación de políticas implica la necesidad de poner atención a su credibilidad y utilidad (en el caso de la planeación, pensar si el modelo es útil para la deliberación colaborativa entre los participantes). Esto sugiere que es necesario ser explícito en los supuestos sobre las relaciones que el modelo implica y los datos que usa (Stokey y Zeckhauser 1978; Ford 2010). Para este propósito, es conveniente crear un esquema axiomático (axiomatización). En términos no formales, un esquema axiomático puede entenderse como una forma razonablemente clara y formal de organizar la información sobre la teoría que explica un tema en particular (Bunge 2005). Este procedimiento tiene las siguientes ventajas:

- Es didáctico, ya que es más fácil recordar un puñado de axiomas y teoremas notables que evocar un largo y desordenado conjunto de fórmulas.
- Es capaz de asegurar que una proposición es realmente (o no) parte de una teoría dada. En particular, puede ser necesario revisar si una proposición dada es una suposición provechosa, o bien, si en efecto deriva de las premisas establecidas.
- Es necesaria para distinguir a las suposiciones de sus consecuencias lógicas, así como distinguir las suposiciones de las definiciones. En otras palabras, la axiomática clarifica la forma lógica y el estatus metodológico de cualquier componente de una teoría.
- Permite exponer los referentes de una teoría. Por ejemplo, una axiomatización adecuada de la teoría de la evolución debería especificar explícitamente qué evoluciona.
- Convierte el común desorden conceptual en orden.



Es importante no confundir la axiomatización con la formalización, ni con la simbolización. Una axiomatización puede, pero no necesita, involucrar una formalización y simbolización de sus conceptos y enunciados. Los axiomas, las definiciones y teoremas de una teoría pueden expresarse simplemente en lenguaje coloquial. Una simbolización implica la abreviación de los conceptos y los enunciados con símbolos, y una formalización ocurre cuando a dichos conceptos y enunciados se les asigna una forma lógica y matemática precisa.



Una teoría es un sistema lógico compuesto de observaciones, axiomas y sus conclusiones, que se organiza mediante un conjunto de proposiciones cerradas (esto es, que incluyen todas las consecuencias lógicas de los axiomas). Toda teoría se puede expresar de manera axiomática.



La axiomatización consiste en construir un esquema axiomático siguiendo el formato axioma, definición, teorema.

- Un axioma (o postulado) es una suposición inicial y evidente que no necesita comprobación.
- Una definición es una proposición o caracterización de las propiedades sobresalientes y diferenciadas de una cosa real.
- Un teorema es una consecuencia lógica de un axioma.

Los principales rasgos que debe cumplir cualquier esquema axiomático son el rigor y la sistematicidad. El rigor se refiere a la consistencia en la lógica subyacente. La sistematicidad se refiere a que todos los predicamentos del esquema axiomático deben ser correferenciales (es decir, que estén relacionados entre sí), coherentes y pertinentes.

4.2 SIMULACIÓN DINÁMICA

La simulación dinámica, o metodología de Dinámica de Sistemas, busca describir el comportamiento colectivo de los elementos que componen un sistema, en lugar de estudiar cada elemento por separado (Acevedo 2013; Morecroft 2020). Esto se logra a través de la variación simultánea de dichos elementos en un intervalo de tiempo. En el contexto del pronóstico para el ordenamiento ecológico, las herramientas de simulación dinámica comúnmente se utilizan para analizar las causas y consecuencias de los cambios de uso de suelo en los sistemas socioambientales. Sus ventajas son:

- Permite relacionar el comportamiento de los sectores productivos, de los factores poblacionales y económicos y de los atributos ambientales, a través de sistemas de ecuaciones que se resuelven simultáneamente.
- Permite plasmar gráficamente, y de manera simple, las interrelaciones entre sectores y factores, a través de esquemas analíticos ordenados.
- Permite simular y proyectar las retroalimentaciones entre los subsistemas biofísico y socioinstitucional.

En general, el uso de estos modelos en la planeación socioambiental presenta retos tales como (Brown 2004; Verburg 2006; Turner et al. 2010; Sohl y Claggett 2013):

- La integración entre la estructura espacial y social.
- La determinación y representación de la relación entre diferentes escalas geográficas.

- La representación del comportamiento y decisiones de los agentes.
- La gran demanda de datos para la parametrización, calibración y validación del modelo.
- El planteamiento de modelos que sean lo suficientemente claros, prácticos, sencillos y transparentes para que puedan ser desarrollados y utilizados en procesos participativos de planeación.

Estos retos, aunados a la complejidad e incertidumbre inherentes de los sistemas socioambientales, exigen el uso conjunto de diferentes técnicas de simulación dinámica (Bojórquez-Tapia et al. 2017; Brown et al. 2013; Sohl y Claggett 2013). Entre estas técnicas, las más utilizadas son los modelos de depósitos y flujos (stock-and-flow, en inglés), la topología de redes, la modelación basada en agentes, los autómatas celulares y la KSIM. En este manual se profundiza en los modelos de depósitos y flujos y en la KSIM porque permiten exemplificar la modelación constitutiva y cuantitativa y la modelación exploratoria y cualitativa de indicadores ambientales, respectivamente.

4.2.1 Modelos de depósitos y flujos (modelación constitutiva)

Los modelos de depósitos y flujos son la base para crear modelos computacionales de sistemas. Este tipo de modelos se basa en la denominada *modelación constitutiva* (Bankes 1993), la cual, a diferencia de la modelación exploratoria, busca crear representaciones lo más apegadas a la realidad (Burns y Marcy 1979). La construcción de estos modelos, en el caso de los sistemas socioambientales, inicia con la identificación de las variables (los elementos del sistema a modelar) y sus unidades correspondientes (ha, toneladas, etcétera) y la creación de un diagrama donde se representa la dinámica del sistema (las relaciones entre sus elementos).

Como su nombre lo indica, estos modelos incluyen flujos y depósitos. Los flujos (o *variables forzantes*) son entidades que hacen que los depósitos (o *variables de estado*) se incrementen o disminuyan. Si el flujo tiene un efecto positivo en el depósito (por ejemplo, infiltración de agua en un acuífero), es una entrada; mientras que, si tiene un efecto negativo (por ejemplo, extracción de agua del acuífero), es una salida. Los flujos representan actividad e indican movimiento de material o información. Otros elementos que se pueden incluir son las *variables auxiliares*, como las constantes (que no cambian en el periodo de tiempo), y los cálculos, es decir, las ecuaciones que describen matemáticamente el comportamiento del sistema.



Es indispensable que se mantenga la consistencia en las unidades de todos los elementos que componen estos modelos para garantizar que los resultados sean coherentes, entendibles y útiles.



Dos programas computacionales que se utilizan comúnmente para desarrollar estos modelos son Stella y Vensim.

Un ejemplo de los modelos de depósitos y flujos es el modelo bioeconómico de Gordon-Shaefer (González-Olivares 1998; Gordon 1954; Schaefer 1954; Smith 1969), el cual es utilizado para estudiar el comportamiento pesquero. Este modelo describe el comportamiento de una población como un fenómeno que depende de la densidad de la población. Resulta en una curva sigmoidea, en la cual la biomasa (especies marinas) no explotada incrementa hasta el nivel máximo posible según la *capacidad de carga* del ambiente. En este punto, la población se mantiene en equilibrio ya que los factores de mortalidad que hacen decrecer la población (depredación, enfermedades, accidentes, etcétera) están balanceados por los factores que la hacen crecer (reproducción, reclutamiento, inmigración, etcétera). La ecuación que describe este comportamiento es la siguiente:

$$\frac{dB}{dt} = rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right)$$

donde r es la tasa intrínseca de crecimiento poblacional, B_t es la biomasa de una población en un tiempo t , y K es la capacidad de carga del ambiente.



La *capacidad de carga* es el valor límite que puede aceptar un depósito para que el sistema mantenga su estructura y funcionamiento (en este caso, la cantidad máxima de especies marinas que puede soportar una determinada área marítima).

Entonces, la explotación pesquera se considera como un factor de mortalidad adicional que se modela a partir de la fracción de la población que puede ser extraída en una unidad de esfuerzo, o coeficiente de capturabilidad:

$$c_t = q f_t B_t$$

donde c es la tasa de captura, q es el coeficiente de capturabilidad y f_t es el esfuerzo de pesca en un tiempo dado.

La dinámica del esfuerzo pesquero supone que el cambio en el esfuerzo pesquero es proporcional a los ingresos netos. Esto conlleva a la suposición de que, en el largo plazo, la relación entre la entrada y la salida de embarcaciones de una flota pesquera es constante, ya que el comportamiento de la flota responde a

las variaciones entre los ingresos totales y los costes del esfuerzo pesquero. De este modo, la velocidad de cambio del esfuerzo de pesca en una flota pesquera es igual a:

$$\frac{df}{dt} = \eta (p q B_t - c) f_t$$

donde η es el parámetro de comportamiento de la flota (entrada – salida de embarcaciones) que se obtiene empíricamente, y p es el precio del producto en el mercado. Por consiguiente, el cambio en la biomasa está dado por:

$$\frac{dB}{dt} = rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K} \right) - q B_t f_t$$

y el cálculo de la rentabilidad, Γ , considerando tanto el precio del producto en el mercado, p , como el costo de captura, θ , como constantes es igual a:

$$\Gamma_t = pqB_t f_t - B_t \theta$$

4.2.2 KSIM (*modelación exploratoria*)

La KSIM, o simulación K, por Kane (1972), es una técnica de *modelación mediada* (Van den Belt 2004), exploratoria y cualitativa. El proceso de modelación consiste en que los tomadores de decisiones lleguen a consensos sobre la estructura actual de un sistema, mediante la selección de sus componentes principales y las relaciones causa-efecto entre estos. A partir de dichas relaciones, el algoritmo KSIM genera gráficas de los comportamientos del sistema para un periodo de tiempo determinado (Burns y Marcy 1979; Mohapatra y Vizayakumar 1989).

Esta técnica de modelación tiene gran potencial para mejorar la toma de decisiones sobre el manejo socioambiental a mediano y largo plazo (Kane et al. 1973). Esto se debe a que permite investigar, crear y probar condiciones del sistema en un tiempo futuro bajo una serie de conjeturas preestablecidas (Bankes 1993). Es decir, permite visualizar qué pasaría en el sistema en diferentes cursos de acción sobre sus componentes. Esto propicia la conciencia anticipatoria, es decir, mejora la visión de actuar a tiempo y de manera apropiada para llevar, o mantener, un sistema socioambiental hacia condiciones deseables (Moallemi y Malekpour 2018; Pruyt 2007; Watson 1978).



La modelación mediada (Van den Belt 2004):

- Sirve como herramienta de comunicación y aprendizaje y facilita la coproducción de conocimiento (Burger y Kamber 2003, Verburg 2006, Tengö *et al.* 2014).
- Puede usarse en el diseño del modelo, en la integración de datos para ejecutarlos o calibrarlos y en la evaluación de los resultados del modelo.
- Tiene como principales retos capturar, integrar y traducir múltiples puntos de vista individuales y colectivos, que pueden ser incompletos y contradictorios (Watson 1978).

De manera general, los pasos para desarrollar una KSIM son los siguientes:

- Elegir el sistema que se va a estudiar.
- Identificar las variables que describen el sistema.
- Definir las condiciones iniciales de las variables.
- Analizar las relaciones entre pares de variables.
- Representar gráficamente el comportamiento del sistema.
- Evaluar las estrategias de decisión.

Formalmente, la modelación de un sistema por KSIM implica la especificación del conjunto de variables N ; las condiciones o cantidades iniciales de cada variable x_i , denominadas como x_{io} , ó $x_i(0)$; y el conjunto de interacciones Q por pares de variables $q_{ij} = \{x_i, x_j\}$, donde q_{ij} es la interacción de j sobre i . La determinación de N se obtiene por medio de técnicas de lluvia de ideas o de análisis de narrativas, y usualmente no excede los 20 elementos ($N \geq 20$) (Burns y Marcy 1979; Mohapatra y Vizayakumar 1989). La especificación de Q es por medio de una matriz de interacción cuadrada, $M = NxN$, donde, si x_j afecta a x_i , entonces, $q_{ij} \neq 0$ (donde 0 denota ausencia de interacción).

Las bondades de la KSIM para estudios socioambientales son evidentes cuando se toma en cuenta que esta técnica provee una manera de examinar dos tipos de interacciones y dos tipos de efectos. Las interacciones se diferencian como positivas o negativas. Las interacciones positivas corresponden a cuando el aumento de x_j significa el aumento de x_i ; las negativas, a cuando el aumento de x_j significa la disminución de x_i . Mientras tanto, los efectos se pueden evaluar como acumulativos o de largo plazo, e instantáneos o inmediatos. Los efectos acumulativos son de la forma $\alpha_{ij} x_{jt}$ y los efectos instantáneos son de la forma $\beta_{ij} x_{jt}$; ambos tipos de efectos corresponden a valores de matrices de interacción α y β , respectivamente.

Una interacción α_{ij} indica una relación de tipo “nivel” o acumulativa. Esto es, el efecto de la variable causante, x_j , se “almacena” en x_i durante todo el período de simulación. Por ejemplo, la población (x_j) provoca la disposición de desechos sólidos (x_i); con el paso del tiempo, aunque la población no varíe, los desechos municipales continúan acumulándose en el sitio de disposición final.

Una interacción β_{ij} indica una relación de tipo “tasa” o flujo. Esto es, el efecto sobre x_i solamente se manifiesta cuando la variable causante, x_j , cambia de valor en un período de simulación. Por ejemplo, el crecimiento de las zonas urbanas (x_j), provoca la disminución de la cobertura natural (x_i) —como bosques, selvas y pastizales—, pero este efecto desaparece al detenerse el crecimiento de las zonas urbanas.



Los postulados en los que se fundamenta la KSIM son los siguientes:

1. Las relaciones entre variables pueden describirse mediante matrices de interacción.
2. Ningún fenómeno puede crecer o decrecer indefinidamente; por lo tanto, todas las variables están restringidas al intervalo [0,1].
3. La respuesta de una variable tiende a cero cuando su valor se aproxima al límite inferior o superior. Esto confiere un comportamiento sigmoidal a la respuesta de una variable a su entorno (en términos amables, una gráfica con forma de “S”).
4. El valor de una variable aumenta o disminuye dependiendo si el efecto neto de las otras variables sobre ella es positivo o negativo.
5. El efecto de una variable aumenta proporcionalmente al incremento de su valor y viceversa (en otras palabras, “según el sapo es la pedrada”).

El algoritmo de la KSIM se funda en una serie de ecuaciones que explican los cinco postulados. Este algoritmo expresa que el valor de una variable en un tiempo dado ($t+1$) depende de su valor en el instante anterior, t , y del grado de cambio que experimente en ese lapso. De acuerdo con el postulado 2, todas las variables del sistema deben estar normalizadas en el intervalo [0,1], de forma tal que:

$$0 \leq x_{it} \leq 1, \text{ para toda } i = 1, 2, \dots, n \text{ y } t \geq 0$$

donde i es el índice de variables, n es el número total de variables y t es el tiempo de simulación.

Por último, los postulados 3, 4 y 5 se expresan mediante la siguiente ecuación por diferencia:

$$x_{it+1} = x_{it}^{\phi_{it}}$$

El exponente Φ_{it} representa el cambio de una variable x_i del tiempo t al tiempo $t+1$. A su vez, este exponente se define por la ecuación siguiente:

$$\Phi_{it} = \frac{\frac{1+\Delta t}{2} \sum_{j=1}^N \left[\left| \alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right| - \left(\alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right) \right] x_j}{\frac{1+\Delta t}{2} \sum_{j=1}^N \left[\left| \alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right| + \left(\alpha_{ij} + \beta_{ij} \frac{dx_j}{dt} \right) \right] x_j}$$

En esencia, Φ_{it} es un cociente en el cual el numerador corresponde a la sumatoria de las interacciones negativas y el denominador corresponde a la sumatoria de las interacciones positivas. De esta forma, si la sumatoria del numerador es mayor a la del denominador, entonces $\Phi_{it} > 0$; al contrario, si la sumatoria del numerador es menor a la del denominador, entonces $\Phi_{it} < 0$.



La KSIM también se puede describir con la siguiente ecuación diferencial (Kane *et al.* 1973):

$$\frac{dx_{it}}{dt} = -x_{it} \ln x_{it} \left(\sum \alpha_{ij} x_{jt} + \sum \beta_{ij} \dot{x}_{jt} \right)$$

Donde \dot{x}_{jt} es la derivada de x_j con respecto al tiempo.

Una ventaja de utilizar la KSIM en procesos colaborativos es que permite combinar datos cualitativos y cuantitativos de manera ordenada y coherente en un esquema analítico. En estos procesos, el equipo de tomadores de decisiones o de expertos puede manipular y cambiar la estructura del sistema hasta que su representación gráfica les resulte satisfactoria y suficiente. Posteriormente, las decisiones, como estrategias de manejo ambiental, pueden ser examinadas y seleccionadas en términos de su comportamiento relativo y de las consecuencias graficadas (Burns y Marcy 1979).

Por ejemplo, para establecer la intensidad de las relaciones, típicamente se utiliza una escala cardinal asociada a una escala lingüística, como la que se muestra en la Tabla 1, donde el equipo elige el valor y el tipo de interacciones (las positivas se representan con el valor cardinal con signo positivo, y las negativas con signo negativo).

Expresión lingüística	Valor cardinal
Muy fuerte	9
Fuerte	7
Moderada	5
Baja	3
Muy baja	1
Nula	0

Tabla 1. Escala para determinar la intensidad de las relaciones entre variables © LANCIS.

5. Ejemplos

A continuación, se detalla la implementación del enfoque sistémico a través de dos ejemplos de sistemas socioambientales. El primer ejemplo muestra la combinación de técnicas de modelación para definir los escenarios tendencial, estratégico y contextual del pronóstico del ordenamiento ecológico. El segundo ejemplo muestra la construcción de la KSIM en una hoja de cálculo.

5.1 COMBINACIÓN DE TÉCNICAS DE MODELACIÓN

Este ejemplo corresponde a un estudio socioambiental hipotético realizado a partir del proceso de ordenamiento ecológico marino de la Región Pacífico Norte. En este ejemplo se muestran (a) la descripción del sistema, en cuanto a su composición, estructura y mecanismos; y (b) la modelación cuantitativa (modelo bioeconómico de Gordon-Shaefer) y cualitativa (KSIM) de los escenarios tendencial, estratégico y contextual, considerando la interacción de los sectores pesca, conservación y turismo.

a. Descripción del sistema socioambiental

El sistema socioambiental se compone de dos subsistemas: (1) Marino-lagunas costeras y (2) Terrestre-costero. Con estos dos subsistemas se incorporan al análisis los componentes y los mecanismos que explican los principales conflictos en la región.

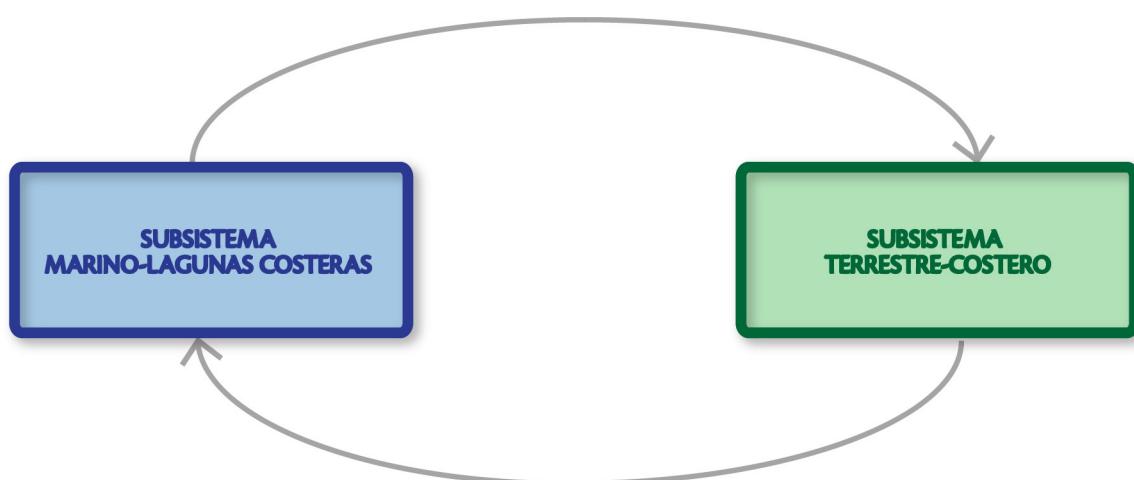


Figura 1. Sistema socioambiental para la Región Pacífico Norte. © LANCIS.

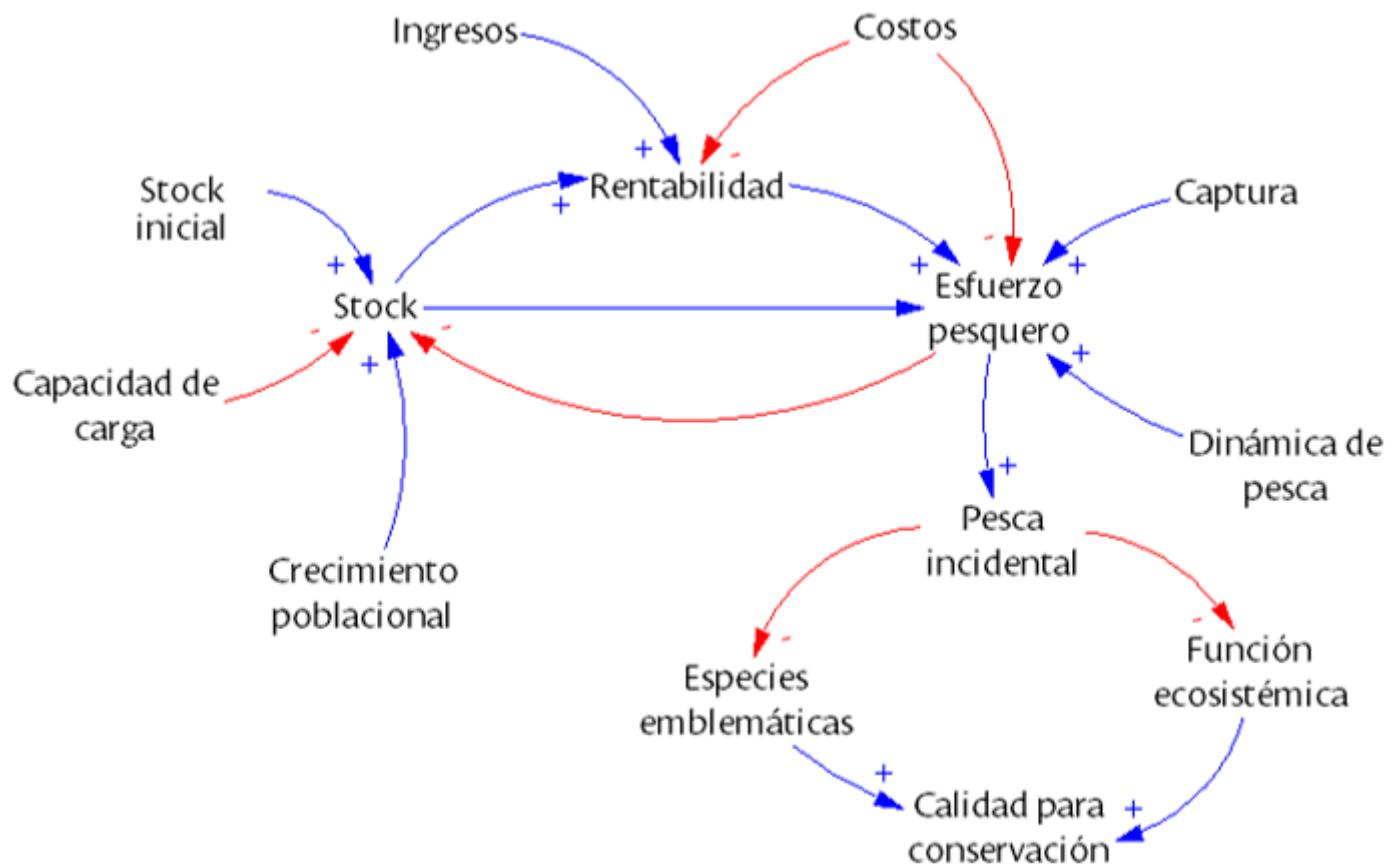


Figura 2. Estructura y mecanismos del subsistema marino-lagunas costeras. Las flechas azules indican las interacciones positivas; y las rojas, las interacciones negativas. © LANCIS.



Entre más clara sea la definición de las variables, el proceso de modelación colaborativo será menos engorroso. Recuerda que la mejor definición de una variable es la unidad con la que se mide.

Variable	Definición	Unidades	Elemento esencial
Calidad para conservación	Índice de capacidad ecosistémica para mantener especies en estatus de conservación	-	✓
Capacidad de carga	Capacidad máxima ecosistémica	#	
Captura	Coeficiente de capturabilidad	-	✓
Costos	Costo unitario de esfuerzo pesquero	\$	
Crecimiento poblacional	Tasa intrínseca de crecimiento poblacional	#/año	
Dinámica de pesca	Dinámica de la flota a largo plazo	#	
Esfuerzo pesquero	Incluye redes para pesca de escama demersal, trampas rectangulares para peces, barcos camarones de arrastre, pangas que pescan camarón con red de arrastre	#	✓
Especies emblemáticas	Tamaño de población	#	✓
Función ecosistémica	Índice de capacidad ecosistémica para proveer servicios ambientales	-	✓
Ingresos	Precio en el mercado	\$	
Pesca incidental	Captura incidental de tortugas en redes camaronesas y de enmalle	# tortugas/km red	✓
Rentabilidad	Ingresos-costos	\$	
Stock	Biomasa de recursos pesqueros	#	✓
Stock inicial	Biomasa de recursos pesqueros en el tiempo inicial de simulación (t=0)	#	

Tabla 2. Composición del subsistema marino-lagunas costeras. © LANCIS.

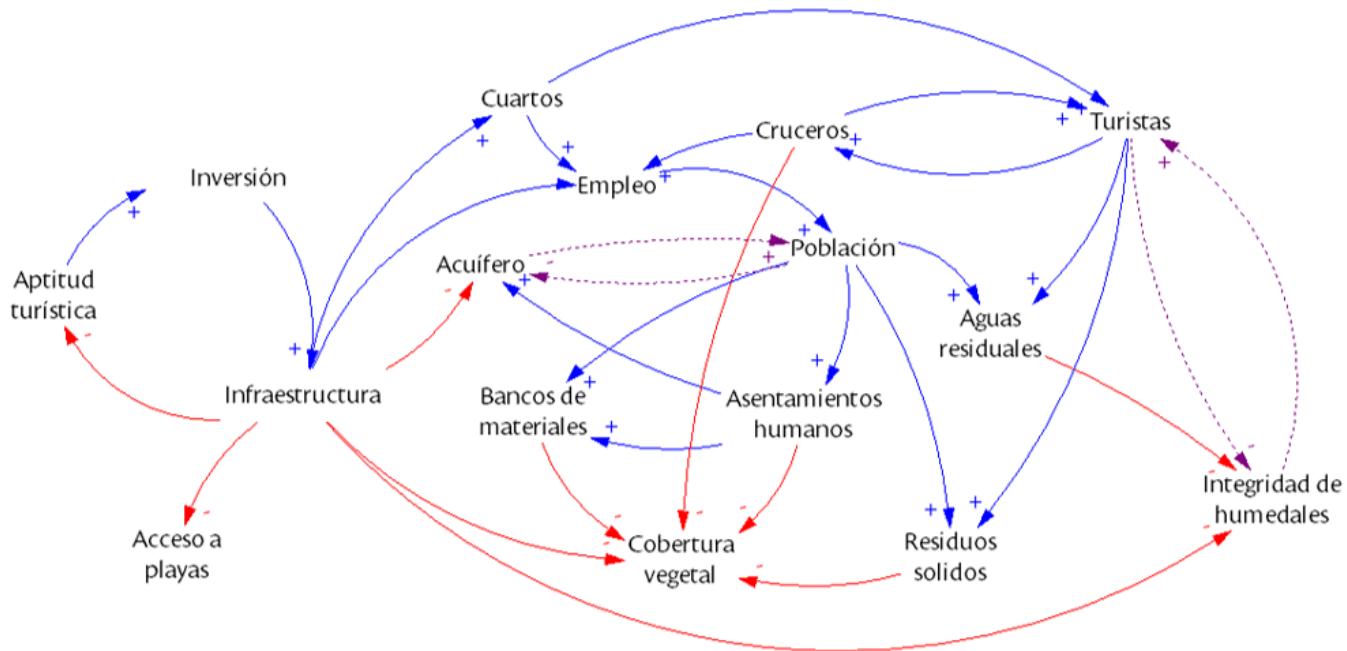


Figura 3. Estructura y mecanismos del subsistema terrestre-costero. Las flechas azules indican las interacciones positivas; las rojas, las interacciones negativas; y las moradas punteadas, indican las retroalimentaciones que involucran a los elementos vitales del sistema y que, en circunstancias peculiares, conducen al colapso del sistema socioambiental. © LANCIS.

Variable	Definición	Unidades	Elemento esencial
Aguas residuales	Generación de aguas residuales	m ³	
Asentamientos humanos	Superficie de zonas urbanas	ha	
Bancos de materiales	Superficie de bancos de materiales	ha	
Cuartos	Número de cuartos (hoteles, residencias y condominios)	#	✓
Empleo	Población económicamente activa en el sector turístico	#	✓
Infraestructura	Zonas de construcción de infraestructura hotelera e inmobiliaria	ha	
Residuos	Generación de residuos sólidos	ton	
Turistas	Número de turistas	#	

Tabla 3. Variables de estado del subsistema terrestre-costero. © LANCIS.

Variable	Definición	Unidades	Elemento esencial
Acceso a playas	Apertura o alineamiento de camino que facilite el acceso por la zona federal marítimo terrestre	-	✓
Acuífero	Disponibilidad de agua subterránea	hm ³	
Aptitud turística	Superficie apta para hoteles e inmuebles	ha	✓
Cobertura vegetal	Superficie de vegetación natural	ha	✓
Integridad de humedales	Intensidad de la degradación de humedales terrestres y costeros producida por actividades humanas	-	
Inversión	Inversión hotelera e inmobiliaria	\$	✓
Infraestructura	Construcción de infraestructura hotelera e inmobiliaria	ha	✓
Población	Población permanente y flotante	#	

Tabla 4. Variables de flujo del subsistema terrestre-costero. © LANCIS.

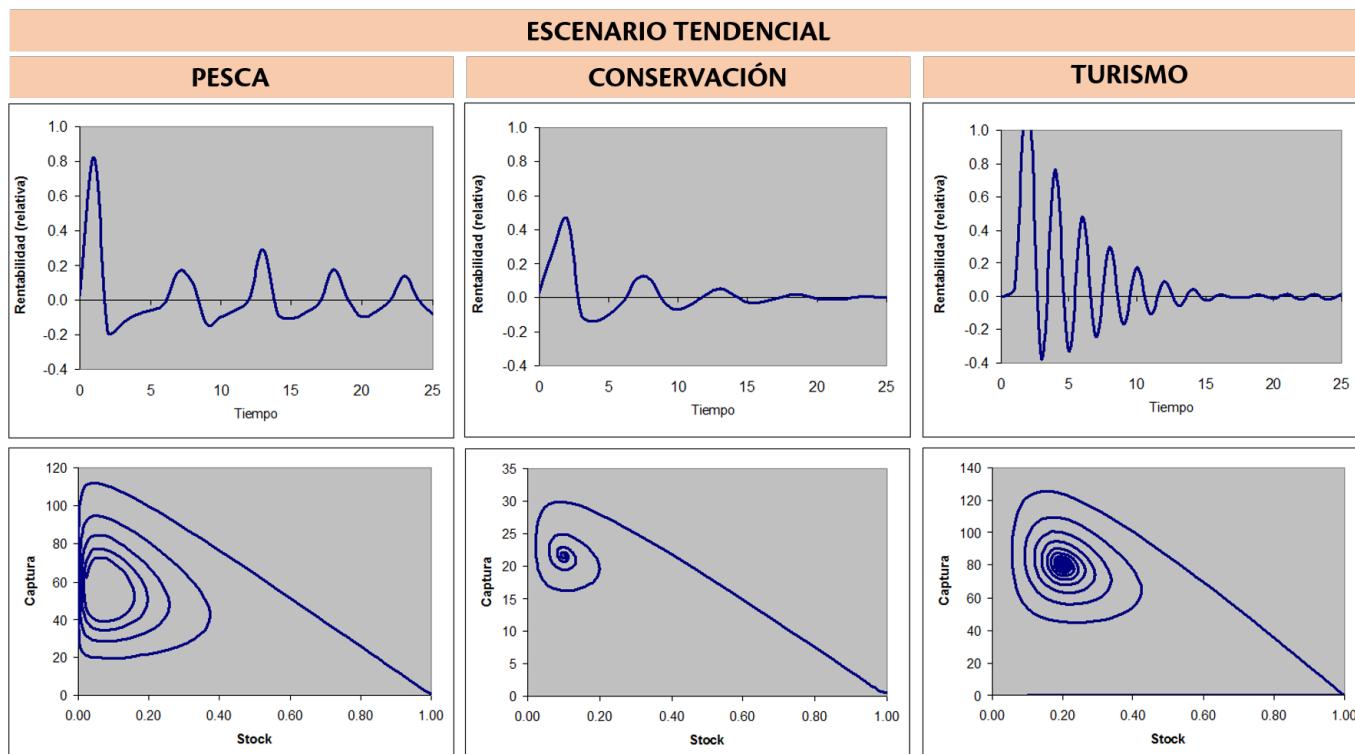


Figura 4. Resultados del modelo Gordon-Shaefer para el escenario tendencial. © LANCIS.

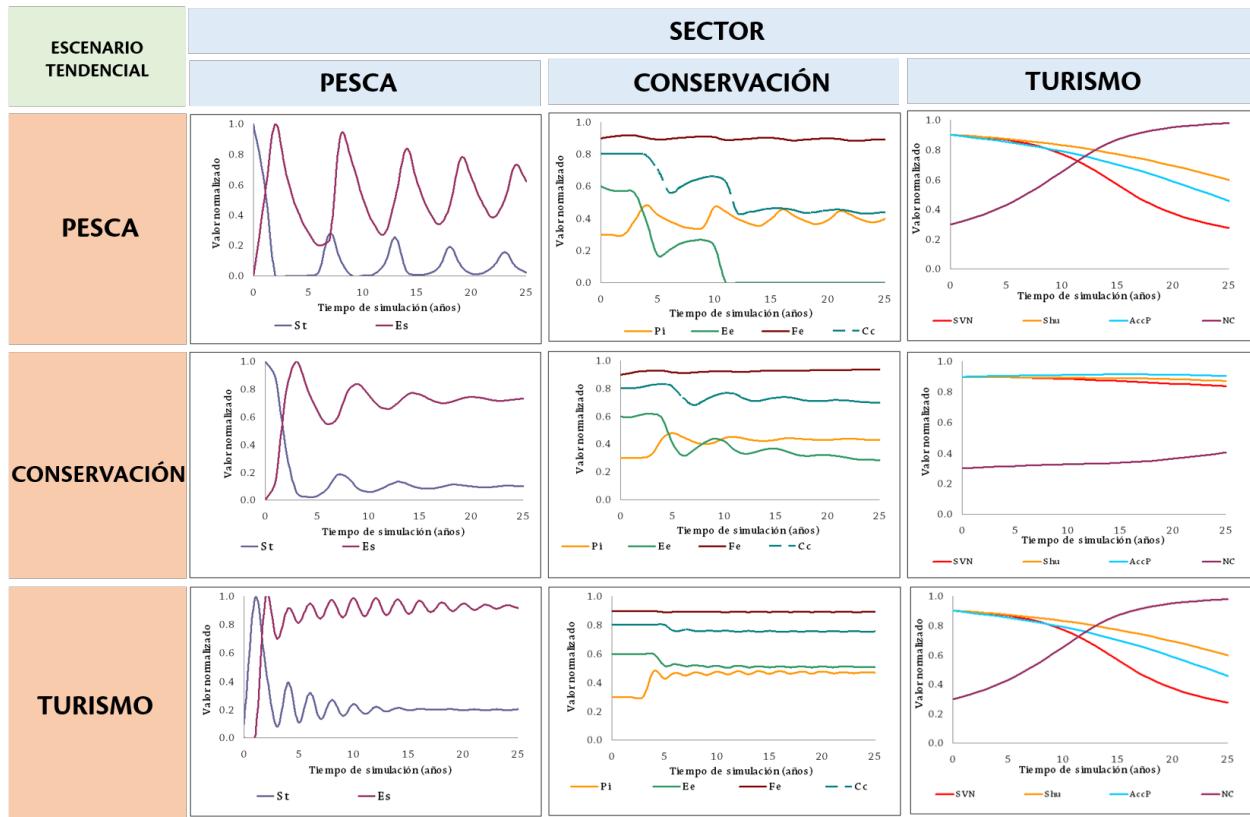


Figura 5. Resultados de la KSIM para el escenario tendencial. Variables: St: Stock; Es: Esfuerzo pesquero; Pi: Pesca incidental; Ee: Especies emblemáticas; Fe: Función ecosistémica; Cc: Calidad para la conservación; IHI: Inversión; CHI: Infraestructura; Shu: Aptitud turística; NC: Cuartos; Em: Empleo; SVN: Cobertura vegetal; AccP: Acceso a playas © LANCIS.

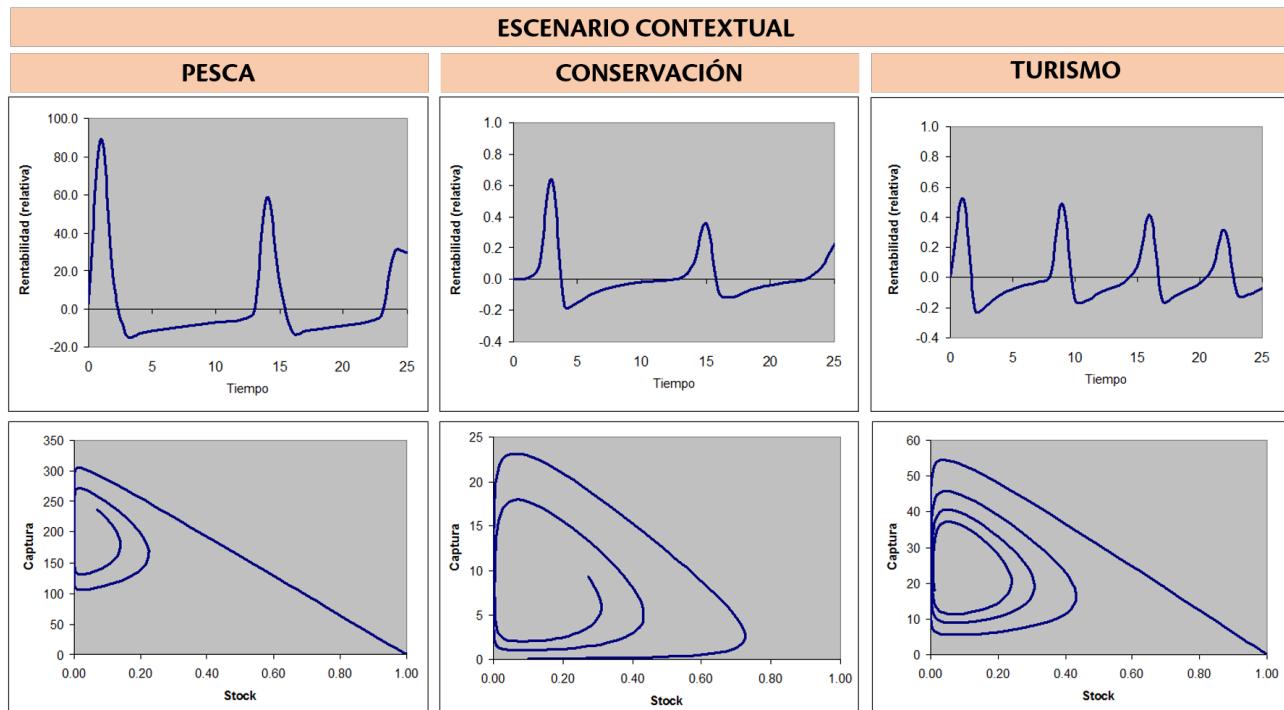


Figura 6. Resultados del modelo Gordon-Shaefer para el escenario contextual. © LANCIS.

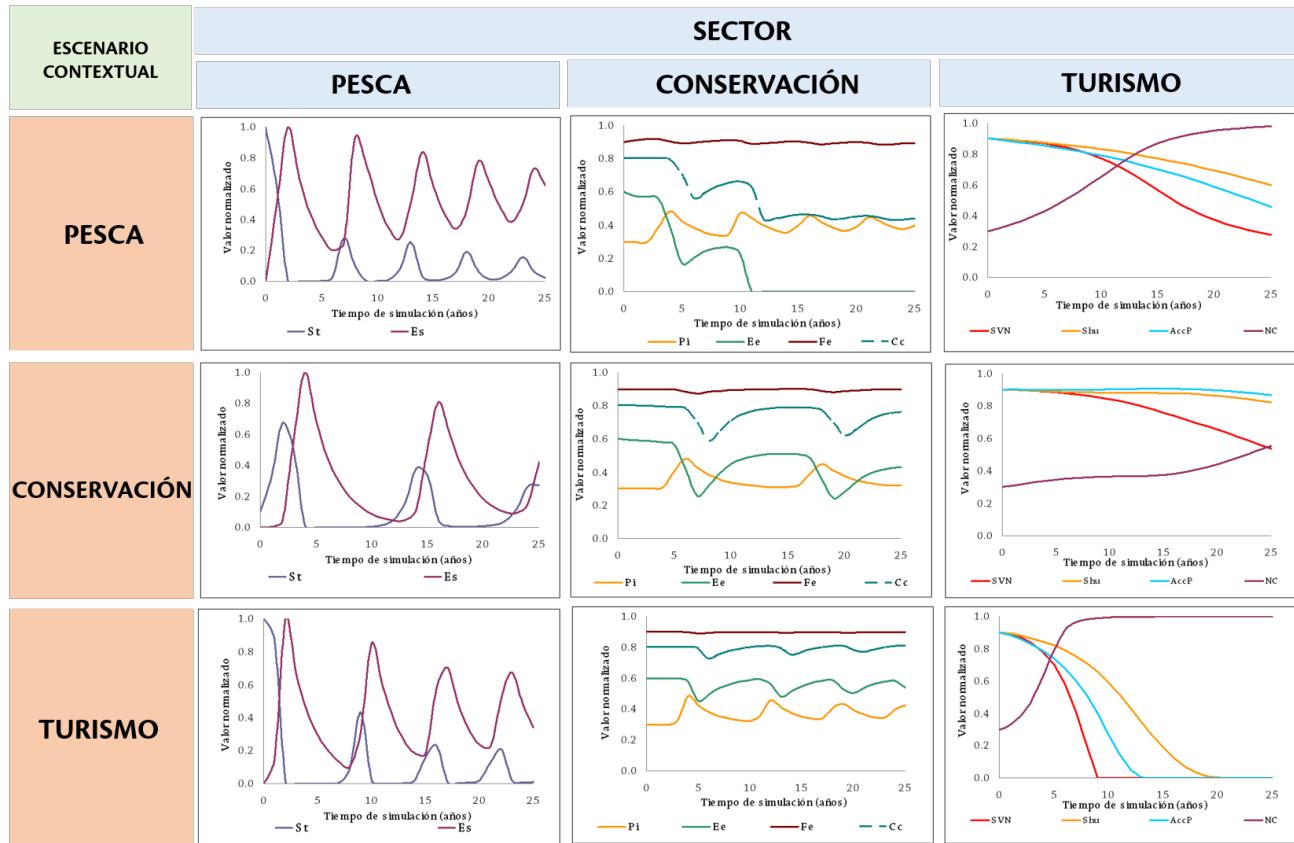


Figura 7. Resultados de la KSIM para el escenario contextual. Variables: St: Stock; Es: Esfuerzo pesquero; Pi: Pesca incidental; Ee: Especies emblemáticas; Fe: Función ecosistémica; Cc: Calidad para la conservación; IHI: Inversión; CHI: Infraestructura; Shu: Aptitud turística; NC: Cuartos; Em: Empleo; SVN: Cobertura vegetal; AccP: Acceso a playas. © LANCIS.

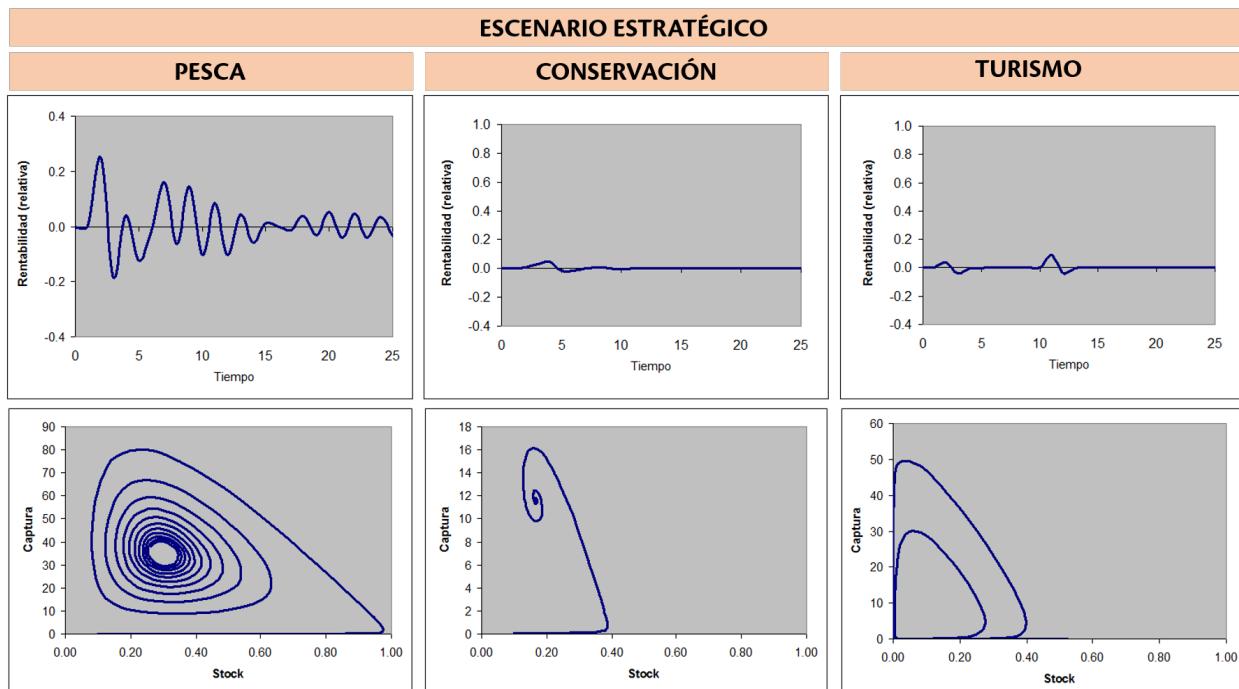


Figura 8. Resultados del modelo Gordon-Shaefer para el escenario estratégico. © LANCIS.

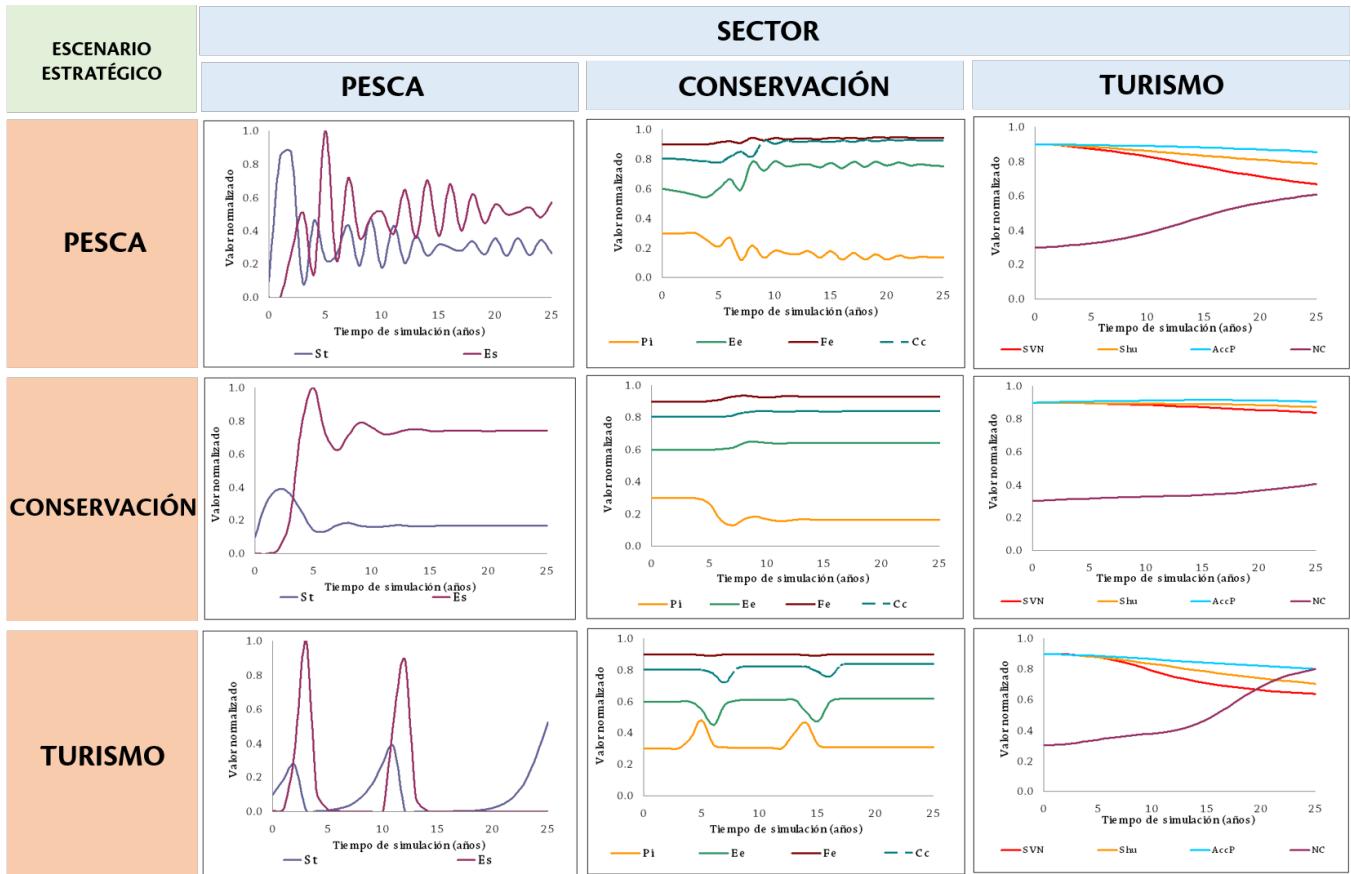


Figura 9. Resultados de la KSIM para el escenario estratégico. Variables: *St*: Stock; *Es*: Esfuerzo pesquero; *Pi*: Pesca incidental; *Ee*: Especies emblemáticas; *Fe*: Función ecosistémica; *Cc*: Calidad para la conservación; *IHI*: Inversión; *CHI*: Infraestructura; *Shu*: Aptitud turística; *NC*: Cuartos; *Em*: Empleo; *SVN*: Cobertura vegetal; *AccP*: Acceso a playas. © LANCIS.

5.2 KSIM EN HOJA DE CÁLCULO

Este ejemplo trata los efectos del crecimiento de la aptitud turística costera, como parte del proceso de ordenamiento ecológico territorial del estado de Yucatán. Por practicidad, se describe un sistema socioambiental simple, de 5 variables, representado por el siguiente diagrama de flujo (Figura 10):

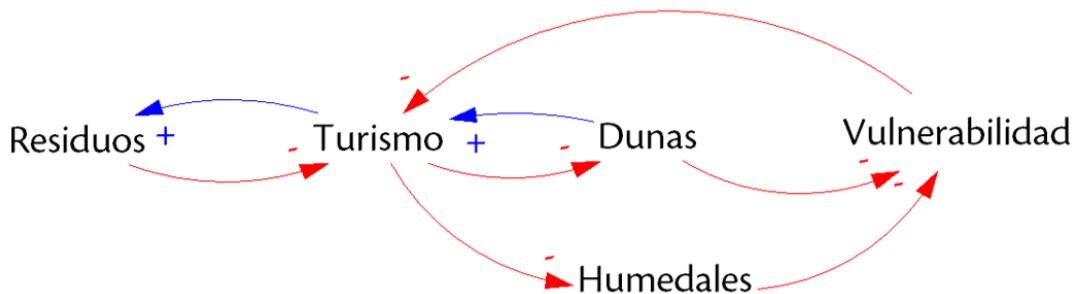


Figura 10. Diagrama de flujo del sistema socioambiental costero del estado de Yucatán. Las flechas azules representan interacción positiva y las rojas interacción negativa. © LANCIS.



Si quieres aprender más sobre la generación de índices de aptitud, ve al manual *Generación de índices de aptitud territorial*.

Variable	Definición	Unidades
Humedales	Superficie de humedales costeros	ha
Residuos	Residuos sólidos y aguas residuales	ton, m ³
Dunas	Superficie de dunas costeras	ha
Vulnerabilidad	Índice de vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos	-
Turismo	Superficie con uso turístico de sol y playa y pesca recreativa	ha

Tabla 5. Variables que describen el sistema socioambiental © LANCIS.



Si quieres saber más sobre los índices de vulnerabilidad ve el manual *Generación de índices de vulnerabilidad para estudios socioambientales*.

Ahora, prosigue completar las matrices α y β por los tipos de efectos; acumulativos e instantáneos, respectivamente. Supongamos que los expertos establecieron las siguientes intensidades:

Variable causante	Variable afectada	Tipo de interacción	Tipo de efecto	Intensidad
Turismo	Humedales	-	Acumulativo	Fuerte
Turismo	Dunas	-	No acumulativo	Muy fuerte
Turismo	Residuos	+	Acumulativo	Muy fuerte
Residuos	Turismo	-	No acumulativo	Baja
Humedales	Vulnerabilidad	-	No acumulativo	Fuerte
Dunas	Turismo	+	No acumulativo	Muy Baja
Dunas	Vulnerabilidad	-	No acumulativo	Fuerte
Vulnerabilidad	Turismo	-	No acumulativo	Muy fuerte

Tabla 6. Interacciones entre las variables del sistema. © LANCIS.

A continuación, puedes observar el algoritmo KSIM y el comportamiento del sistema calculado y graficado para un período de 10 años, obtenidos en hojas de cálculo (Figuras 11 y 12).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	Matriz α						$\Delta t =$	0.1	Intervalo de tiempo			Condiciones iniciales									
2		TUR	HUM	DUN	VUL	RES															
3	TUR	9																			
4	HUM	-3																			
5	DUN																				
6	VUL																				
7	RES	3																			
8	Matriz β																				
9		TUR	HUM	DUN	VUL	RES															
10	TUR			1	-9	-1															
11	HUM																				
12	DUN	-7																			
13	VUL			-5																	
14	RES																				
15																					
												Datos para graficar									

Celda	Fórmula	Copiada en
I5	=SI(I4+Q5 <=0.001,0.001,SI(I4+Q5 >=0.999,0.999, I4+Q5))	I5:M14
Q5	=((-I4*LN(I4))*SUMAPRODUCTO(\$B\$3:\$F\$3,\$I4:\$M4)+SUMAPRODUCTO(\$B\$10:\$F\$10,\$Q4:\$U4))*\$I\$1	Q5:Q14
R5	=((-J4*LN(J4))*SUMAPRODUCTO(\$B\$4:\$F\$4,\$I4:\$M4)+SUMAPRODUCTO(\$B\$11:\$F\$11,\$Q4:\$U4))*\$I\$1	R5:R14
S5	=((-K4*LN(K4))*SUMAPRODUCTO(\$B\$5:\$F\$5,\$I4:\$M4)+SUMAPRODUCTO(\$B\$12:\$F\$12,\$Q4:\$U4))*\$I\$1	S5:S14
T5	=((-L5*LN(L5))*SUMAPRODUCTO(\$B\$6:\$F\$6,\$I5:\$M5)+SUMAPRODUCTO(\$B\$13:\$F\$13,\$Q5:\$U5))*\$I\$1	T5:T14
U5	=((-M4*LN(M4))*SUMAPRODUCTO(\$B\$7:\$F\$7,\$I4:\$M4)+SUMAPRODUCTO(\$B\$14:\$F\$14,\$Q4:\$U4))*\$I\$1	U5:U14

Figura 11. Algoritmo KSIM de escenario restrictivo. Variables: **TUR:** Turismo; **HUM:** Humedales; **DUN:** Dunas; **VUL:** Vulnerabilidad; **RES:** Residuos. © LANCIS.



- Las variables en las columnas son las que causan el efecto sobre las variables de los renglones.
- Establecer como positiva la interacción de x_j sobre x_i no implica que exista una interacción inversa (es decir, q_{ji}).

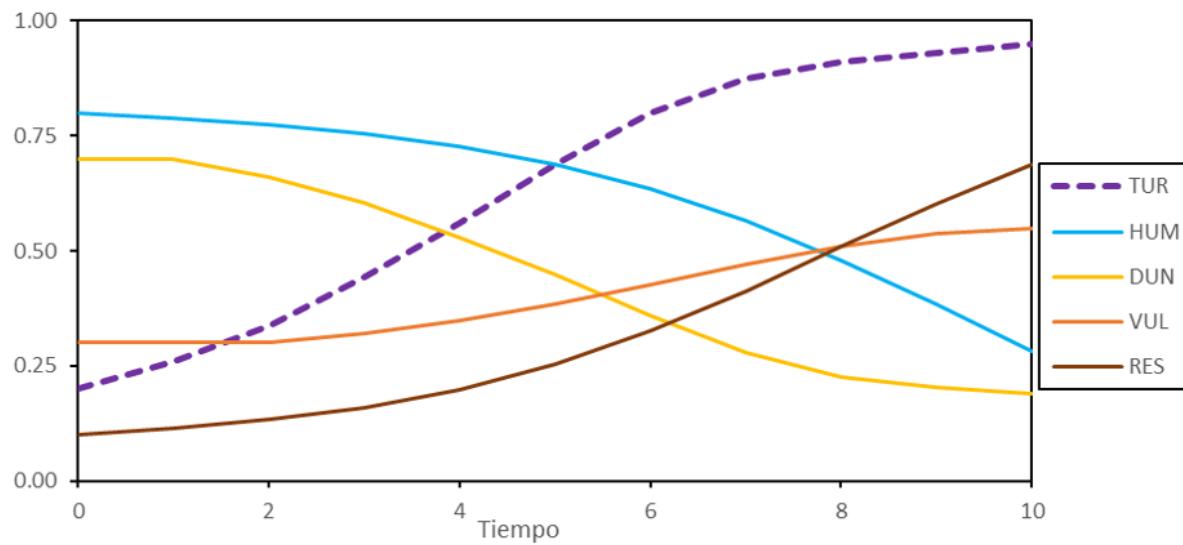


Figura 12. Comportamiento del sistema en el escenario restrictivo. Variables: **TUR**: Turismo; **HUM**: Humedales; **DUN**: Dunas; **VUL**: Vulnerabilidad; **RES**: Residuos. © LANCIS.

6. Referencias

- Acevedo M.F. 2013. "Simulation of ecological and environmental models." Editorial CRC Press.
- Agusdinata B. 2008. "Exploratory modeling and analysis: A promising method to deal with deep uncertainty." [Tesis de Doctorado, *Technology, Policy and Management*]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:8a371ab4-3582-4506-bbd2-685e127f8bd7>
- Bankes S. 1993. "Exploratory Modeling for Policy Analysis." *Operations Research* 41(3):435-449. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.41.3.435>
- Bojórquez-Tapia, L.A., S. Díaz Mondragón y R. Saunier. 1997. Ordenamiento ecológico de la Costa Norte de Nayartit. Organización de Estados Americanos-UNAM.
- Brown, D.G., Verburg, P. H., Gilmore, R. y Lange, M. D. 2013. "Opportunities to improve impact, integration and evaluation of land change models." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5: 452-457.
- Bunge M. 2004. "How does it work? The search for explanatory mechanisms." *Philosophy of the social sciences* 34(2): 182-210.
- Bunge M. 2005. "Diccionario de filosofía." Editorial Siglo XXI: México, D.F.
- Burger P. y Kamber R. 2003. "Cognitive Integration in Transdisciplinary Science." *Issues in Integrative Studies* 21: 43-73.
- Burns J. y Marcy W. 1979. "Causality: Its Characterization in System Dynamics and KSIM Models of Socioeconomic Systems." *Technological forecasting and social change* 14:387-398.
- Eakin H., Bojórquez-Tapia L.A., Janssen M.A., Georgescu M., Manuel-Navarrete D., Vivoni E.R., Escalante A., Baeza-Castro A., Mazari-Hiriart M. y Lerner A. 2017. "Opinion: Urban resilience efforts must consider social and political forces." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(2): 186-189.
- Eakin H., Bojórquez-Tapia L.A., Monterde R., Castellanos E. y Haggar J. 2011. "Adaptive Capacity and Social-Environmental Change: Theoretical and Operational Modeling of Smallholder Coffee Systems Response in Mesoamerican Pacific Rim." *Environmental Management* 47(3): 352-367.

- Ford A. 2010. "Modeling the Environment." Segunda edición, Editorial Islandpress: Estados Unidos.
- García R. 2006. "Sistemas Complejos. Conceptos, Método y Fundamentación Epistemológica de La Investigación Interdisciplinaria." Primera edición, Barcelona, Editorial Gedisa, S.A.: España.
- Gajpal P.P., Ganesh L.S. y Rajendran C. 1994. "Criticality analysis of spare parts using the analytic hierarchy process." *International Journal of Production Economics* 35:293-297.
- González-Olivares E. 1998. "Una clase de modelos bioeconómicos continuos." *Investigaciones marinas* 26: 109-117.
- Gordon H. S. 1954. "Economic theory of a common-property resources: the fishery." *The Journal of Political Economy* 62(2): 124-142.
- Kane J. 1972. "A primer for a new cross-impact language —KSIM." *Technological Forecasting and Social Change* 4:129-142.
- Kane J., Vertinsky I. y Thomson W. 1973. "KSIM: A Methodology for Interactive Resource Policy Simulation." *Water Resource Research* 9(1): 65-79.
- Kwakkel J.H., Walker W.E. y Marchau V.A.W.J. 2010. "Classifying and communicating uncertainties in model-based policy analysis." *Technology, Policy and Management* 10(4): 299-314.
- Lempert, R.J., Groves, D.G., 2010. "Identifying and evaluating robust adaptive policy responses to climate change for water management agencies in the American west". *Technological Forecasting and Social Change* 77: 960-974.
- Lempert R.J., Groves D.G., Popper S.W., Bankes S.C., 2006. "A general, analytic method for generating robust strategies and narrative scenarios." *Management Science* 52: 514-528.
- Mani M., Varghese K., y Ganesh L.S. 2005. "Integrated model framework to simulate sustainability of human settlements." *Journal of Urban Planning and Development-ASCE*:147-158.
- Moallemi E.A. y Malekpour S. 2018. "A participatory exploratory modelling approach for long-term planning in energy transitions." *Energy Research & Social Science* 35: 205-216.
- Montello D.R. 2002. "Cognitive map-oriented design research in the Twentieth Century: Theoretical and empirical approaches." *Cartography and Geographic Information Science* 29:283-304.

Mohapatra P.K.J. y Vizayakumar K. 1989. "Revisiting Causality in System Dynamics and KSIM Models". *Technological forecasting and social change* 36: 363-387.

Morecroft J. 2020. "System Dynamics." En Reynolds M. y Holwell S. (Ed.), "Systems Approaches to Making Change: A Practical Guide" Springer, 25-88. DOI: 10.1007/978-1-4471-7472-1_2

Pruyt E. 2007. "Dealing with Uncertainties? Combining System Dynamics with Multiple Criteria Decision Analysis or with Exploratory Modelling." *Technology, Policy and Management Policy Analysis Section*: 1-22.

Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de Ordenamiento Ecológico. Diario Oficial de la Federación, México, 8 de agosto de 2003, reformado el 31 de octubre de 2014.

Schaefer M. B. 1954. "Some aspects of the dynamics of population important to the management of the commercial marine fisheries." *The Journal of Political Economy* 1 (2): 27-56.

Smith V. L. 1969. "On models of commercial fishing." *The Journal of Political Economy* 77: 181-198.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2006. Manual del Proceso de Ordenamiento Ecológico http://www.semarnat.gob.mx/queessemarnat/politica_ambiental/ordenamientoecologico/Pages/inicio.aspx

Stokey E. y Zeckhauser R. 1978. "A primer for policy analysis." Kennedy School of Government, Harvard University, Norton & Company: Nueva York.

Sohl T. y Claggett P.R. 2013. "Clarity versus complexity: Land-use modeling as a practical tool for decision-makers." *Journal of Environmental Management* 129: 235-243.

Tengö M., Brondizio E.S., Elmquist T., Malmer M. y Spierenburg M. 2014. "Connecting Diverse Knowledge Systems for Enhanced Ecosystem Governance: The Multiple Evidence Base Approach". *AMBI* 43:579-591. DOI 10.1007/s13280-014-0501-3.

Turner B. L., Kasperson R. E., Matson P. A., McCarthy J. J., Corell R. W., Christensen L., Eckleyg N., Kaspersonb J.X., Luers A., Martellog M.L., Polsky C., Pulsipher A. y Schiller, A. 2003. "A framework for vulnerability analysis in sustainability science." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100(14): 8074-8079.

Verburg P.H. 2006. "Simulating feedbacks in land use and land cover change models". *Landscape Ecology* 21(8): 1171–1183. doi:10.1007/s10980-006-0029-4

Watson R.H. 1978. "Interpretive Structural Modeling-A Useful Tool for Technology Assessment?" *Technological Forecasting and Social Change* 11: 165-185.

Zaccarelli N., Petrosillo I. y Zurlini G. 2008. "A Retrospective Approach to Complex Systems Analysis." *Systems Ecology*, 3021-3029.

