



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Modelo dinámico para explorar el manejo del
socio-ecosistema asociado al Área Natural Protegida
Otoch Ma'ax Yetel Kooh, Península de Yucatán, México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Biólogo

PRESENTA:

Luis Guillermo García Jácome

TUTORA

Dra. Mariana Benítez Keinrad

Ciudad Universitaria, CD.MX. 2019





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno
García
Jácome
Luis Guillermo
55 37020761
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
312666918
2. Datos del tutor
Dra.
Mariana
Benítez
Keinrad
3. Datos del sinodal 1
Dr.
Garbiel
Ramos
Fernández
4. Datos del sinodal 2
Dr.
Ernesto Vicente
Vega
Peña
5. Datos del sinodal 3
Dra.
María Fernanda
Figueroa
Díaz Escobar
6. Datos del sinodal 4
M. en C.
Tlacaelel Aarón
Rivera
Núñez
7. Datos del trabajo escrito
Modelo dinámico para explorar el manejo del socio-ecosistema asociado al Área
Natural Protegida *Otoch Ma'ax Yetel Kooh*, Península de Yucatán, México
86 p
2019

Agradecimientos institucionales

A mi tutora, la Dra. Mariana Benítez Keinrad por todas sus enseñanzas y por guiarme a través de este proceso.

Al Dr. Gabriel Ramos-Fernández por todo su apoyo, su tiempo y por acompañar tan de cerca esta realización de este proyecto.

Al resto de los miembros de mi comité sinodal por sus valiosos comentarios y sugerencias que ayudaron a mejorar este trabajo: Dr. Ernesto Vicente Vega Peña, Dra. María Fernanda Figueroa Díaz Escobar y M. en C. Tlacaoel Aarón Rivera Núñez.

Al equipo de investigadores que ha trabajado en OMYK y en particular a Martha Bonilla por los recursos compartidos y a Coral Rangel Rivera por los mapas de uso de suelo y vegetación.

A los investigadores que integran el taller Análisis Integral de Sistemas Socio-ambientales (AISSA).

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología, UNAM.

A los proyectos UNAM-DGAPA-PAPIIT (IN207819) y CONACyT (247672) por las becas otorgadas.

Agradecimientos personales

A Mariana. Muchas gracias por tus enseñanzas en lo académico y no académico. Gracias por tu confianza, por todo tu apoyo y por tu amistad. Me siento muy afortunado y feliz de haber tenido la oportunidad de trabajar contigo.

A todas y todos los integrantes de *La Parcela* con los que compartí este proceso: Juan, Yolo, Blanqui, Ana, Nat, Emilio, Ceci, Irene, Kyria, Cris, Aniza, Lore, Karla, Edna, David y Victor. Muchas gracias por todo: los seminarios, las sugerencias, las comidas, las buenas charlas, las salidas, el chisme y su amistad. Son muy chidas y chidos. Ha sido muy enriquecedora esta experiencia a su lado.

A las compañeras del taller, a mis compañeros y profesores de la carrera. Gracias por sus enseñanzas y por acompañarme en mi formación.

A mi familia y amigos. Gracias por su apoyo y por siempre estar.

Índice general

0. Resumen	7
1. Introducción	8
1.1. Pérdida de la biodiversidad y Áreas Protegidas	8
1.2. Áreas Protegidas en México	9
1.3. <i>Otoch Ma'ax Yetel Kooh</i>	10
1.4. Socio-ecosistemas y resiliencia	14
1.5. Modelos dinámicos computacionales	15
1.5.1. Modelos basados en agentes	15
1.5.2. Modelos de redes booleanas	16
2. Preguntas de investigación	17
3. Objetivos	18
4. Hipótesis y predicciones	19
5. Métodos	20
5.1. Sitio de estudio	20
5.2. Construcción del modelo	23
5.2.1. Escala espacial y temporal	24
5.2.2. Agentes y Meta-agentes	24
5.2.3. Submodelos construidos mediante redes booleanas	25
5.2.4. Dinámica obtenida de los submodelos construidos mediante mode- lado de redes booleanas	32
5.2.5. Submodelos del modelo basado en agentes	33
5.2.6. Variables de salida	40
5.2.7. Estado inicial del modelo	41
5.3. Calibración, análisis de sensibilidad y prueba de validación	41
5.3.1. Implementación y verificación	41
5.3.2. Calibración	42
5.3.3. Análisis de sensibilidad	43
5.3.4. Prueba de validación	44
5.4. Simulación de escenarios	46
6. Resultados	48
6.1. Calibración	48
6.2. Análisis de sensibilidad	50

6.3. Prueba de validación	60
6.4. Simulación de escenarios	60
7. Discusión	65
7.1. Resultados del análisis de sensibilidad	65
7.2. Resultados de la prueba de validación	67
7.3. Resultados de la simulación de escenarios	68
7.4. Interpretación de los resultados en el contexto del sitio	71
7.5. Aportes y limitaciones de la modelación dinámica y la perespectiva de SES .	73
8. Conclusiones	75
9. Referencias	76
A. Apéndice 1	84
B. Apéndice 2	85

Índice de figuras

5.1. Ubicación y cobertura vegetal y uso del suelo de OMYK	22
5.2. Representación de la estructura del modelo	23
5.3. Gráfico de la red booleana	26
5.4. Atractores recuperados por el submodelo Clima	29
5.5. Precipitación promedio mensual en la región	30
5.6. Promedio del porcentaje de ocupación hotelera a lo largo del año del estado de Quintana Roo, México de 1992 a 2017	31
5.7. Atractor recuperado de los submodelos Clima, Turismo y Actividades hogar en conjunto	33
5.8. Distribución de las actividades realizadas a lo largo del año por los hogares que habitan OMYK	34
5.9. Función sigmoidea que relaciona la velocidad del viento con el porcentaje de cuadros afectados	35
5.10. Multiplicación de nodos de submodelo Actividades hogares	37
6.1. Calibración de cuatro parámetros con valores desconocidos	49
6.2. Análisis de sensibilidad del tamaño del cuadro	52
6.3. Análisis de sensibilidad del parámetro 1 de la función sigmoidea (forma de la curva)	53
6.4. Análisis de sensibilidad del parámetro 2 de la función sigmoidea (posición del punto de inflexión)	54
6.5. Análisis de sensibilidad de la probabilidad de los cuadros de quemarse	55
6.6. Análisis de sensibilidad de la media de la duración de la biomasa combustible	56
6.7. Análisis de sensibilidad de la probabilidad de flujo alto de turistas	57
6.8. Análisis de sensibilidad del número mínimo de monos necesarios para que lleguen turistas	58
6.9. Análisis de sensibilidad de la desviación estándar de la duración de la biomasa combustible	59
6.10. Resultados de la validación	60
6.11. Simulación de escenarios por combinación de actividades	61
6.12. Simulación de escenarios por estrategia	63
6.13. Escenarios con aumento de tormentas, aumento de incendios y disminución de turismo	64
A.1. Diagrama de clase UML que representa la estructura del modelo	84

Índice de cuadros

1.1. Enfoques de manejo y actividades económicas realizadas en distintos periodos dentro del polígono de OMYK por habitantes de Punta Laguna	13
5.1. Nodos definidos para la red booleana, interpretación para cada estado y función de regulación	28
5.2. Niveles de flujo de turismo definidos para el submodelo Turismo	29
5.3. Valores de la velocidad de viento por tipo de evento.	35
5.4. Valor monetario percibido por actividad	41
5.5. Parámetros del modelo	45
5.6. Escenarios de manejo explorados y su clasificación	47
6.1. Combinaciones de parámetros calibrados que presentaron una menor dispersión	48
6.2. Valores observados empíricamente y resultados del modelo	60
6.3. Resultados de la simulación de escenarios por estrategia y por variable de salida	62
6.4. Valor monetario promedio de las actividades económicas de los hogares bajo distintos disturbios	62
B.1. Cálculos del valor monetario de la milpa, apicultura y producción de carbón	85
B.2. Cálculos del valor monetario del ecoturismo	86

0. Resumen

En México, las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son el principal mecanismo de conservación *in situ* que se ha desarrollado para enfrentar la crisis de pérdida de biodiversidad. Éstas generalmente se establecen en zonas de alta diversidad biológica, que son habitadas por diversas comunidades indígenas y campesinas cuyas formas tradicionales de manejo y uso de recursos se ven afectadas por las restricciones que implica este mecanismo de conservación. En este trabajo estudiamos el caso del ANP *Otoch Ma'ax Yetel Kooch* (OMYK), ubicada en el noreste de la Península de Yucatán, que ha sido estudiada de manera multidisciplinaria por más de 20 años. Las comunidades mayas que habitan esta reserva han experimentado importantes cambios en la forma en que manejan sus recursos, debido al aumento del turismo en la región, al decreto del ANP en sus territorios y a los programas gubernamentales que promueven actividades alternativas como el ecoturismo. Estos importantes cambios han conducido a cuestionarse: ¿cuáles estrategias de manejo son compatibles con la conservación de la biodiversidad en OMYK? y ¿qué efecto tienen distintas estrategias de manejo en la capacidad de las comunidades locales y del ecosistema para responder ante disturbios como huracanes, incendios y fluctuaciones en el turismo? Para intentar contestar a estas preguntas se exploró, a través de un modelo dinámico computacional, el efecto que tienen distintas estrategias de manejo en algunos elementos del socio-ecosistema (SES) asociado a esta ANP. El modelo, a través de la incorporación del modelado basado en agentes y modelado de redes booleanas, integra información sobre algunos procesos ecológicos y sociales que ocurren en este sitio. El modelo fue calibrado, se exploró su sensibilidad, se hizo una prueba de validación y se utilizó para simular distintos escenarios de manejo. El modelo resultó ser altamente sensible a la modificación de algunos de sus parámetros; sin embargo, reprodujo con relativa fidelidad el comportamiento cualitativo de referencia para este SES. Los resultados mostraron que todas las estrategias de manejo exploradas permiten la regeneración de la selva y el crecimiento de la población de monos, lo que sugiere que las actividades tradicionales, como la agricultura de tipo milpa, pueden ser compatibles con la conservación de la biodiversidad. Los resultados también mostraron que la diversificación económica, mediante la integración balanceada de actividades económicas tradicionales y alternativas, es un mecanismo que ayuda a aumentar la resiliencia de los hogares ante algunos disturbios.

Palabras clave: Península de Yucatán; México; socio-ecosistema; milpa; ecoturismo; modelado de redes booleanas; modelado basados en agentes.

1. Introducción

1.1. Pérdida de la biodiversidad y Áreas Protegidas

La diversidad biológica o biodiversidad es “la variabilidad de organismos vivos de cualquier tipo, [...] comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas” (CDB, 1992). La biodiversidad es producto de un proceso evolutivo que inició hace 3.5 mil millones de años, cuando surgieron los primeros organismos vivos. Durante este proceso han ocurrido múltiples periodos de diversificación y extinción. Se han identificado cinco eventos de extinciones masivas y se ha estimado que más del 99 % de las especies que han existido en la Tierra se han extinguido (Barnosky et al., 2011). Esto indica que las extinciones son un proceso normal, parte de la dinámica evolutiva de la vida. No obstante, las tasas de extinción han aumentado de manera significativa en los últimos siglos. Estas observaciones han hecho que diversos autores sugieran que nos encontramos en medio de la sexta extinción masiva (Barnosky et al., 2011; Ceballos et al., 2015). Este hecho es preocupante ya que a la biodiversidad le ha tomado millones de años recuperarse y adaptarse a nuevos ambientes después de las extinciones masivas (Barnosky et al., 2011). Para detener la pérdida de biodiversidad se han desarrollado múltiples estrategias de conservación. La principal ha sido la conservación *in situ*, a través del establecimiento de Áreas Protegidas.

Un Área Protegida es “un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y manejado, a través de medios legales u otros medios efectivos, para lograr la conservación a largo plazo de la naturaleza con los servicios ecosistémicos y valores culturales asociados” (IUCN, 2008). En 2016 había, a nivel mundial, un total de 202,467 Áreas Protegidas en zonas terrestres y aguas continentales registradas en la Base de datos Mundial de Áreas Protegidas, lo que representa el 14.7 % de la superficie de estos ecosistemas (UNEP-WCMC & IUCN, 2016).

El establecimiento de espacios dedicados a la conservación es una práctica que ha sido llevada a cabo por diversos grupos humanos desde tiempos antiguos por diversos motivos (e.g., por su valor estético, religioso, cultural, para el uso humano, etc.) (Brockington et al., 2008). Sin embargo, las historias convencionales de las Áreas Protegidas suelen iniciar en 1872 con la creación del Parque Nacional de Yellowstone en Estados Unidos de Norteamérica. Yellowstone representa el modelo de Área Protegida que dominó el pensamiento conservacionista del siglo XX y ha sido el modelo de Área Protegida que más se ha promovido por todo el mundo (Brockington et al., 2008). Este modelo, que también ha sido llamado conservación de tipo fortaleza, se caracteriza por buscar la conservación de espacios de “naturaleza prístina” a través de excluir toda presencia y actividad humana (Vaccaro et al., 2013).

En la segunda mitad del siglo XX se dio un importante crecimiento de la red de Áreas Protegidas en todo el mundo. A la par de este crecimiento también hubo un aumento de las críticas hacia esta práctica de conservación (Brockington et al., 2008). Uno de los

principales debates que surgió fue sobre las consecuencias sociales de las Áreas Protegidas para las comunidades humanas que habitan en y alrededor de estos espacios. Algunas críticas empezaron a señalar la violencia, el desalojo y el despojo que acompañaban la creación de algunas Áreas Protegidas, así como las subsecuentes exclusiones y restricciones que generaban hacia las comunidades locales (Brockington & Wilkie, 2015). Otras críticas empezaron a cuestionar la idea de la existencia de una “naturaleza prístina”. Estas críticas señalaban que al buscar conservar espacios de “naturaleza prístina”, es decir, sitios que no hayan sido modificados por el humano, se estaba ignorando el papel histórico y ecológico que algunas comunidades humanas han jugado en el mantenimiento y construcción de la naturaleza (Gómez-Pompa & Kaus, 1992; Denevan, 1992).

En respuesta a las crecientes críticas, emergieron diversas aproximaciones de conservación que trataban de considerar el desarrollo de las comunidades humanas dentro de sus objetivos y reconocían el papel del humano en el mantenimiento y construcción de la naturaleza. Esto favoreció que las organizaciones conservacionistas promovieran iniciativas de co-manejo y de conservación comunitaria que buscaban tomar en cuenta el desarrollo sostenible de las comunidades locales (Vaccaro et al., 2013). Un ejemplo de esto fue el surgimiento de las Reservas de la Biósfera del programa del Hombre y la Biósfera de la UNESCO, las cuales aceptaban el uso humano en algunas de sus zonas (Adams & Hutton, 2007).

Actualmente existen diversas aproximaciones de conservación de las Áreas Protegidas que van desde áreas en las que se excluye toda actividad humana, hasta áreas que consideran el uso sostenible del territorio y la reproducción de la diversidad biocultural (Brockington et al., 2008; Rozzi et al., 2006). Existen casos exitosos de co-manejo y conservación comunitaria en los que las Áreas Protegidas han empoderado y beneficiado a los habitantes locales y han asegurado sus derechos a la tierra y a los recursos (Brockington & Wilkie, 2015). Y también existen múltiples casos en los que el establecimiento y el manejo de Áreas Protegidas continúa siendo un proceso autoritario, en los que hay una baja o nula participación de los habitantes locales, se pierde el acceso a los recursos naturales y culturales, las actividades de subsistencia son reguladas o prohibidas, y las formas locales de aprovechamiento y sus instituciones son abandonadas o seriamente afectadas (Durand & Jiménez, 2010).

1.2. Áreas Protegidas en México

México, como un país megadiverso, ha adoptado las Áreas Protegidas como principal estrategia de conservación *in situ* bajo el programa de Áreas Naturales Protegidas (ANP). Actualmente, en México hay 182 ANP de carácter federal (CONANP, s.f.), que representan cerca del 18% de la superficie del territorio nacional. Además de las ANP, el país cuenta con otros mecanismos estatales de conservación *in situ* como las unidades de manejo para la conservación de la vida silvestre, el ordenamiento ecológico y el pago por servicios ambientales (Pisanty et al., 2017). Además, también existen notables esfuerzos no estatales de conservación y manejo de territorios que son iniciativa de los pueblos indígenas y campesinos y que están asociados a algunas de las zonas que mantienen mayor biodiversidad en el país (e.g., Duran et al., 2012).

México tiene una gran diversidad de grupos indígenas cuyos territorios generalmente están en áreas de alta biodiversidad (Toledo, 2013). Además, aproximadamente la mitad de la superficie del país es propiedad social (ejidal y comunal) (Morett-Sánchez & Cosío-

Ruiz, 2017). Por lo tanto, muchas de las Áreas Protegidas que se han establecido en México son habitadas por diversas comunidades humanas y mucha de la superficie protegida es propiedad social. Estas condiciones, aunadas al hecho de que las Áreas Protegidas en México históricamente han sido creadas y manejadas de una forma centralizada y vertical, han generado que el establecimiento de muchas ANP sea visto por las comunidades locales como una imposición (García-Frapolli et al., 2009).

A pesar de que se han realizado algunos esfuerzos por descentralizar la toma de decisiones y de tomar en cuenta a los pobladores locales, la política de ANP en México aún presenta importantes dificultades y retos como: poca coordinación de las políticas públicas; conflicto entre autoridades ambientales y los habitantes locales; exclusión de necesidades, perspectivas, valores y creencias de los pobladores locales en la implementación y desarrollo de la política de conservación (García-Frapolli et al., 2009); privilegio de aspectos biológicos-ecológicos sobre el carácter social del espacio (Durand & Jiménez, 2010); falta de monitoreo y seguimiento de las condiciones ecológicas y socioeconómicas dentro y fuera de las ANP (Pisanty et al., 2017); subordinación de las actividades de conservación a las extractivas (e.g., Armendáriz-Villegas et al., 2015); y procesos de participación deficientes (Durand et al., 2014; Peterson, 2011).

1.3. *Otoch Ma'ax Yetel Kooh*

Otoch Ma'ax Yetel Kooh (“la casa del mono y el puma” en maya yucateco; OMYK) es un ANP bajo la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna que se ubica en el noreste de la Península de Yucatán (Figura 5.1). Tiene una extensión de 5367 ha que comprenden un cuerpo de lagos rodeado por selva mediana subperenifolia en diferentes estados sucesionales, la cual alberga a una población de monos araña (*Ateles geoffroyi*) y muchas otras especies (García-Frapolli et al., 2007; Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003).

La zona es habitada por varias comunidades mayas, como: Punta Laguna, Campamento Hidalgo y Nuevo Yodzonot. Los habitantes locales practican una forma de manejo y uso de recursos que se ha llamado estrategia de usos múltiples (EUM), la cual consiste en la implementación de diversas actividades económicas (e.g., agricultura, apicultura, producción de carbón, recolección de productos del monte, producción de traspatio) en diversas unidades de paisaje (e.g., milpa, jardines de traspatio, selva sucesional, selva madura) (García-Frapolli et al., 2008; Toledo et al., 2003). Esta estrategia se caracteriza por estar abierta a integrar nuevas actividades con el objetivo de maximizar la diversidad y el número de opciones disponibles para mantener un flujo continuo de bienes y servicios y minimizar los riesgos (García-Frapolli et al., 2007; Toledo et al., 2003). Esta forma de manejo diversificada, junto con los conocimientos tradicionales y símbolos asociados, forma parte de una forma de relacionarse con la naturaleza que los pobladores locales llaman *Kanan k'aax* (“cuidado del monte”) (Rivera-Núñez, 2014; Rivera-Núñez et al., s.f.).

A diferencia de la mayoría de las ANP en México, que son decretadas siguiendo una racionalidad centralizada por las autoridades gubernamentales sin consultar a las comunidades locales (“de arriba hacia abajo”), OMYK fue decretada en respuesta a la iniciativa de los pobladores locales (“de abajo hacia arriba”) (García-Frapolli et al., 2007).

La zona fue habitada por grupos mayas durante el periodo prehispánico, como lo demuestran los restos arqueológicos encontrados en la zona (CONANP, 2006; Rivera-Núñez, 2014). Posteriormente el sitio permaneció inhabitado por aproximadamente cuatro siglos

y en la década de 1960 se instalaron los primeros pobladores modernos y se fundaron las comunidades de Punta Laguna y Yohactùn (posteriormente relocalizada y renombrada como Nuevo Yodzonot) (García-Frapolli, 2006; Rivera-Núñez, 2014). Estas primeras comunidades emigraron de sus comunidades natales en busca del árbol del chico zapote para extraer el chicle y de tierra para realizar agricultura de tipo milpa de “roza tumba y quema” (García-Frapolli et al., 2008). Antes de la década de 1980 la zona era de difícil acceso dado que no había ninguna vialidad cercana. En 1982 se terminó de construir la carretera de Cobá a Nuevo Xcan, la cual atraviesa la comunidad de Punta Laguna, y se fundó la comunidad de Campamento Hidalgo. La carretera permitió que en la década de 1980 llegaran los primeros turistas al sitio, atraídos por la facilidad para ver a los monos araña en este sitio (García-Frapolli et al., 2013). También en este periodo llegaron los primeros grupos de científicos a trabajar al sitio y Pronatura Península de Yucatán, una organización no gubernamental. En la década de 1990 los pobladores locales, en busca de que sus esfuerzos de conservación se reconocieran, y apoyados y asesorados por Pronatura Península de Yucatán y por algunos científicos que trabajaban en la zona, iniciaron las gestiones para que el sitio se declarara como reserva (García-Frapolli, 2006; Rivera-Núñez, 2014). Finalmente, el sitio fue decretado como ANP en 2002 y en 2006 entró en vigor el plan de manejo del sitio.

El término de la construcción de la carretera Cobá-Nuevo Xcan y la entrada en vigor del plan de manejo de la reserva son dos eventos que permiten distinguir a grandes rasgos tres periodos distintos de manejo principalmente en la comunidad de Punta Laguna (Rivera-Núñez, 2014) (Cuadro 1.1):

- (1) Durante el primer periodo, desde la década de 1960 hasta antes de 1982, los pobladores locales se dedicaban a la extracción del chicle y a realizar múltiples actividades de auto-sustento como la producción de milpa, la extracción de distintos productos del monte (plantas medicinales, leña, madera) y al cuidado de animales y de huertos de traspatio. Posteriormente la industria de extracción de chicle fue sustituida por las resinas sintéticas y los habitantes locales se dedicaron principalmente a las actividades de auto-sustento.
- (2) Durante el segundo periodo, de 1982 a 2005, algunos pobladores locales integraron nuevas actividades económicas como el ecoturismo, la apicultura y la producción de carbón. Durante este periodo los pobladores locales, en vista del potencial turístico que representaban los monos que habitan la selva madura, establecieron un acuerdo comunitario para conservar la selva con una edad mayor a 50 años, la cual no podía ser utilizada para realizar actividades agroforestales (García-Frapolli, 2015).
- (3) El tercer periodo de manejo, que abarca desde 2006 a la fecha, está caracterizado por una tendencia de los habitantes a abandonar muchas de sus actividades tradicionales y encaminarse hacia una especialización productiva basada en el ecoturismo. Esta tendencia se debe al interés de los pobladores locales de dedicar más tiempo al ecoturismo dada la promoción de esta actividad por los programas gubernamentales y la entrada en vigor del plan de manejo, el cual restringe la realización de muchas de las actividades tradicionales dentro del polígono del ANP. Por ejemplo, se prohibió el uso de fuego dentro de la reserva, lo cual impide la producción de milpa como tradicionalmente se hacía. Este periodo también se caracteriza porque la CONANP se convierte en la principal institución encargada del manejo del sitio, desplazando

el esquema de co-manejo que estaban construyendo la comunidad local y Pronatura Península de Yucatán (Rivera-Núñez, 2014).

El decreto del sitio como ANP y la entrada en vigor del plan de manejo se pueden entender como un cambio de paradigma en la forma en que la conservación de la biodiversidad se llevaba a cabo en el sitio (Rivera-Núñez, 2014). De una conservación de base comunitaria, que tomaba en cuenta el papel del humano en la construcción del paisajes, a una conservación centralizada orientada hacia la “conservación de tipo fortaleza”, que busca excluir en la mayor medida el uso humano. Este importante cambio en la forma de manejo del sitio se puede entender en parte como producto de una exclusión valorativa en el proceso del diseño del plan de manejo (García-Frapolli, 2015). Esto, ya que a pesar de que el plan de manejo fue producto de un proceso participativo, éste refleja principalmente las visiones, valores, principios e intereses de la CONANP, cuyo principal objetivo es la conservación biológica. Por lo tanto, esta iniciativa de conservación que inició siendo diseñada y gestionada a nivel local, terminó siendo un proyecto diseñado y gestionado principalmente por agentes externos (García-Frapolli, 2015).

Los cambios en el manejo del sitio y la nueva tendencia hacia la especialización productiva han puesto sobre la mesa algunas interrogantes como: ¿cuáles estrategias de manejo y uso de recursos son compatibles con la conservación de la biodiversidad en OMYK? y ¿qué efecto tienen distintas estrategias de manejo en la capacidad de las comunidades locales y del ecosistema para responder ante disturbios como huracanes, incendios y fluctuaciones en el turismo? Algunas de estas preguntas ya han sido abordadas en otros trabajos. Por ejemplo, García-Frapolli y col. (2007) a través de un modelo probabilístico encontraron que la agricultura a pequeña escala no tenía un efecto negativo en la regeneración de la selva, lo que sugiere que un manejo que permite la realización de actividades tradicionales dentro del ANP es compatible con los objetivos de conservación; García-Frapolli y col. (2012) han propuesto que la diversificación económica de las EUM promueve la resiliencia de los habitantes locales ya que les da mayor margen de maniobra ante disturbios como los huracanes y las fluctuaciones económicas, por lo que sugieren que la tendencia a la especialización productiva puede hacer más vulnerables a los hogares; Spaan (2017) ha sugerido que la población de monos es bastante resiliente al disturbio de su hábitat; y Bonilla-Moheno (2008, 2010) también ha propuesto que la selva es resiliente ante los huracanes y la agricultura tradicional de roza tumba y quema. En este trabajo nos proponemos abordar de nuevo estas interrogantes de forma conjunta, desde un distinto enfoque y con distintas herramientas analíticas. Esto, con la finalidad de poner a prueba o robustecer algunas de las propuestas que se han hecho con mayor o menor grado de formalidad. En particular en este trabajo el sitio se definió como un socio-ecosistema y se exploraron estas preguntas a través de un modelo dinámico computacional.

Cuadro 1.1: Enfoques de manejo y actividades económicas realizadas en distintos periodos dentro del polígono de OMYK por habitantes de Punta Laguna. Que una actividad no se realice dentro del polígono de OMYK no significa que no se continúe practicando por algunos miembros de la comunidad. Sin embargo, la tendencia observada es de un abandono de la diversificación económica que caracteriza a las EUM hacia una especialización económica en el ecoturismo (Rios-Beltrán, 2016). Tomado y modificado de Rivera-Núñez (2014).

	1964-1981	1982-2005	2006-
Principales actores encargados del manejo	Comunidad local	Comunidad local - PPY	CONANP
Tipo de estrategia de conservación	Conservación de base comunitaria	Conservación de base comunitaria	ANP
Tipología de manejo	Etnopaisaje “Kanan Ka'ax” (cuidado del monte)	Etnopaisaje “Kanan Ka'ax” (cuidado del monte)	Fortaleza “Reservar”
Principal estrategia de manejo	Estrategia de usos múltiples	Estrategia de usos múltiples	Tendencia a la especialización
Actividades	Animales de traspatio	A	-*
	Cacería	A	-*
	Extracción de productos del monte	A	-*
	Milpa	A	-*
	Huertos de traspatio	A	-
	Extracción de chicle	RE	-
	Apicultura	-	-
	Producción de carbón	-	-*
	Asistencia científica	-	RE
	Ecoturismo	-	RE
	Artesanías	-	RE

A: actividad de auto-consumo

RE: actividad remunerada económicamente

-: no se realiza la actividad

*: actividad prohibida por el plan de manejo del ANP

PPY: Pronatura Península de Yucatán

1.4. Socio-ecosistemas y resiliencia

El concepto de SES es un concepto que se ha utilizado ampliamente en estudios que buscan integrar elementos sociales, ecológicos y económicos en un mismo análisis. Los SES se han definido como: “sistemas complejos e integrados en donde los humanos son parte de la naturaleza” (Resilience-Alliance, s.f.). Dos elementos que caracterizan el enfoque de SES son: (1) que se adopta una visión sistémica, y (2) que se busca romper las barreras históricas entre las ciencias sociales y las ciencias naturales. El enfoque de sistemas ha promovido que los sistemas de estudio, sean vistos como sistemas complejos adaptativos (Berkes et al., 2003). Por lo tanto, suele reconocerse la existencia de dinámicas no lineales, de múltiples escalas espaciales y temporales, de bucles de retroalimentación, de puntos críticos y de propiedades emergentes (An et al., 2005). Además, un concepto que se ha ido desarrollando en relación con el creciente interés por estudiar SES ha sido el de resiliencia.

La resiliencia generalmente se define como “la capacidad de un sistema por absorber el disturbio y reorganizarse mientras se sobrellevan cambios para mantener esencialmente su misma estructura, funcionamiento, identidad y retroalimentaciones” (Walker et al., 2004). La resiliencia puede considerarse como una medida de la cantidad de disturbio que un sistema puede resistir antes de que cambien las variables y los procesos que controlan su comportamiento, es decir, antes de que cambie de dominio de atracción (Folke, 2006; Holling, 1973). Por lo tanto, un sistema altamente resiliente es aquel que tiene una mayor probabilidad de adaptarse al cambio y resistir el disturbio sin colapsar y caer a otro dominio de atracción. Mientras que un sistema poco resiliente es aquel altamente vulnerable al disturbio y al cambio, que tiene una mayor probabilidad de sobrepasar los umbrales del dominio de atracción donde se encuentra y caer en uno nuevo.

El concepto de resiliencia se originó en la ecología y posteriormente se adoptó en el estudio de SES. El significado del término difiere significativamente en su uso en la ecología y en el estudio de SES (Egli et al., 2018). En ecología el término generalmente se entiende como una propiedad de estabilidad y se suele relacionar con las siguientes tres propiedades: recuperación (i.e., tiempo necesario para que una variable de estado alcance sus niveles previos al disturbio), resistencia (i.e., cantidad de cambio de una variable de estado después de un disturbio) y variabilidad (i.e., cantidad de cambio de una variable a lo largo del tiempo). Por otro lado, en la investigación de SES la resiliencia muchas veces es entendida como un marco de referencia holístico en las ciencias de la sustentabilidad, que enfatiza las retroalimentaciones, el cambio y la capacidad adaptativa (Egli et al., 2018; Folke, 2006). Bajo esta concepción, la resiliencia se suele entender como una propiedad intrínsecamente positiva y deseable, y como consecuencia, se suelen buscar mecanismos que promuevan la resiliencia de los SES (e.g., Biggs y col. (2012)). En este trabajo se adoptó el concepto principalmente de la forma en que es utilizado en ecología, es decir, como una propiedad de estabilidad. Esto se debió a la ambigüedad y dificultad de hacer operable el concepto según su uso en la investigación de SES.

Los conceptos de SES y resiliencia se han popularizado ampliamente. Esta creciente popularidad también ha sido acompañada por un aumento de las críticas hacia ellos. Algunas críticas señalan cómo estos conceptos suelen caracterizar mal a los sistemas sociales ya que demuestran una falta de conocimiento y consideración sobre las complejas dinámicas sociales y culturales; por ejemplo, una falta de consideración de las relaciones de poder, la agencia, el conocimiento y los conflictos (Olsson et al., 2015; Stojanovic et al., 2016). Otros críticos argumentan que la teoría de la resiliencia está siendo utilizada para justificar y perpetuar discursos neoliberales y mantener las relaciones de poder existentes

(Cretney, 2014; Cretney & Bond, 2014; Mirenda & Lazos-Chavero, 2018). Estas críticas han favorecido que, gradualmente, los adeptos de las aproximaciones de sistemas y de la teoría de resiliencia empiecen a tomar en consideración algunos de estos aspectos (Stojanovic et al., 2016). A pesar de las críticas y sin soslayar sus limitaciones, los conceptos de socio-ecosistemas y resiliencia continúan siendo relevantes, dado que han demostrado ser efectivos en promover aproximaciones multidisciplinarias e interdisciplinarias (Stojanovic et al., 2016; Herrero-Jáuregui et al., 2018).

1.5. Modelos dinámicos computacionales

Los SES son sistemas complejos con dinámicas que pueden ser muy lentas y por lo tanto, realizar experimentos en ellos puede ser una tarea muy difícil. Una alternativa para estudiar estos sistemas son los modelos dinámicos computacionales. Los cuales son herramientas que permite realizar experimentos repetibles en ambientes totalmente controlados, en periodos de tiempo cortos y sin afectar directamente a las personas que los habitan (Barreteau et al., 2001). Los resultados de las simulaciones en estos SES virtuales pueden ser comparados con los sistemas reales y posteriormente ayudar a desarrollar teorías y probar hipótesis del comportamiento y manejo de los SES.

Los modelos basados en agentes y los modelos de redes booleanas son dos tipos de modelos dinámicos que se han utilizado ampliamente en el estudio de los sistemas complejos. En este trabajo se utilizaron estos dos tipos de modelos los cuales se describen a continuación.

1.5.1. Modelos basados en agentes

El modelado basado en agentes es una aproximación de modelación “de abajo-hacia arriba” en la que un sistema se representa a través de la interacción de sus elementos individuales. Esto contrasta con las aproximaciones de modelación “de arriba-hacia-abajo”, como las ecuaciones diferenciales ordinarias, donde un sistema se representa a través de variables y parámetros que describen el estado de todo el sistema (DeAngelis & Grimm, 2014; Railsback & Grimm, 2012; Wilensky & Rand, 2015).

En los modelos basados en agentes se describen entidades únicas autónomas, llamadas agentes, las cuales interactúan localmente entre ellas y con su ambiente. Los agentes pueden representar animales, plantas, humanos, instituciones, organismos, etc. que poseen ciertos objetivos (e.g., maximizar la energía, maximizar las ganancias, reducir los conflictos). Cada agente posee: (1) un conjunto de variables de estado (e.g. localización espacial, edad, energía, etc.) y (2) un conjunto de reglas que determinan su comportamiento (e.g., crecer, dispersarse, cultivar, etc.) (Railsback & Grimm, 2012). Los modelos basados en agentes permiten generar representaciones espacialmente explícitas de un sistema y nos ayudan a estudiar algunas propiedades de los sistemas complejos como la emergencia, la auto-organización y el comportamiento adaptativo (Railsback & Grimm, 2012; Wilensky & Rand, 2015).

Este tipo de modelos empezó a ser utilizado desde la década de 1970 de manera independiente en la ecología (donde son conocidos como modelos basados en individuos) y en las ciencias sociales (An, 2012). En años recientes ha habido un crecimiento considerable en el uso de los modelos basados en agentes para estudiar SES (An, 2012). Algunos ejemplos de trabajos en los que se han utilizado modelos basados en agentes para estudiar socio-ecosistemas son: el trabajo de Iwamura y col. (2014, 2016) en el que estudian posibles

escenarios de degradación ecológica en comunidades indígenas Rupunnunis en la Guyana Amazónica, el trabajo de An y col. (2005) en el que exploran el impacto de los cambios demográficos humanos en la deforestación del hábitat del panda en la reserva de Wolong, China, y el trabajo de Braasch y col. (2018) que aborda el efecto de diversas prácticas de manejo en la Reserva de la Sepultura, México. Este último trabajo, a su vez ilustra cómo estos modelos también se han utilizado para facilitar la comunicación entre diversos actores y desarrollar estrategias participativas para la toma de decisiones en ANP.

1.5.2. Modelos de redes booleanas

Los modelos de redes booleanas son un tipo de modelos que provee de una representación cualitativa de un sistema (Saadatpour & Albert, 2013). Las redes booleanas son gráficas dirigidas, donde los nodos representan elementos de un sistema (e.g., genes, proteínas, estímulos ambientales, poblaciones de especies) y las aristas representan relaciones de regulación entre elementos (e.g., activación o desactivación). Estos modelos son representaciones discretas de un sistema en los que los nodos pueden tomar únicamente dos estados: “verdadero” (e.g., activado, sobre un umbral, presencia) o “falso” (e.g., desactivado, debajo de un umbral, ausencia) (Albert et al., 2008). El estado futuro de cada nodo está determinado por el estado actual de sus reguladores (nodos que apuntan hacia él), mediante una regla llamada función de regulación. Las funciones de regulación generalmente se expresan mediante los operadores booleanos: conjunción (\wedge), disyunción (\vee) y negación (\neg).

Existen principalmente dos algoritmos para actualizar el estado de los nodos: sincrónico y asincrónico (Saadatpour & Albert, 2013). El algoritmo sincrónico supone que todos los procesos involucrados en el sistema ocurren a escalas temporales similares. Así, el estado de un nodo n en el tiempo $t + 1$, denotado como $X_n(t + 1)$, está determinado por el estado de sus reguladores en el tiempo t (Saadatpour & Albert, 2013):

$$X_n(t + 1) = F_n(X_{n_1}(t), X_{n_2}(t), \dots, X_{n_k}(t)),$$

donde F_n es una regla booleana para el nodo n y $X_{n_1}(t), X_{n_2}(t), \dots, X_{n_k}(t)$ es el estado de los nodos reguladores en el tiempo t .

Estos son modelos deterministas que tienen un número finito de posibles estados (Saadatpour & Albert, 2013). Por lo tanto, a través de la actualización iterativa de los nodos se puede obtener el estado de todo el sistema en cada paso de tiempo e identificar los llamados atractores. Los atractores son los estados dinámicamente estables del sistema y describen su comportamiento a largo plazo (Saadatpour & Albert, 2013). Los atractores en las redes sincrónicas pueden ser de dos tipos: (1) atractores de punto fijo, que consisten en un solo estado, o (2) atractores cíclicos, que están formados por una secuencia de estados que se repiten y cuya longitud se conoce como periodo (Albert et al., 2008).

Este tipo de modelos han sido ampliamente utilizado para el estudio de sistemas de escala celular y molecular (e.g., Albert y col. (2008), Arias Del Angel y col. (2018), Benítez y col. (2008)). Recientemente también se han utilizado para estudiar sistemas ecológicos y agrícolas, por ejemplo, el trabajo de Robeva y Murrugarra (2016) en el que estudian la dinámica de los insectos del género *Choristoneura*, el trabajo de Gaucherel y col. (2017) en el que analizan los cambios de régimen en el desarrollo de los ecosistemas y el trabajo de López-Martínez (2017) que explora el manejo del agroecosistema tipo milpa.

2. Preguntas de investigación

- ¿Cuáles estrategias de manejo y uso de recursos son compatibles con la conservación de la biodiversidad en OMYK?
- ¿Qué efecto tienen distintas estrategias de manejo en la resiliencia del socio-ecosistema asociado a OMYK ante distintos disturbios ecológicos y económicos?

3. Objetivos

Objetivo general

Explorar, mediante un modelo dinámico computacional, el efecto de distintas estrategias de manejo y uso de recursos sobre la capacidad de conservar la biodiversidad y sobre la resiliencia del SES asociado a OMYK.

Objetivos particulares

1. Diseñar un modelo dinámico que integre parte de la información disponible en la literatura sobre procesos sociales y ecológicos que ocurren en OMYK.
2. Calibrar, analizar la sensibilidad y hacer una prueba de verificación del modelo a través de la exploración sistemática de la dinámica de una implementación computacional.
3. Explorar el efecto de distintas estrategias de manejo sobre distintos elementos del SES mediante la simulación de distintos escenarios.

4. Hipótesis y predicciones

H1. La realización de actividades tradicionales a pequeña escala, como agricultura de subsistencia de tipo roza-tumba y quema, es compatible con la conservación de la biodiversidad en OMYK.

P1. La producción de milpa dentro de la reserva no tendrá un efecto negativo significativo en el crecimiento de la población de monos y en la regeneración de la selva.

H2. La diversificación balanceada entre actividades de auto-sustento y actividades de mercado aumenta la resiliencia de los hogares que habitan OMYK.

P2. Los hogares que implementen una estrategia donde haya un balance entre actividades de auto-sustento (e.g., producción de milpa) y actividades de mercado (e.g., ecoturismo, apicultura, producción de carbón) tendrán una menor variabilidad en su sustento económico y una mayor resistencia económica ante diversos disturbios que aquellos hogares con estrategias de manejo más especializadas en actividades de auto-sustento o en actividades orientadas al mercado.

5. Métodos

5.1. Sitio de estudio

Otoch Ma'ax Yetel Kooh (OMYK) es un ANP bajo la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna que se encuentra ubicada en el noreste de la Península de Yucatán (20°38' N, 87°37'O) y tiene una extensión de 5367 ha (Figura 5.1). El ANP se localiza a 18 km al noreste del sitio arqueológico de Cobá y a 25 km al sur de Nuevo Xcan, en el estado de Quintana Roo, México. A pesar de que la totalidad de la reserva se encuentra ubicada geográficamente dentro del estado de Quintana Roo, la administración de ésta corresponde al ejido de Valladolid, Yucatán (CONANP, 2006). La reserva forma parte de la superficie de uso común del ejido, el cual fue dotado en 1942 y tiene una superficie total de 34,434.02 ha y un total de 624 ejidatarios (RAN, s.f.).

El sitio tiene una altitud media de 14 msnm y presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw2). La temporada seca abarca de diciembre a abril y la temporada lluviosa de mayo a noviembre (CONANP, 2006). La tempera media anual es de 24.3°C, y la precipitación media anual es de 1,120.2 mm (SMN, 2019).

La vegetación dominante es selva mediana subperenifolia (Bonilla-Moheno & Holl, 2010), no obstante, también se pueden encontrar pastizal inundable y selva baja inundable. Algunas especies de plantas características de la selva son *Manilkara sapota*, *Brosimum alicastrum*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Bursera simaruba*, *Ficus cotinifolia*, *Lysiloma bahamensis*, entre otras (CONANP, 2006; Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003). El paisaje está conformado por un mosaico de selva media en distintas etapas sucesionales, que es resultado de la producción de milpa mediante la práctica de roza, tumba y quema y de disturbios naturales característicos de la región como huracanes e incendios (Bonilla-Moheno & Holl, 2010; Rangel-Rivera, 2017). Hidrológicamente, el sitio, además de contar con un cuerpo de lagunas, tiene cenotes y amplias depresiones inundables (CONANP, 2006).

El sitio presenta una alta diversidad faunística y es habitada por varias especies bajo protección especial, amenazadas o en peligro de extinción de acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010 (CONANP, 2006). Algunas de estas especies son: el mono araña (*Ateles geoffroyi*), el jaguar (*Panthera onca*), el puma (*Puma concolor*), el mono aullador (*Alouatta pigra*), el tigrillo (*Leopardus wiedii*), el cocodrilo de pantano (*Crocodylus moreletii*), entre otros.

El plan de manejo de la reserva reconoce a tres comunidades usuarias: Punta Laguna, Campamento Hidalgo y Nuevo Yodzonot (CONANP, 2006). La comunidad de Punta Laguna se encuentra ubicada al sur-este del polígono de la reserva, sobre la carretera Cobá-Nuevo Xcan. La comunidad de Nuevo Yodzonot está localizada dentro del ANP, a 2 km de distancia de la carretera. La comunidad de Campamento Hidalgo se ubica fuera de la reserva, a 8 km al sur de Punta Laguna y también sobre la carretera. En este trabajo nos centramos únicamente en la comunidad de Punta Laguna, la cual, dado su tamaño

y cercanía al polígono, ha sido de las más impactadas por el decreto de la reserva. Esta comunidad tiene un total de 136 habitantes distribuidos en 28 hogares. La totalidad de los habitantes se autodenominan como mayas peninsulares (Rivera-Núñez, 2014). Actualmente las principales actividades económicas de los hogares son el ecoturismo y la venta de artesanías. Los hogares practican una EUM, manejan un total de cinco unidades de tierra y realizan 13 diferentes actividades (García-Frapolli et al., 2007):

- (1) milpa: agricultura, apicultura, producción de carbón, recolección de leña y cacería;
- (2) jardines de traspatio: producción de traspatio;
- (3) sistemas acuáticos: pesca y ecoturismo;
- (4) selva secundaria: recolección de plantas medicinales, recolección de leña y de madera para la construcción, cacería y pastoreo; y,
- (5) selva madura: ecoturismo e investigación científica.

Ocasionalmente los habitantes realizan trabajos temporales fuera del área, como albañiles, jornales o para limpiar caminos (Rios-Beltrán, 2016).

Con el decreto del ANP y entrada en vigor del plan de manejo se imposibilitó la realización de algunas actividades tradicionales dentro de la reserva como la producción de milpa, la extracción de leña y plantas y la cacería (CONANP, 2006). Esto, aunado al crecimiento de la actividad turística en la región y a diversos programas gubernamentales han generado una importante tendencia de los habitantes de Punta Laguna de abandonar la EUM y especializarse en las actividades relacionadas al ecoturismo (Rios-Beltrán, 2016).

En el sitio se han realizado investigaciones de manera constante desde 1996. Las líneas de investigación son diversas y abarcan estudios de la ecología de la conducta de la población de monos (Ramos-Fernández et al., 2018), estudios de los procesos de sucesión y restauración ecológica (Bonilla-Moheno, 2008; Bonilla-Moheno & Holl, 2010), estudios de los sistemas locales de apropiación de la naturaleza (García-Frapolli, 2006; García-Frapolli et al., 2008; Rios-Beltrán, 2016), análisis de cambio de uso de suelo y vegetación (García-Frapolli et al., 2007; Rangel-Rivera, 2017), estudios sobre conservación (Bonilla-Moheno & García-Frapolli, 2012; García-Frapolli, 2015; Rivera-Núñez, 2014; García-Frapolli et al., 2009) y análisis de instituciones locales (García-Frapolli et al., 2013; Rivera-Núñez, 2014).

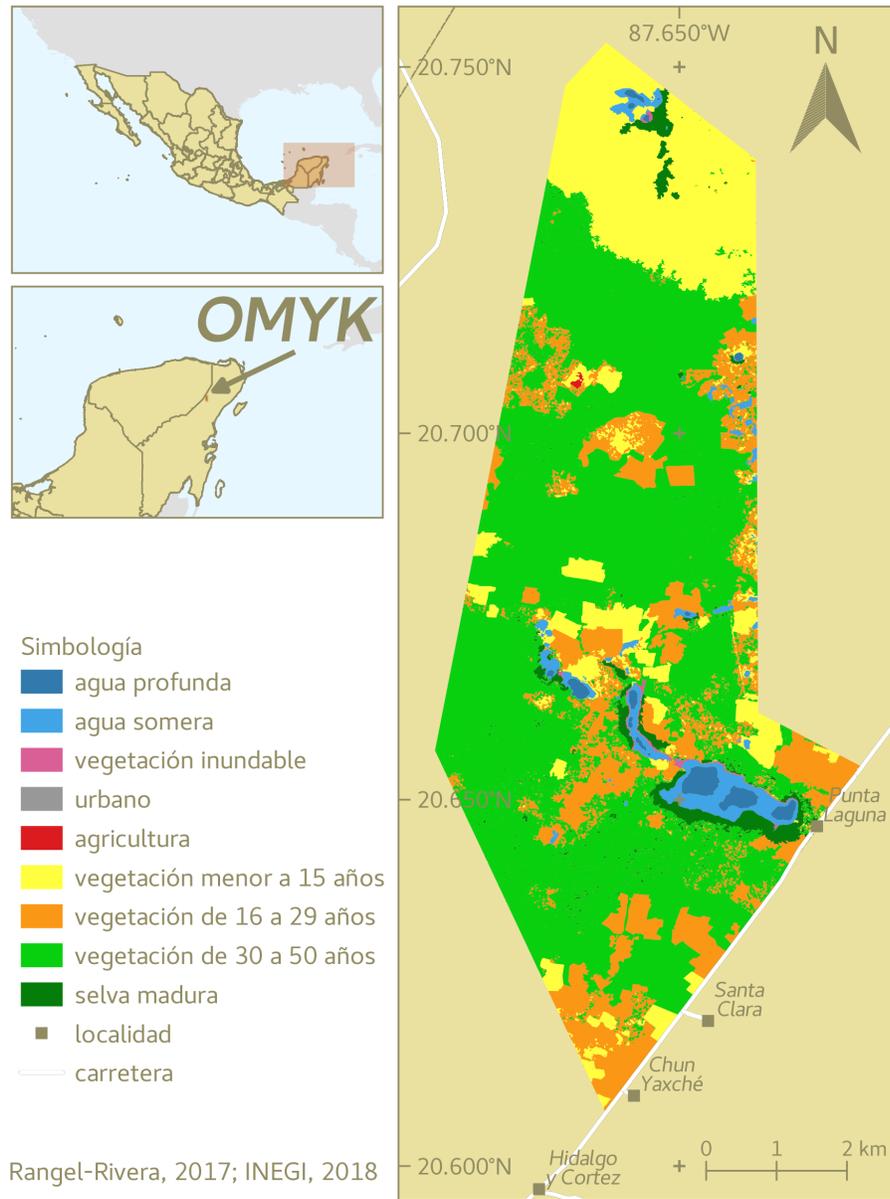


Figura 5.1: Ubicación y cobertura vegetal y uso del suelo de OMYK. Mapa proporcionado por Rangel-Rivera (2017).

5.2. Construcción del modelo

Para explorar el efecto de distintas estrategias de manejo en el SES asociado a OMYK se desarrolló un modelo dinámico computacional espacialmente explícito (Figura 5.2). Se creó computacionalmente un paisaje virtual con las características de OMYK en términos de tipo, producción y distribución de usos de suelo y vegetación. Dentro de este paisaje, se insertó un grupo de hogares y un grupo de monos araña virtuales, entre otros elementos, y se simularon los siguientes procesos: (1) la dinámica climática anual, (2) la incidencia de tormentas, (3) el flujo de turistas al sitio, (4) la realización de las actividades económicas de los hogares, (5) la incidencia de incendios, (6) el movimiento de los monos araña, (7) la regeneración de la selva y (8) la dinámica poblacional de los monos. Cada uno de estos procesos puede ser entendido como un submodelo y, de aquí en adelante, serán nombrados como tales.

Como se detalla en las secciones subsecuentes, el modelo se construyó integrando dos herramientas de modelación: el modelado de redes booleanas y el modelado basado en agentes. El modelado de redes booleanas se utilizó para simular la dinámica climática anual, el flujo de turistas al sitio y la realización de las actividades económicas de los hogares, mientras que el modelado basado en agentes se utilizó para darle al modelo un carácter espacialmente explícito y simular el resto de los submodelos mencionados anteriormente. El modelado basado en agentes integra todos los submodelos, por lo que el modelo se puede describir y entender principalmente como un modelo basado en agentes.

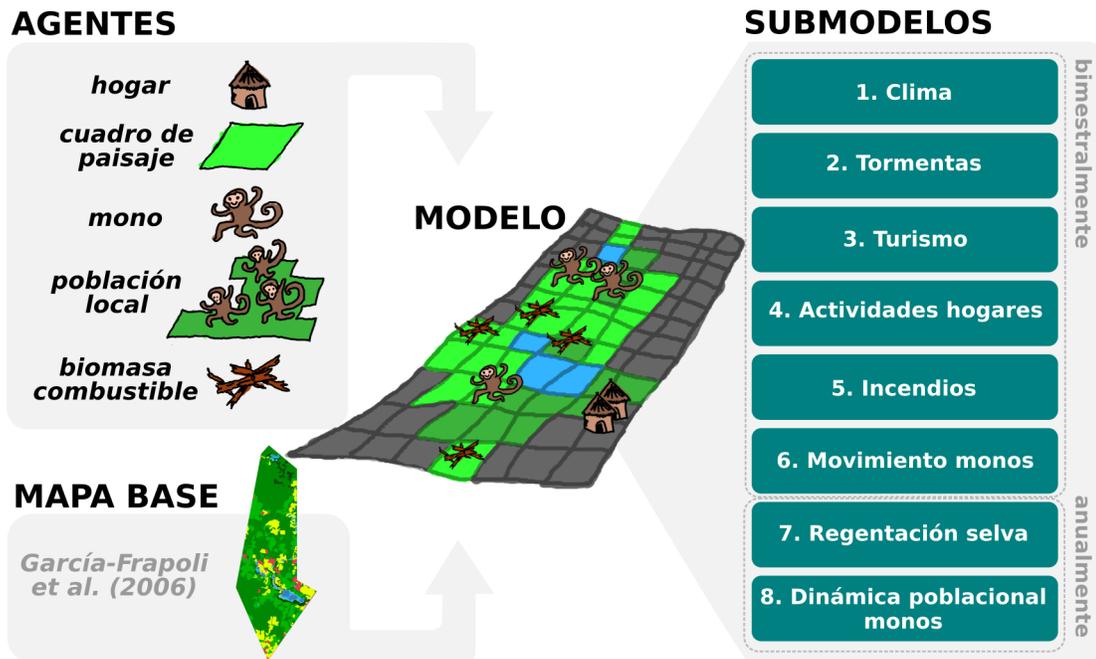


Figura 5.2: Representación de la estructura del modelo. El modelo está formado por cuatro agentes y un meta-agente (población local). Estos agentes fueron insertados en un mundo virtual con las características de OMYK en términos de tipos y distribución de uso de suelo y vegetación que se construyó a partir de un mapa de uso de suelo y vegetación. Con estos elementos se simularon 8 procesos o submodelos, seis de los cuales ocurren cada iteración del modelo (cada bimestre) y dos de ellos cada seis iteraciones (anualmente).

En las siguientes subsecciones se describe el modelo. En primer lugar, se explica cuáles

son las escalas temporales y espaciales con las que se trabajaron. En segundo lugar, se describen de manera general los agentes que conforman al modelo. En tercer lugar, se explican los submodelos construidos mediante redes booleanas y se describe el comportamiento obtenido de la dinámica de estos tres submodelos en conjunto. En cuarto lugar, se describen cada uno de los ocho submodelos que conforman al modelo. Es necesario indicar que en esta sección, los tres submodelos construidos mediante modelado de redes booleanas se volverán a tratar para describir las modificaciones y extensiones que se realizaron al integrarlos con los submodelos no construidos mediante redes booleanas. Finalmente, se explican cuáles fueron las variables de salida que se utilizaron para evaluar el SES y cómo se inicializó el modelo.

5.2.1. Escala espacial y temporal

Para crear el modelo se utilizó un mapa de uso de suelo y cobertura vegetal de 2003 generado por García-Frapolli y col. (2007). Este mapa se rasterizó de forma que cada grano del mapa representara un cuadro de 3 ha ($173.2 \text{ m} \times 173.2 \text{ m}$) y se insertó dentro de una cuadrícula de 37×94 píxeles. En el modelo únicamente se consideró el área que ocupa el polígono de la reserva, por lo que todos los cuadros fuera de ésta fueron ignorados. Se eligió que cada cuadro representara 3 ha para economizar el tiempo de las simulaciones y para facilitar la implementación (en el Análisis de sensibilidad se exploró el comportamiento del modelo con un grano de 1 ha ($100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$) en una cuadrícula de 61×162 píxeles). También para simplificar el modelo se decidió trabajar únicamente con la comunidad de Punta Laguna.

Cada iteración en el modelo representa un bimestre (dos meses). La elección de esta escala temporal se basa en a la dinámica que se obtiene del submodelo Clima (ver 5.2.3.1 Clima (Red booleana)).

5.2.2. Agentes y Meta-agentes

Los modelos basados en agentes modelan la interacción entre conjuntos de entidades autónomas llamados agentes. Cada agente está conformado por: (1) un conjunto de variables, que describen su estado en un momento determinado, y (2) un conjunto de reglas, que determinan su comportamiento. Un meta-agente es un agregado de agentes que actúa como una entidad. Este modelo está conformado por cuatro tipos distintos de agentes y un meta-agente: (1) cuadros de paisaje, (2) hogares, (3) monos, (4) biomasa combustible y (5) población local de monos. Estos agentes se eligieron ya que son los elementos del SES que más se han estudiado y para los que hay mayor información en la literatura. Además, se consideró que estos son los elementos suficientes para representar los procesos que se querían estudiar.

En el Apéndice 1 (Figura A.1) se muestra la estructura del modelo y se muestran las variables y procesos de cada agente y meta-agente. A continuación se describen brevemente las principales variables y reglas de comportamientos de cada uno de los agentes y meta-agentes. Algunos agentes tienen variables y procesos que se utilizan para solucionar detalles técnicos de la implementación que no se desarrollan aquí.

5.2.2.1. Cuadros de paisaje

Este agente representa un cuadro de paisaje de 3 ha. Las principales variables de los cuadros son su edad sucesional y su tipo de uso de suelo. El tipo de uso de suelo de los

cuadros puede ser: selva, agua, milpa, quemado u hogar. Los cuadros de tipo selva, milpa y quemado se regeneran cada año aumentando su edad sucesional. Los cuadros de tipo agua y hogar mantienen su tipo y su edad sucesional constantes todo el tiempo. Los cuadros de tipo selva o milpa pueden acumular biomasa combustible lo cual los hace susceptibles a quemarse. Cuando un cuadro se quema éste cambia su tipo de uso de suelo a quemado y su edad sucesional se hace igual a cero. Los cuadros de tipo milpa son generados por los hogares que se dedican a la agricultura. Cuando un cuadro de tipo milpa o quemado alcanza una edad sucesional igual a dos cambia su tipo de uso a selva.

5.2.2.2. Hogares

Este agente representa un hogar de tamaño promedio en OMYK (5 personas). Todos los hogares tienen una ubicación fija en un conjunto de cuadros al exterior de la reserva del lado sureste (esta es la ubicación aproximada de la comunidad de Punta Laguna). Cada hogar puede realizar las siguientes actividades económicas: agricultura, apicultura, producción de carbón y/o proveer servicios ecoturísticos. Las actividades que realiza cada hogar son dadas al principio de cada simulación y se mantienen constantes todo el tiempo. Los disturbios como los huracanes, los incendios y las fluctuaciones del turismo tienen un efecto en las distintas actividades económicas.

5.2.2.3. Monos

Este agente representa un mono araña. Los monos habitan y se mueven en los cuadros con edad sucesional mayor o igual 30. Éstos pueden nacer o morir dependiendo del estado de la población local a la que pertenecen.

5.2.2.4. Biomasa combustible

Este agente representa un agregado de biomasa que puede funcionar como combustible para iniciar un incendio, por ejemplo, ramas, troncos y hojas secas. La cantidad de biomasa que se crea en cada iteración está determinada por la velocidad del viento, por lo que durante los huracanes se acumula mayor cantidad de biomasa. Cada unidad de biomasa tiene un tiempo de duración, que representa el tiempo que tarda en descomponerse. Al alcanzar su tiempo de duración la biomasa desaparece. Mientras la biomasa combustible está presente puede provocar que se queme el cuadro donde se encuentra ubicada.

5.2.2.5. Población local de monos

Este meta-agente se utiliza para modelar la dinámica poblacional de los monos. Éste representa un conjunto de monos que habitan un mismo parche o vecindad (i.e., cuadros vecinos, es decir, que están en contacto por uno de sus 4 lados, y que comparten un mismo rango de edad sucesional). Las poblaciones locales crecen o disminuyen de acuerdo a una ecuación logística.

A continuación se explican los tres submodelos construidos mediante modelado de redes booleanas y se describe la dinámica que se obtiene de ellos.

5.2.3. Submodelos construidos mediante redes booleanas

El trabajo de López-Martínez (2017) se tomó como guía para la selección de los nodos del sistema, la definición de las funciones de regulación y la interpretación de las dinámicas

obtenidas. Además los nodos y las funciones de regulación del submodelo Clima y algunos nodos y funciones del submodelo Actividades hogares se tomaron de dicho trabajo.

En el Cuadro 5.1 se muestran los elementos o nodos que componen al sistema, la interpretación de los estados de cada uno y sus funciones de regulación. En la Figura 5.3 se muestra la red que se obtuvo a partir de las interacciones caracterizadas.

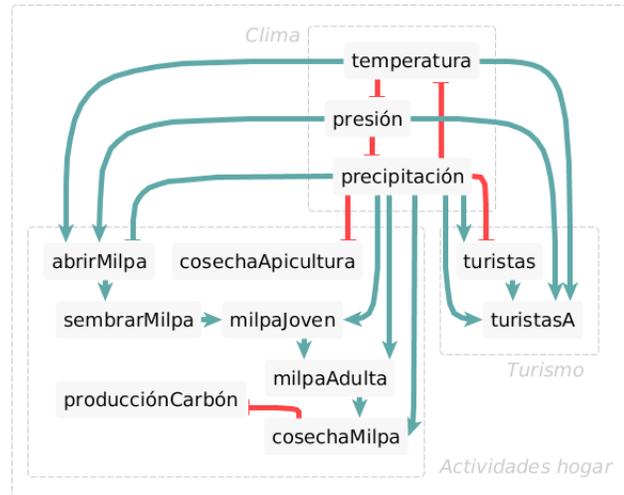


Figura 5.3: Gráfico de la red booleana. Los nodos representan elementos del sistema, las interacciones representan regulaciones positivas (azules) y negativas (rojas) y las líneas punteadas indican los grupos de nodos que forman cada submodelo.

5.2.3.1. Clima (Red booleana)

Con este submodelo se buscaba inducir una temporalidad al sistema. Por lo tanto, la dinámica que se obtiene de este submodelo es fundamental ya que determina la escala temporal de todo el modelo. El submodelo está conformado por tres elementos: *temperatura*, *presión* y *precipitación*. La descripción detallada de las funciones de regulación para los elementos de este submodelo se pueden consultar en López-Martínez (2017). Aquí se da una breve explicación para cada una.

En el modelo se supone que la ausencia de precipitación se debe a la ausencia de nubes que forman lluvia. Al no haber o haber pocas nubes de este tipo entonces hay poca cobertura nubosa, lo que provoca un aumento de la temperatura del aire. De manera análoga, una alta cobertura nubosa favorece una mayor reflexión de la radiación solar provocando un efecto de enfriamiento en la superficie terrestre. Por lo tanto, se supuso que habrá una temperatura promedio alta si hay una precipitación promedio baja y viceversa:

$$temperatura_{t+1} = \neg precipitación_t$$

La relación entre la temperatura del aire y la presión atmosférica es inversa. Al aumentar la temperatura del aire, éste tiende a subir en la columna de aire, generando una disminución de la presión atmosférica. Análogamente, al disminuir la temperatura del aire éste tiende a bajar en la columna de aire, generando un aumento en la presión atmosférica. Por lo tanto, se supuso que con una baja temperatura promedio del aire habrá una alta presión atmosférica y viceversa:

$$presión_{t+1} = \neg temperatura_t$$

Las bajas presiones atmosféricas en la superficie continental favorecen que los vientos húmedos del océano se adentren al continente. Estos vientos, al enfriarse, forman nubes y por lo tanto pueden provocar un aumento en la precipitación. De manera análoga, las temporadas con altas presiones atmosféricas están asociadas a temporadas de sequía. Por lo tanto, en el submodelo se supone que habrá una alta precipitación promedio cuando haya una baja presión atmosférica y viceversa:

$$precipitación_{t+1} = \neg presión_t$$

En la Figura 5.4 se muestran los atractores o estados estables que se obtienen de la interacción de los elementos de este submodelo. El segundo atractor es un atractor cíclico de periodo seis que genera una dinámica en la que el nodo precipitación permanece encendido durante tres estados consecutivos y permanece apagado durante otros tres estados consecutivos. Este comportamiento puede interpretarse como una dinámica climática anual con una temporada de lluvias y una temporada de secas. Este tipo de dinámica climática es característico de la región (Figura 5.5). Por lo tanto, se puede suponer que cada estado del segundo atractor representa un bimestre (el primer atractor se podría interpretar de manera similar como semestres, sin embargo, en este trabajo se buscaba una mayor resolución temporal). Esta dinámica bimestral que surge del submodelo permitirá ubicar a lo largo de un año distintos eventos.

5.2.3.2. Turistas (Red booleana)

Este submodelo busca representar el flujo de turistas al sitio y está formado por dos nodos, *turistas* y *turistasA*, que en conjunto buscan representar tres niveles de cantidad

Cuadro 5.1: Nodos definidos para la red booleana, interpretación para cada estado y función de regulación.

Submodelo	Nodo	Interpretación del nodo para cada estado	Función de regulación
Clima	<i>temperatura</i>	1: Alta temperatura promedio del aire 0: Baja temperatura promedio del aire	$temperatura_{t+1} = \neg precipitación_t$
	<i>presión</i>	1: Alta presión atmosférica promedio 0: Baja presión atmosférica promedio	$presión_{t+1} = \neg temperatura_t$
	<i>precipitación</i>	1: Alta precipitación promedio 0: Baja precipitación promedio	$precipitación_{t+1} = \neg presión_t$
	<i>turistas</i>	1: Llega un flujo bajo de turistas 0: No llegan turistas	$turistas_{t+1} = precipitación_t \vee \neg precipitación_t$
Turistas	<i>turistasA</i>	1: Llega un flujo alto de turistas 0: No llega un flujo alto de turistas	$turistas_{t+1} = turistas_t \wedge temperatura_t \wedge (presión_t \vee precipitación_t)$
	<i>abrirMilpa</i>	1: El hogar realiza la quema de la parcela 0: El hogar no realiza la quema de la parcela	$abrirMilpa_{t+1} = temperatura_t \wedge presión_t \wedge \neg precipitación_t$
Actividades	<i>sembrarMilpa</i>	1: El hogar trabaja en la siembra de su milpa 0: El hogar no trabaja en la siembra de su milpa	$sembrarMilpa_{t+1} = abrirMilpa_t$
	<i>milpaJoven</i>	1: Presencia de plantas cultivadas jóvenes en la milpa 0: Baja precipitación promedio	$milpaJoven_t = sembrarMilpa_t \wedge precipitación_t$
	<i>milpaAdulta</i>	1: Presencia de plantas cultivadas adultas en la milpa 0: Ausencia de plantas cultivadas adultas en la milpa	$milpaAdulta_{t+1} = milpaJoven_t \wedge precipitación_t$
	<i>cosechaMilpa</i>	1: El hogar trabaja en la cosecha de la milpa 0: El hogar no trabaja en la cosecha de la milpa	$cosechaMilpa_{t+1} = milpaAdulta_t \wedge precipitación_t$
	<i>cosechaApicultura</i>	1: El hogar trabaja en la cosecha de miel 0: El hogar no trabaja en la cosecha de miel	$cosechaApicultura_{t+1} = \neg precipitación_t$
	<i>producciónCarbón</i>	1: El hogar trabaja en la producción de carbón 0: El hogar no trabaja en la producción de carbón	$producciónCarbón_{t+1} = \neg cosechaMilpa_t$

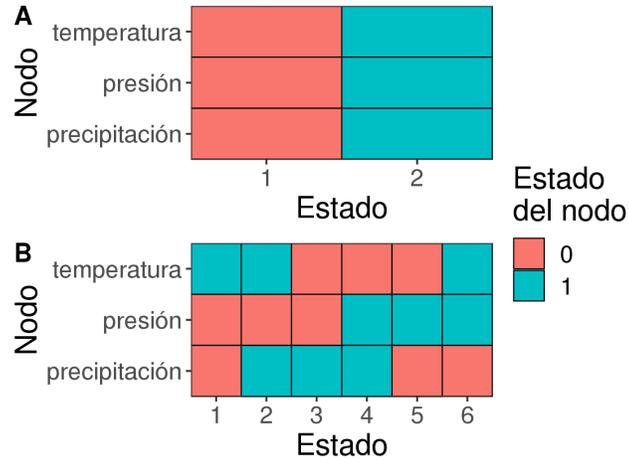


Figura 5.4: Atractores recuperados por el submodelo Clima. Las filas representan los nodos del sistema, las columnas representan los estados que comprenden al atractor y los colores representan los estados de cada nodo. A: Atractor cíclico de periodo dos. B: Atractor cíclico de periodo seis.

de turistas que llegan al sitio (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2: Niveles de flujo de turismo definidos para el submodelo turismo

Estado de los nodos		Interpretación
$turistas$	$turistasA$	
0	0	No llegan turistas
1	0	Llega un flujo bajo de turistas (temporada baja)
1	1	Llega un flujo alto de turistas (temporada alta)
0	1	Sin interpretación

El turismo en la región es una actividad con una marcada temporalidad a lo largo de año. En la Figura 5.6 se puede ver el el porcentaje promedio de ocupación hotelera mensual para el estado de Quintana Roo de 2000 a 2017. Se puede ver una alta ocupación hotelera en los meses de febrero, marzo, abril y julio (mayor a 75%), y una marcada reducción en los meses de septiembre y octubre. El número de visitantes en la reserva presenta un patrón de temporalidad similar. Por ejemplo, García-Frapolli y col. (2012) documentan patrones similares a los de la Figura 5.6 para el número total de turistas y el número de días al mes en que los hogares se dedican al ecoturismo y Rivera-Núñez (2014) reporta una temporalidad del turismo de cuatro meses de temporada alta y ocho de temporada baja.

En este submodelo se supuso que en cualquier temporada del año (en temporada de lluvias y en temporada de secas) es posible que llegue un flujo regular de turistas:

$$turistas_{t+1} = precipitación_t \vee \neg precipitación_t$$

Y también se supuso que existen cuatro meses (dos bimestres) de temporada alta, los cuales se fijaron en los bimestres marzo-abril y julio-agosto:

$$turistasA_{t+1} = turistas_t \wedge temperatura_t \wedge (presión_t \vee precipitación_t)$$

La dinámica que surge de estas funciones de regulación se muestra en la Figura 5.7. Nótese que con estas funciones de regulación el estado de flujo de turismo excepcionalmente

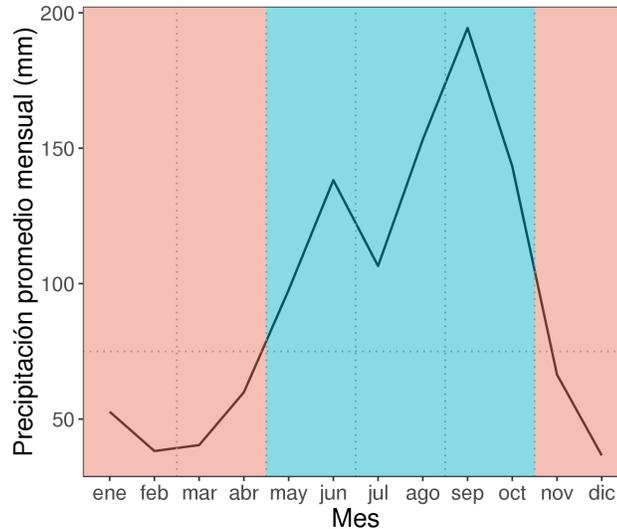


Figura 5.5: Precipitación promedio mensual en la región. La precipitación promedio mensual de la estación meteorológica de Coba, Quintana Roo, México (a 20 km de OMYK), muestra una marcada temporada de lluvias de mayo a octubre (azul) y una temporada de secas de noviembre a abril (rosa). Todos los meses de secas tienen una precipitación promedio menor a 75 mm (línea punteada horizontal). Nótese que si el año se divide en bimestres (líneas punteadas verticales) cada iteración del segundo atractor obtenido del submodelo Clima (Figura 5.4 B) se puede mapear a un bimestre. Datos tomados de SMN (2019).

bajo (ambos nodos en estado cero) nunca se alcanza. Sin embargo, este estado cobra relevancia al extenderse el submodelo al interactuar con otros submodelos (véase 5.2.5.3 Submodelo Turistas (Modelo basado en agentes)).

5.2.3.3. Actividades hogares (Red booleana)

Este submodelo busca representar la realización de algunas actividades económicas que desarrollan los hogares. Hasta hace poco la mayoría de los hogares de OMYK manejaban sus recursos siguiendo una EUM. La EUM en OMYK incluye un total de 13 diferentes actividades productivas, sin embargo, en este modelo solamente se consideraron cuatro: agricultura, apicultura, producción de carbón y provisión de servicios ecoturísticos. La provisión de servicios ecoturísticos está determinada por el flujo de turistas al sitio (véase 5.2.3.2 Turismo (Red booleana)).

Agricultura

La agricultura que se realiza en el sitio es de tipo milpa y se produce a través del proceso de roza-tumba y quema (García-Frapolli, 2006). Para representar la producción de milpa en este submodelo se utilizaron cinco nodos. Tres de los nodos representan actividades que realizan los hogares: *abrirMilpa*, *sembrarMilpa* y *cosechaMilpa*; y dos nodos representan estados de desarrollo de los cultivos que se siembran en la milpa: *milpaJoven* y *milpaAdulta*.

Para realizar la milpa en primer lugar el milpero selecciona un lugar que va a utilizar y corta la vegetación sobre el sitio. Esto ocurre generalmente al comienzo de la temporada seca, de noviembre a enero (Emerson, 1953). La vegetación se deja en el mismo sitio para que se seque y previo a la temporada de lluvias, en marzo o abril, la vegetación que se

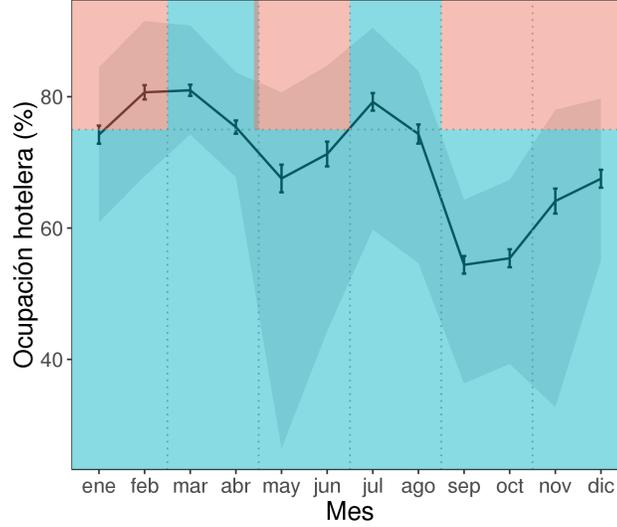


Figura 5.6: Promedio del porcentaje de ocupación hotelera a lo largo del año del estado de Quintana Roo, México de 1992 a 2017. Los intervalos indican el error estándar y el área sombreada sobre el promedio y debajo del promedio indican el máximo y el mínimo respectivamente. Nótese que hay cuatro meses (febrero, marzo, abril y julio) cuyo promedio de ocupación hotelera está sobre el 75 % (línea punteada horizontal). En azul y rosa se muestra la dinámica que se obtiene del submodelo Turismo de la red booleana (véase 5.2.4 Dinámica obtenida de los submodelos construidos mediante modelado de redes booleanas). La situación cuando tanto el nodo *turistas* como el nodo *turistasA* están activos puede representar los bimestres en los que el flujo de turistas es mayor al 75 % y el caso cuando solamente el nodo *turistas* está activo puede representar los bimestres en los que el flujo de turistas es menor a 75 %. Datos tomados de SECTUR (2019).

cortó es quemada (Emerson, 1953). En el modelo la quema para abrir la parcela se fijó en el segundo bimestre del año:

$$abrirMilpa_{t+1} = temperatura_t \wedge presión_t \wedge \neg precipitación_t$$

Al comienzo de la temporada de lluvias, después de la quema, se siembra la milpa (Emerson, 1953). Por lo que en el modelo se supuso que un bimestre después de la quema, en mayo-junio, se siembra la milpa:

$$sembrarMilpa_{t+1} = abrirMilpa_t$$

La cosecha puede empezar desde agosto (Ponce et al., 2012) y puede prolongarse hasta hasta febrero (Emerson, 1953). Para el modelo se supuso que los cultivos se tardan aproximadamente seis meses en desarrollarse y que transcurrido este tiempo son cosechados. Además se supuso que el único factor necesario para su crecimiento es la disponibilidad de agua por precipitación:

$$milpaJoven_t = sembrarMilpa_t \wedge precipitación_t$$

$$milpaAdulta_{t+1} = milpaJoven_t \wedge precipitación_t$$

$$cosechaMilpa_{t+1} = milpaAdulta_t \wedge precipitación_t$$

Apicultura

La producción anual de miel inicia al finalizar la época de lluvias, cuando florecen importantes plantas melíferas como *Bonamia brevipedicellata*, *Viguiera dentata* y *Gymnopodium floribundum* (Rico-Gray & Chemas, 1991). Es por ello que durante la época de secas, de noviembre a marzo, se obtienen la mejor miel (Rico-Gray & Chemas, 1991). En cambio, durante la época de lluvias florecen pocas especies melíferas, por lo que reduce considerablemente la disponibilidad de comida para las abejas y los apicultores las deben alimentar. La miel que se produce durante la época de lluvias, de mayo a septiembre, es considerada de baja calidad (Rico-Gray & Chemas, 1991). En el modelo a la producción de apicultura se representa con el nodo *cosechaApicultura*, y se supuso que la precipitación evitará que se obtengan buenas cosechas miel:

$$cosechaApicultura_{t+1} = \neg precipitación_t$$

Producción de carbón

La producción de carbón vegetal en OMYK se realiza de dos distintas maneras: la forma intensiva y la extensiva. La forma extensiva se realiza de manera complementaria a otras actividades y se realiza principalmente en los tiempos libres a las actividades de la milpa (García-Frapolli, 2006). La forma intensiva no se puede considerar como actividad complementaria ya que demanda una considerable mayor cantidad de trabajo (García-Frapolli, 2006). En el modelo se supuso que los hogares producen carbón de forma extensiva. Además se supuso que se puede producir carbón a lo largo de todo el año y que lo único que limita la producción es cuando se invierte mayor tiempo en otras actividades de la milpa. En particular, se supuso que la cosecha de la milpa, actividad que requiere una importante fuerza de trabajo (García-Frapolli, 2006; Manzón-Che, 2015), reducirá la producción o evitará que se pueda producir carbón:

$$producciónCarbón_{t+1} = \neg cosechaMilpa_t$$

5.2.4. Dinámica obtenida de los submodelos construidos mediante modelado de redes booleanas

En la Figura 5.7 se muestra el atractor recuperado por los subsistemas Clima, Turismo y Actividades hogares en conjunto (se recuperó otro atractor de periodo dos, que no tiene una interpretación y que corresponde a cuando se alcanza el primer atractor del subsistema Clima (Figura 5.4 A)). Cada uno de los estados (columnas en la Figura 5.7) que comprenden al atractor periódico se pueden interpretar como una “fotografía” de las condiciones aproximadas de lo que ocurre en el SES en un bimestre determinado. Por ejemplo, el segundo estado del atractor se puede interpretar de la siguiente manera: es un bimestre de temporada de secas (ya que el nodo *precipitación* está inactivo) en el cual llega un alto flujo de turistas (ya que están activos los nodos *turistas* y *turistasA*); durante este bimestre un hogar puede realizar la quema para preparar el terreno donde se hará la milpa (nodo *quemaMilpa* activo); y en este bimestre un hogar puede obtener buenas cosechas de la apicultura y producir carbón vegetal (nodos *cosechaApicultura* y *producciónCarbón* activos).

En la Figura 5.8 se muestra la distribución temporal de las actividades documentada

por García-Frapolli (2006). Nótese que la distribución temporal de las actividades recuperada por la red booleana es muy similar.

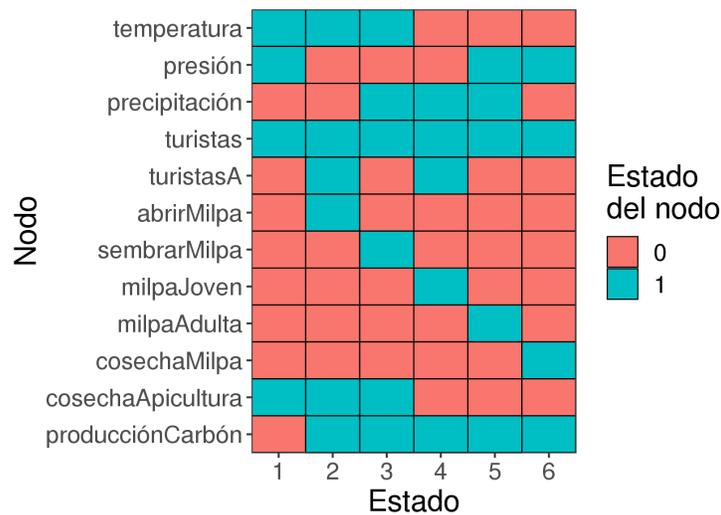


Figura 5.7: Atractor recuperado de los submodelos Clima, Turismo y Actividades hogar en conjunto. Las filas representan los nodos del sistema, las columnas representan los estados del atractor y los colores representan los estados de los nodos. Este es un atractor cíclico de periodo seis. Se recuperó otro atractor de periodo dos que corresponde a la dinámica cuando el subsistema Clima alcanza el atractor que se muestra en la Figura 5.4 A.

5.2.5. Submodelos del modelo basado en agentes

A continuación se explican los ocho submodelos del modelo basado en agentes en el orden en que son ejecutados. Nótese que el modelo de redes booleanas descrito en las secciones anteriores no tiene consideraciones espaciales. En contraste, el modelo basado en agentes permite una representación espacialmente explícita. Para integrar el modelo de redes booleanas con el modelo basado en agentes se les hicieron múltiples modificaciones a los tres submodelos construidos mediante redes booleanas. Es por ello que en esta subsección estos tres submodelos son considerados como submodelos del modelo basado en agentes y se vuelven a tratar para explicar como fueron extendidos y modificados.

5.2.5.1. Clima (Modelo basado en agentes)

En este submodelo se actualizan los nodos de la red booleana del submodelo Clima. A este submodelo no se le agregó ninguna modificación. Este proceso es el primero en realizarse ya que la dinámica que surge de este submodelo determina el significado temporal del modelo.

5.2.5.2. Tormentas

Los huracanes y las tormentas tropicales son fenómenos meteorológicos frecuentes en la región. Los fuertes vientos generados por los huracanes pueden provocar defoliación, rompimiento de ramas y troncos, desarraigamiento y destrucción de cultivos (Bonilla-Moheno, 2010; CONANP, 2006). Por lo tanto, después de estos eventos se genera una gran acumu-

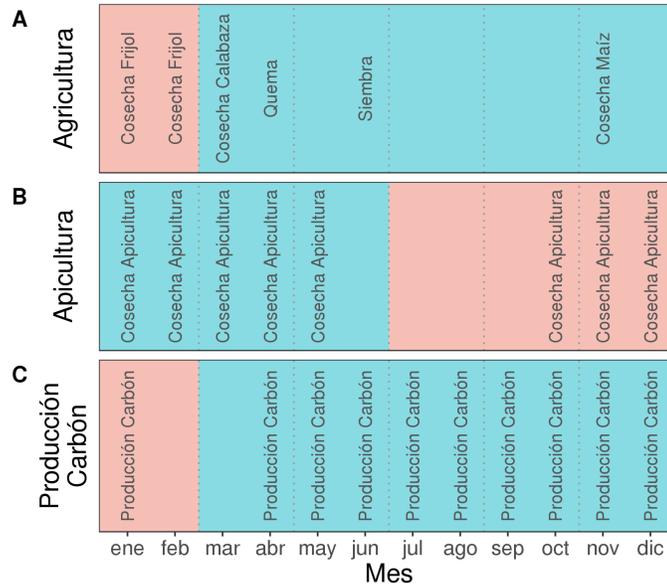


Figura 5.8: Distribución de las actividades realizadas a lo largo del año por los hogares que habitan OMYK. A: Actividades relacionadas a la agricultura. B: Actividades relacionadas a la apicultura. C: Actividades relacionadas a la producción de carbón. En azul se presentan los bimestres en los que los nodos que representan la actividad están activos en el atractor recuperado de la red booleana y en rosa cuando están inactivos (Figura 5.7). Basado en García-Frapolli (2006).

lación de materiales combustibles que pueden generar incendios en las estaciones de secas subsecuentes (CONANP, 2006).

En este submodelo, para simular la incidencia de tormentas tropicales y huracanes, se calcula la velocidad máxima del viento en un bimestre y en función de ésta se acumula biomasa combustible en cierto porcentaje de cuadros de tipo selva y milpa elegidos aleatoriamente.

Para este submodelo se supuso que la relación entre velocidad máxima del viento y proporción de cuadros que acumularán biomasa combustible sigue una función sigmoidea (Figura 5.9) de la siguiente forma:

$$C(v) = 100 \frac{1}{1 + e^{p_1(-v+p_2)}}$$

donde $C(v)$ es porcentaje de cuadros de selva o milpa afectados, v es velocidad máxima del viento en el bimestre, y p_1 y p_2 son parámetros que determinan la forma y la posición del punto de inflexión de la curva respectivamente. Los valores de p_1 y p_2 se eligieron mediante una calibración del modelo (véase 5.3.2 Calibración). La velocidad máxima de viento, v , puede tomar los valores que se muestran en el Cuadro 5.3. Para los huracanes y tormentas tropicales, estos valores corresponden a los valores mínimos en los que se consideran como tales de acuerdo con la escala de Saffir-Simpson (NOAA, 2019b). El valor del caso de cuando no ocurre tormenta se eligió arbitrariamente.

Para determinar qué eventos ocurren en cada bimestre, es decir, que valores toma la velocidad máxima del viento (v), se calcularon las probabilidades de incidencia para cada evento. Para calcular estos valores se utilizó la base de datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2019a). Esta base de datos contiene registros georeferenciados de tormentas tropicales y huracanes desde 1848. Para este trabajo se analizaron solamente los registros de 1916 hasta 2016. A estos registros se les trazó una

Cuadro 5.3: Valores de la velocidad de viento por tipo de evento.

Tipo de evento	Velocidad máxima del viento (mph)
No ocurre tormenta	10
Tormenta tropical	20
Huracán categoría 1	74
Huracán categoría 2	96
Huracán categoría 3	111
Huracán categoría 4	130
Huracán categoría 5	157

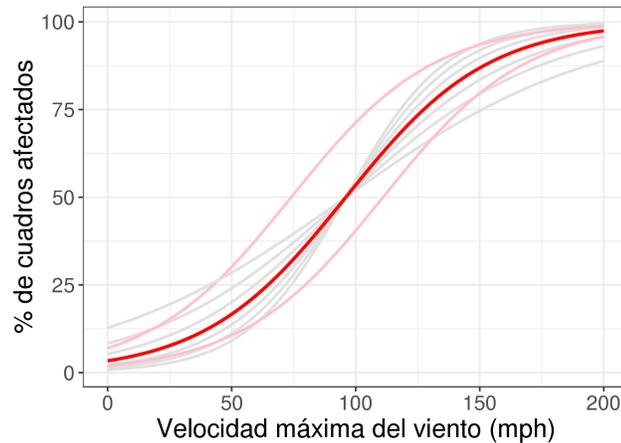


Figura 5.9: Función sigmoidea que relaciona la velocidad del viento con el porcentaje de cuadros afectados. La línea roja representa la función con los valores de los parámetros $p_1 = 0,035$ y $p_2 = 96$. El parámetro p_1 determina la forma de la curva (líneas grises, $p_1 = 0,05, 0,045, 0,04, 0,03, 0,025, 0,02$) y el parámetro p_2 determina la posición del punto de inflexión (líneas rosas, $p_2 = 74, 111$).

región de impacto o “buffer” de 100 km y se utilizaron únicamente los registros cuyo “buffer” intersectaba en algún punto el polígono del ANP. Después de aplicar este filtro se obtuvieron un total de 84 registros. Para evitar tener registros duplicados de una misma tormenta, se tomaron únicamente los registros con el máximo valor de velocidad de viento para una misma tormenta. Después de este proceso se obtuvieron un total de 36 registros, los cuales se clasificaron siguiendo la escala de Saffir-Simpson.

Las probabilidades de incidencia de cada tipo de evento se calcularon de la siguiente manera:

$$P_x = \frac{n_x}{B}$$

Donde P_x es la probabilidad de que ocurra un evento de tipo x en bimestre de lluvias, n_x es el número de bimestres de lluvias que registraron al menos un evento de tipo x , y B es el número total de bimestres de temporada de lluvias en el periodo analizado.

Para cada bimestre, en primer lugar, se acumula biomasa combustible en el porcentaje de cuadros correspondiente a cuando no ocurren tormentas (i.e., $C(10)$). Los cuadros que son afectados se seleccionan aleatoriamente con la única restricción de que sean de tipo milpa o de tipo selva. Estos cuadros crean una unidad de biomasa combustible sobre ellos y a ésta se le asigna un tiempo de duración a partir de una distribución normal. La desviación estándar de dicha distribución se fijó en tres y el valor de la media (media

duración de la biomasa combustible) se seleccionó mediante una calibración (véase 5.3.2 Calibración). Posteriormente, en caso de ser un bimestre de temporada de lluvias, pueden ocurrir tormentas tropicales y/o huracanes. Para determinar si ocurrirá un evento de tipo x se calcula un número aleatorio entre 0 y 1 y si éste es menor o igual a la probabilidad de que ocurra un evento tipo x entonces se crea nueva biomasa combustible en el porcentaje de cuadros correspondiente a dicho evento.

5.2.5.3. Turismo (Modelo basado en agentes)

En este submodelo, se actualizan los nodos del submodelo Turismo de la red booleana. A las funciones de regulación de la red booleana se le agregaron dos reglas más y un factor de aleatoriedad.

El flujo de turistas en la región, además de presentar una fuerte temporalidad, se ve afectado por perturbaciones naturales, como los huracanes (García-Frapolli et al., 2012). Generalmente, cuando hay huracanes se reduce significativamente el número de turistas en la península. Por lo tanto, se supuso que si en el bimestre ocurre un huracán de cualquier categoría entonces no llegarán turistas, es decir, en ese bimestre no se activarán los nodos *turistas* ni *turistasA*.

Otro factor que influye sobre el flujo de turistas son los monos araña ya que éstos son la principal atracción turística del sitio (García-Frapolli et al., 2013). Se supuso que si no hay una cantidad mínima de monos en un radio de 3 km de donde se ubican los hogares, entonces no llegan turistas (la cantidad mínima de monos necesaria se fijó en 15 y en el Análisis de sensibilidad se exploraron otros valores de este parámetro). Se eligió un radio de 3 km para simplificar la implementación, ya que ésta es la distancia máxima en la que los hogares suelen realizar actividades productivas; sin embargo, la zona donde se realizan las visitas guiadas para ver a los monos es a un radio menor a 3 km.

Además de estas modificaciones se agregó la posibilidad de que no se de un flujo alto de turistas al sitio a pesar de que se cumplan todas las condiciones. Esto buscaba representar el efecto de otro tipo de disturbios que tienen un importante efecto en el número de visitantes como las perturbaciones económicas o sociales. Por ejemplo, la crisis financiera de 2008 y la pandemia de gripe A (H1N1) del 2009 generaron una significativa disminución del flujo de turistas a la península de Yucatán (García-Frapolli et al., 2013). Así, en el modelo se supuso que si un valor aleatorio entre 0 y 1 es mayor al valor del parámetro "probabilidad de flujo alto de turistas" entonces no se activa el nodo *turistasA*. El efecto de este parámetro se exploró en el Análisis de sensibilidad.

5.2.5.4. Actividades hogares (Modelo basado en agentes)

En este submodelo se actualiza el estado de los elementos del submodelo Actividades hogares de la red booleana. A éste se le realizaron algunas modificaciones y extensiones.

Dado que la red booleana únicamente recupera la dinámica obtenida para un solo hogar, los nodos de la red del subsistema Actividades Hogares se multiplicaron por la cantidad de hogares que habita el sitio. Es decir, cada uno de los hogares posee sus propios nodos del submodelo Actividades hogares (Figura 5.10).

Para simular la producción de milpa en el paisaje, a los hogares que se dedican a la agricultura se les asignan 3 ha para producir su milpa (3 ha es el tamaño promedio de una milpa en OMYK (García-Frapolli et al., 2007)). Los cuadros que se utilizan para producir milpa deben cumplir con tres características: (1) tener una edad sucesional mayor o igual

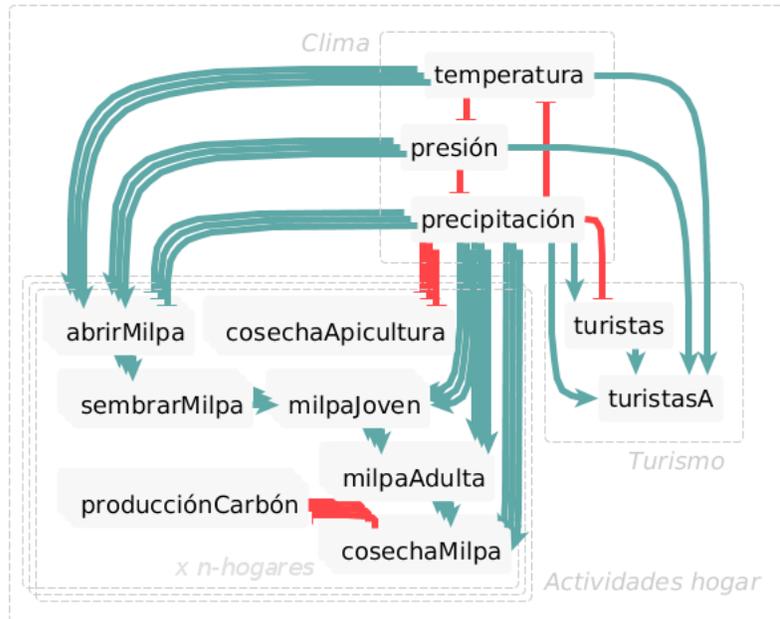


Figura 5.10: Multiplicación de nodos de submodelo Actividades hogares. Para representar a más de un hogar mediante la red booleana los nodos del submodelo Actividades Hogares se multiplicaron por el número de hogares en la simulación. Nótese que los nodos de los submodelos Turistas y Clima no se multiplicaron.

a 5 años, que es el periodo de tiempo mínimo que los hogares dejan descansar una parcela antes de volverla a utilizar (periodo de barbecho) (García-Frapolli et al., 2008); (2) tener una edad sucesional menor a 50, esta es una regla de manejo que la comunidad acordó para proteger el hábitat de los monos y que fue establecida antes de que se decretara el sitio como ANP (García-Frapolli et al., 2008); y (3) estar en un radio de 3 km de donde se encuentra ubicado el hogar, que es la distancia máxima en la que los hogares producen milpa (García-Frapolli et al., 2007). En caso de no haber cuadros con dichas características entonces el hogar no abre milpa, i.e., el nodo *abrirMilpa* no se activa. Cuando un cuadro es utilizado para producir milpa cambia su edad sucesional a cero, su tipo de uso a “milpa” y se consume la biomasa combustible acumulada sobre él. Un mismo cuadro es utilizado por un hogar durante dos años consecutivos, que es el tiempo que los habitantes de OMYK suelen utilizar una misma parcela (García-Frapolli et al., 2007). Una vez transcurrido este tiempo el cuadro es abandonado (cambia su tipo a “selva”) y el hogar busca un nuevo espacio para cultivar.

Para simular el efecto de los fenómenos climáticos y del espacio en las actividades económicas se agregaron algunas modificaciones a las funciones de regulación de la red booleana. En el caso de la agricultura, para simular el efecto de los huracanes, los cuales generalmente destrazan los cultivos (Rios-Beltrán, 2016), se supuso que si en un bimestre en el que ocurre un huracán de cualquier categoría cae biomasa combustible sobre la milpa de un hogar, entonces se dañan y se pierden los cultivos. Por lo cual, cuando estas condiciones ocurren los nodos *jovenMilpa*, *adultaMilpa*, *cosechaMilpa* del hogar afectado se apagan.

En el caso de la apicultura, a cada hogar se le asignó, independientemente del cuadro asignado para la producción de milpa, un cuadro en un radio de 3 km de distancia del

hogar en el cual se supuso coloca su apiario. De igual forma que en el caso de la milpa, se supuso que si ocurre un huracán de cualquier categoría y al cuadro donde el hogar colocó su apiario le cae biomasa combustible entonces se dañan las colmenas y no se obtienen cosechas de la apicultura, es decir, el nodo *cosechaApicultura* de ese hogar se apaga. Rios-Beltrán (2016) reporta que generalmente las cosechas de miel son muy bajas durante los dos años posteriores a los huracanes. Por lo tanto, en el modelo se supuso que si se dañan las colmenas de un hogar durante un huracán éste no obtendrá cosechas durante dos años, es decir, su nodo *cosechaApicultura* se mantendrá apagado durante los siguientes 12 bimestres.

En el caso de la producción de carbón se agregó la única restricción de que debe haber biomasa combustible en algún cuadro en un radio de 3 km de la ubicación del hogar. Por lo que en caso de haber biomasa combustible el hogar puede producir carbón, es decir, se puede activar su nodo *producciónCarbón*, y desaparece una unidad de biomasa combustible acumulada en alguno de los cuadros dentro de dicho radio.

5.2.5.5. Incendios

Los incendios son un fenómeno común en el sitio. Éstos suelen ser más frecuentes en las temporadas de secas posteriores a los huracanes ya que estos fenómenos meteorológicos generan la acumulación de grandes cantidades de materiales combustibles. Por ejemplo, en 1967 azotó en la península el huracán Behula y en la temporada de secas posterior ocurrió un incendio de grandes magnitudes que quemó gran parte de la selva que actualmente forma parte de la reserva (CONANP, 2006).

Para simular la incidencia de incendios en la reserva, este submodelo utiliza una adaptación del modelo de percolación de la biblioteca de modelos de NetLogo 6.0.4 (Wilensky, 2006). En el modelo un incendio sólo puede ocurrir en un bimestre si se cumplen las siguientes tres condiciones: (1) es temporada de secas, (2) hay al menos una unidad de biomasa combustible en algún cuadro del paisaje, y (3) se obtiene un valor aleatorio entre 0 y 1 menor o igual al valor de la “probabilidad de que ocurran incendios en temporada de secas”. Cuando se satisfacen estas condiciones se le pide a uno de los cuadros que tengan más biomasa combustible acumulada que se queme. Cuando un cuadro se quema se consume toda la biomasa combustible que tenga sobre él y cambia su tipo de uso a “quemado” y su edad sucesional a cero. Con cierta probabilidad (“probabilidad de cuadro de quemarse”) los cuatro cuadros vecinos que contengan biomasa combustible acumulada sobre ellos también se pueden quemar y repetir el proceso.

El valor del parámetro “probabilidad de un cuadro de quemarse” se obtuvo mediante la calibración del modelo (véase 5.3.2 Calibración). El valor del parámetro “probabilidad de que ocurran incendios en bimestre de secas” se estimó utilizando la base de datos de (CONABIO, 2019). Esta base de datos contiene registros georeferenciados de puntos de calor detectados con imágenes de satélite. Un punto de calor es cualquier fuente de calor que tiene una emisión lo suficientemente fuerte para ser detectada por el sensor del satélite y puede ser provocada por incendios, quemas agrícolas, volcanes activos, grandes chimeneas, etc. En este caso se supuso que todos los puntos de calor representan incendios y se utilizaron todos los registros dentro del polígono de OMYK desde 2000 hasta 2017. Se obtuvieron un total de 24 registros. La probabilidad de que ocurran incendios se calculó de la siguiente manera:

$$I = \frac{n}{B}$$

donde I es la probabilidad de que ocurran incendios en temporada de secas, n es el número de bimestres de temporada de secas que registraron al menos un incendio (para este análisis la temporada de secas se consideró de diciembre a mayo) y B es el número total de bimestres de secas en el periodo analizado.

5.2.5.6. Desplazamiento monos araña

Los monos araña en OMYK habitan principalmente la selva madura (selva con edad sucesional mayor a 50 años) ya que en este tipo de vegetación se encuentran las principales especies de su dieta como el árbol del ramón (*Brosimum alicastrum*). Sin embargo, los monos también suelen utilizar la selva con una edad sucesional de 30 a 50 años (Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003). Por lo tanto, en este submodelo se supuso que los monos solamente pueden ocupar cuadros de tipo selva con edad sucesional mayor o igual a 30.

Como primer paso en este submodelo, los monos que se encuentren sobre un cuadro con edad sucesional menor a 30 se mueven a uno de los cuadros con edad sucesional mayor o igual a 30 más cercanos (de esta manera los monos en cuadros de tipo quemado o milpa se mueven cuadros que si pueden habitar). En segundo lugar los monos que están sobre un cuadro que tienen algún cuadro vecino con edad sucesional mayor o igual a 30 pueden moverse. El desplazamiento de los monos se simuló mediante las probabilidades de permanencia de manera similar al modelo de (With & Crist, 1995). En el submodelo, si un mono se encuentra en un cuadro con edad sucesional mayor a 50 o en un cuadro de 30 a 50 años, con cierta probabilidad (“probabilidad de permanecer en selva mayor a 50” y “probabilidad de permanecer en selva de 30 a 50”, respectivamente) el mono permanece en el mismo cuadro. Cuando el mono no permanece en el mismo cuadro entonces se mueve a alguno de sus cuatro vecinos con edad sucesional mayor a 30 elegido aleatoriamente.

Las probabilidades de permanecer en cada tipo de selva se calculó de la siguiente forma:

$$P_x = \frac{n_x}{N}$$

donde P_x es la probabilidad de permanecer en selva de tipo x , n_x número de monos avistados en selva de tipo x de acuerdo a los datos de avistamiento de monos de 1998 reportados por Spaan (2017) y N es el número total de monos avistados.

Los dos últimos procesos en ocurrir en el modelo son la regeneración de la selva y la dinámica poblacional de los monos. A diferencia de los procesos previos que ocurren bimestralmente (cada iteración), estos dos últimos procesos ocurren anualmente (cada 6 iteraciones).

5.2.5.7. Regeneración de la selva

Para simplificar el modelo se supuso que la regeneración de la selva es determinista, es decir, la sucesión de la selva siempre llegará al mismo estado, y que el único factor que determina el estado sucesional de un cuadro es el tiempo.

En el modelo los cuadros de tipo selva, milpa y quemado aumentan año con año su edad sucesional. Los cuadros de tipo quemado y milpa con edad sucesional mayor a 2 cambian su tipo a selva. Los cuadros de tipo selva se clasificaron de acuerdo a su edad sucesional de la misma forma que García-Frapolli y col. (2007) y Rangel-Rivera (2017): selva de 2 a 15 años, selva de 16 a 29 años, selva de 30 a 50 años y selva mayor a 50 años.

5.2.5.8. Dinámica poblacional de los monos

Este submodelo simula el crecimiento poblacional de los monos araña. La construcción de este submodelo se basó en el submodelo “Animal meta-population dynamics” del modelo de Iwamura y col. (2014).

Lo primero que se realiza en este submodelo es calcular las vecindades o parches de vegetación. Una vecindad o parche es un conjunto de cuadros dentro del mismo rango de edad sucesional (selva de 30 a 50 años y selva mayor a 50 años) y que son vecinos (están en contacto por alguno de sus 4 lados). Luego se calcula el tamaño poblacional de cada vecindad, denotado N_t , utilizando el modelo logístico discreto:

$$N_t = N_{t-1} \left(1 + R \left(1 - \frac{N_{t-1}}{k} \right) \right)$$

donde N_{t-1} es la población en tiempo $t-1$, R es tasa intrínseca discreta de crecimiento discreta y k es la capacidad de carga. El valor del parámetro R se obtuvo de la literatura (se supuso que el valor de r_{max} del mono araña es igual al de su R). El valor de N_{t-1} se calcula contando al total de monos que están sobre una misma vecindad y el parámetro k de la vecindad n , denotado como k_n , se calcula de la siguiente manera:

$$k_n = D_{max} C_n$$

donde D_{max} es la densidad máxima de un cuadro y C_n es el número de cuadros que conforman la vecindad n . Para los valores de densidad máxima se utilizaron las densidades de 1998 estimadas con el método de Kelker reportadas por Spaan (2017).

Se ha sugerido que un alto flujo de turistas a la reserva puede tener importantes efectos en la población de monos. Por ejemplo, el ruido generado por el turismo y los recorridos dentro de la selva podría tener importantes efecto en sus hábitos de alimentación, afectar sus áreas de apareamiento y afectar su comportamiento social (García-Frapolli et al., 2007). Para simular este posible efecto, se supuso que la tasa intrínseca de crecimiento discreta (R) disminuye un sexto por cada bimestre del año que hay un flujo alto de turistas.

5.2.6. Variables de salida

El estado del SES modelado se evaluó con las siguientes tres variables:

- (1) Área de selva mayor a 50 años. Esta variable representa el área de selva con edad sucesional mayor a 50 años en hectáreas.
- (2) Número de monos. Esta variable representa a cantidad total de monos que hay en la reserva.
- (3) Valor monetario promedio. Esta variable representa el valor monetario promedio (en salarios mínimos diarios) que generan los hogares por las actividades económicas que realizan. Para calcular esta variable, cada bimestre se calcula el valor monetario que genera cada hogar de acuerdo con los valores del Cuadro 5.4. Por ejemplo, si en un bimestre un hogar obtiene cosechas de la milpa y de la apicultura y se dedica al ecoturismo y es temporada baja entonces genera un valor monetario equivalente a $3.89 + 0.73 + 1.31 = 5.93$ salarios mínimos al día. Es decir, el hogar gana en promedio 5.93 salarios mínimos al día durante dicho bimestre. Se supuso que aquellos hogares que no se dedican a producir milpa pero sí proveen servicios ecoturísticos están

especializados en el ecoturismo y como consecuencia obtienen mayores ingresos de éste. El valor monetario que genera cada hogar bimestralmente se va registrando y, al final de cada año, todos estos valores se promedian y este último valor es la variable que finalmente se reporta.

Cuadro 5.4: Valor monetario percibido por actividad. Estos valores se estimaron a partir de los datos reportados por (García-Frapolli, 2006; Rivera-Núñez, 2014). En el Apéndice 2 se muestran los cálculos que se realizaron para obtener estos valores.

Actividad	Valor monetario (salarios mínimos al día percibidos durante el bimestre)
Cosecha milpa	3.89
Cosecha apicultura	0.73
Producción de carbón	0.36
Turismo con milpa temporada baja	1.31
Turismo con milpa temporada alta	7.32
Turismo sin milpa temporada baja	2.09
Turismo sin milpa temporada alta	12.55

5.2.7. Estado inicial del modelo

Cuando el modelo se inicializa se crean 28 hogares, que es el número de hogares que hay en Punta Laguna, y se crea la cantidad máxima posible de monos que caben en cada vecindad habitable. A los cuadros de vegetación se les asignó la edad sucesional mínima del rango en que se encuentran. Por ejemplo, a todos los cuadros de selva con edad sucesional entre 30 y 50 se les asignó una edad sucesional de 30 años. También al inicializar el modelo se acumula la biomasa combustible equivalente a cuando no ocurre ninguna tormenta. Los valores asignados a los diversos parámetros del modelo son aquellos que se muestran en el Cuadro 5.5.

5.3. Calibración, análisis de sensibilidad y prueba de validación

5.3.1. Implementación y verificación

El modelo diseñado se implementó en NetLogo 6.0.4. El código de la implementación se encuentra disponible en: <https://github.com/b3m3bi/modelo-OMYK.git>

La verificación, también llamada validación interna, es el proceso en el que se determina si la implementación del modelo corresponde al modelo conceptual (Wilensky & Rand, 2015). En otras palabras, se revisa que la lógica del modelo conceptual (e.g., el modelo descrito anteriormente) esté correctamente representada en la implementación computacional del mismo (e.g., el programa escrito en NetLogo 6.0.4). La verificación de los modelos basados en agentes suele incluir el proceso de depuración y eliminación de errores (“debugging”) y algunas pruebas de verificación como las pruebas de incertidumbre (An et al., 2005). En este trabajo no se realizó ninguna prueba formal para la verificación del modelo; solamente se realizó un proceso continuo de depuración. Este proceso se realiza

desde que se inicia la construcción de la implementación hasta que ésta se finaliza. Por ello, se inició con un modelo muy sencillo y progresivamente se le fueron agregando nuevas características. El modelo se fue probando progresivamente mediante una inspección visual informal con cada nueva característica que se le fue agregando.

5.3.2. Calibración

La calibración es el proceso en el que los parámetros poco conocidos son ajustados para que los resultados del modelo concuerden mejor con datos empíricos (Xiang et al., 2005). En este modelo se realizó una calibración para ajustar cuatro parámetros desconocidos (para los que no se encontró información en la literatura) que están asociados a la acumulación de biomasa combustible y a la extensión de los incendios. Lo que se buscó en la calibración fue la combinación de estos cuatro parámetros que reprodujera mejor el total de área quemada dentro de la reserva observada en el periodo de 2003 a 2015 por Rangel-Rivera (2017). La calibración generalmente se realiza mediante algún tipo de algoritmo de optimización como los algoritmos genéticos (Ngo & See, 2012). Sin embargo, en este trabajo la calibración se realizó manualmente a través de una exploración sistemática del modelo.

Los parámetros que se calibraron fueron los siguientes:

- (1) Probabilidad de cuadro de quemarse. Este parámetro determina la probabilidad de que un cuadro con biomasa combustible acumulada se queme durante un incendio (véase 5.2.5.5 Incendios). Los valores explorados para este parámetro fueron 0.4, 0.5, 0.56, 0.6 y 0.7.
- (2) Parámetro 1 función sigmoidea. Este parámetro determina la forma de la curva de la función que relaciona la velocidad máxima del viento con el porcentaje de cuadros afectados (véase 5.2.5.2 Tormentas). Los valores explorados fueron: 0.05, 0.045, 0.040, 0.035, 0.030, 0.025 y 0.020.
- (3) Parámetro 2 función sigmoidea. Este parámetro determina la posición del punto de inflexión de la función que relaciona la velocidad máxima del viento con el porcentaje de cuadros afectados (véase 5.2.5.2 Tormentas). Este valor representa la velocidad máxima del viento en la que se afectará al 50 % de los cuadros de tipo selva y milpa. Los valores explorados fueron 74, 96 y 111. Estos valores corresponden a las velocidades del viento (en mph) de los huracanes categorías 1, 2 y 3, respectivamente.
- (4) Media de la duración de la biomasa combustible. Este valor representa la media de la distribución normal con la que se asigna la duración a la biomasa combustible cuando es creada (véase 5.2.5.2 Tormentas). Los valores explorados fueron: 6, 9 y 12 bimestres.

Se exploraron todas las posibles combinaciones de los valores seleccionados para cada parámetro. Cada tratamiento se corrió 100 veces. Cada simulación se corrió durante lo equivalente a 12 años (de 2003 a 2015) y en todas las simulaciones todos los hogares no podían producir milpa, ya que la producción de milpa tradicional dentro de la reserva se imposibilitó con la prohibición de uso de fuego en 2006.

Para seleccionar la combinación de parámetros que mejor reprodujera los datos empíricos se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

- (1) Que el área total quemada observada por Rangel-Rivera (2017) para el periodo de 2003 a 2015, 667.2 ha, se encontrara dentro el rango intercuartílico de los resultados

del modelo (i.e., que el área quemada observada se ubicara dentro de la caja en las gráficas de caja y bigotes).

- (2) Que la dispersión de los resultados de la simulación fuera la menor posible (i.e., que la caja sea lo más pequeña posible, o en otras palabras, que el rango intercuartílico fuera lo menor posible).
- (3) Que la probabilidad de quemarse fuera lo más baja posible. Esto se hizo con el propósito de evitar los incendios de gran extensión (que abarcan casi toda la reserva) que se dan en simulaciones con un mayor rango de tiempo cuando el valor de este parámetro es muy alto.
- (4) Que el porcentaje de cuadros afectados cuando no ocurre tormenta sea el más bajo posible (véase 5.2.5.2 Tormentas). Esto se hizo con el propósito de que el submodelo Incendios no fuera totalmente independiente del submodelo Tormentas, ya que cuando se afecta un alto porcentaje de cuadros entonces cerca del 100 % de éstos mantienen biomasa combustible acumulada por lo que la extensión de los incendios depende únicamente de la probabilidad de quemarse y no de la presencia o ausencia de biomasa.

Estos criterios de selección se aplicaron jerárquicamente en el orden en que aquí se presentan. Es decir, primero se aplicó un filtro impuesto por el criterio 1, posteriormente el 2 y así sucesivamente.

5.3.3. Análisis de sensibilidad

Unas de las principales propiedades de los sistemas complejos es su comportamiento no lineal y su incertidumbre. Estas propiedades pueden generar que pequeños cambios en algunos parámetros de un sistema tengan consecuencias drásticas en su estado, mientras que cambios en otros parámetros pueden tener muy poco efecto (Schouten et al., 2014). Los análisis de sensibilidad son una colección de herramientas y métodos que se utilizan para investigar qué tan sensibles son las salidas de algún modelo a cambios en sus diferentes parámetros (Chattoe et al., 2000). Los análisis de sensibilidad generalmente se consideran una parte fundamental de la verificación de un modelo.

En este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad sobre ocho parámetros, cuyo valor era desconocido. Se utilizó el método de “uno a la vez”. Este es uno de los métodos más sencillos para hacer análisis de sensibilidad y consiste en variar un parámetro a la vez mientras los otros permanecen fijos (Hamby, 1994). A este método también se le ha llamado análisis de sensibilidad local ya que solamente evalúa la sensibilidad relativa a los valores que se elige fijar y no de todas las combinaciones posibles de parámetros (Hamby, 1994).

Los parámetros que se analizaron y sus valores explorados fueron:

- (1) Tamaño de cuadro: 1 ha y 3 ha.
- (2) Parámetro 1 función sigmoidea: 0.05, 0.045, 0.04, 0.035, 0.03, 0.025, 0.02, 0.015 y 0.01.
- (3) Parámetro 2 función sigmoidea: 74, 96, 111 y 130.
- (4) Probabilidad de cuadro de quemarse: 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.56, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1.

- (5) Media duración de biomasa combustible: 6, 9, 12 y 15.
- (6) Desviación estándar de duración biomasa combustible: 1, 3, 6, 9, 12.
- (7) Probabilidad flujo alto de turistas: 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 y 1.
- (8) Número de monos para que lleguen turistas: 10, 15, 20, 25, 30 y 35.

Se corrieron 30 simulaciones para cada posible valor de los parámetros. Las simulaciones se corrieron por un tiempo equivalente a 200 años. Se eligió este periodo de tiempo ya que se buscaba que las variables se estabilizaran. Mientras se exploraba un parámetro, los otros se fijaron a los valores que se muestran en el Cuadro 5.5. En estas simulaciones todos los hogares realizaban las cuatro actividades económicas.

5.3.4. Prueba de validación

La validación, o verificación externa, es el proceso en el que se determina si el modelo conceptual es una representación razonablemente precisa de la realidad (Xiang et al., 2005). Ésta generalmente se realiza comparando los resultados que arroja el modelo con datos empíricos.

El modelo se validó comparando los resultados de un conjunto de simulaciones del modelo con datos obtenidos en estudios empíricos por Rangel-Rivera (2017) y Spaan (2017). Para ello se realizaron 100 simulaciones con una duración equivalente a 12 años (2003 a 2015) en las que los hogares no producían milpa. Los parámetros se fijaron en los valores que se muestran en el Cuadro 5.5. Los valores de los parámetros para los que no se encontró información en la literatura ni se calibraron se fijaron en valores que hicieran más eficientes y rápidas las simulaciones (en el caso del tamaño de cuadro) y en valores arbitrarios que no tuvieran un efecto notable en las variables de salida de acuerdo a los resultados de la prueba de sensibilidad (en el caso de la desviación estándar de la duración de la biomasa combustible, la probabilidad de flujo alto de turistas y el número de monos para un flujo alto de turistas).

Se compararon los resultados del modelo para el área de selva menor a 15 años, área de selva de 16 a 29 años, área de selva de 30 a 50 años y área de selva selva mayor a 50 años con la información reportada por Rangel-Rivera (2017). También se comparó el número total de monos obtenidos en las simulaciones con el número total de monos en la reserva estimado a partir de las densidades reportadas para 2015 por Spaan (2017). Para realizar esta estimación se multiplicó el área de cada tipo de selva reportada por Rangel-Rivera (2017) por las densidades de monos para cada tipo de selva reportadas por Spaan (2017).

Cuadro 5.5: Parámetros del modelo

Submodelo	Parámetro	Valor	Fuente
Actividades hogar	Número de hogares	28 hogares	Rivera-Núñez (2014)
	Tiempo uso misma parcela	2 años	García-Frapolli y col. (2007)
	Radio máximo de actividades	3 km	García-Frapolli y col. (2007)
	Periodo mínimo de barbecho	5 años	García-Frapolli y col. (2008)
	Área de cultivo	3 ha	García-Frapolli y col. (2007)
Incendios	Probabilidad de cuadro de quemarse	0.5	Estimado en Calibración / Análisis de sensibilidad
	Probabilidad de que ocurran incendios	0.093	Estimado a partir de CONABIO (2019)
Tormentas	Probabilidad de que ocurra una tormenta tropical	0.083	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Probabilidad de que ocurra un huracán categoría 1	0.010	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Probabilidad de que ocurra un huracán categoría 2	0.007	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Probabilidad de que ocurra un huracán categoría 3	0.010	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Probabilidad de que ocurra un huracán categoría 4	0.007	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Probabilidad de que ocurra un huracán categoría 5	0.000	Estimado a partir de NOAA (2019a)
	Parámetro 1 función sigmoidea (forma de curva)	0.025	Estimado en Calibración / Análisis de sensibilidad
	Parámetro 2 función sigmoidea (punto de inflexión)	74	Estimado en Calibración / Análisis de sensibilidad
	Media duración biomasa combustible	12 bimestres	Estimado en Calibración / Análisis de sensibilidad
	Desviación estándar biomasa combustible	3	Análisis de sensibilidad
Turistas	Probabilidad de flujo alto de turistas al bimestre	0.7	Análisis de sensibilidad
	Número mínimo de monos para que llegue turismo	15 monos	Análisis de sensibilidad
Movimiento monos	Probabilidad de quedarse en selva de 30 a 50 años	0.19	Estimado a partir de Spaan (2017)
	Probabilidad de quedarse en selva mayor a 50 años	0.81	Estimado a partir de Spaan (2017)
Dinámica poblacional monos	Tasa intrínseca de crecimiento discreta (R)	0.10	Robinson y Redford (1986), Ross (1988)
	Densidad máxima de monos en selva de 30 a 50 años	$5.70 \frac{ind}{km^2}$	Spaan (2017)
	Densidad máxima de monos en selva mayor a 50 años	$38.20 \frac{ind}{km^2}$	Spaan (2017)

5.4. Simulación de escenarios

Para evaluar el efecto de distintas estrategias de manejo en el SES se simularon distintos escenarios. Los escenarios explorados corresponden a distintas combinaciones de las cuatro actividades económicas que pueden realizar los hogares que se consideraron en el modelo. Para simplificar la exploración solamente se simularon escenarios en los que todos los hogares realizan el mismo conjunto de actividades. Por lo tanto, se simularon un total de 16 escenarios. Estos se clasificaron basados en la caracterización de las estrategias de manejo en OMYK identificadas por García-Frapolli y col. (2007), García-Frapolli y col. (2008) (Cuadro 5.6):

- (1) Estrategia Tradicional. La principal actividad de los hogares con esta estrategia es la agricultura. Se incluyeron dentro de esta estrategia las combinaciones en las que los hogares se dedicaban a la agricultura pero no al ecoturismo.
- (2) Estrategia Mixta. Los hogares con esta estrategia se dedican tanto a la agricultura como a la prestación de servicios. Se incluyeron en de esta estrategia a las combinaciones en las que los hogares se dedicaban tanto a la agricultura como al ecoturismo.
- (3) Estrategia Orientada a Servicios. La principal actividad de los hogares con esta estrategia es la prestación de servicios con un mínimo trabajo en la milpa. Se incluyeron en esta estrategia las combinaciones en las que los hogares se dedicaban al ecoturismo pero no a la agricultura.
- (4) Otra Estrategia. En esta estrategia se incluyeron todas las combinaciones que no cumplían las condiciones de las estrategias anteriores, es decir, en las que los hogares no realizaban ni agricultura ni ecoturismo.

Cada escenario se corrió 100 veces durante lo equivalente a 50 años y los parámetros se fijaron en los valores que se muestran en el Cuadro 5.5.

Para explorar para explorar el efecto que tienen las distintas estrategias de manejo en la resiliencia del SES ante algunos disturbios, se simularon los siguientes escenarios:

- (1) Incremento de tormentas y huracanes: los valores de los parámetros correspondientes a las probabilidades de que ocurran tormentas y huracanes se multiplicaron arbitrariamente por tres.
- (2) Incremento de los incendios: el valor de la probabilidad de que ocurran incendios se multiplicó arbitrariamente por tres.
- (3) Disminución del turismo: el valor de la probabilidad de flujo alto de turistas se fijó arbitrariamente en 0.3.

Para cada tratamiento se corrieron 30 simulaciones durante lo equivalente a 50 años con todas las posibles combinaciones de actividades, las cuales se clasificaron por estrategia como se muestra en el Cuadro 5.6.

Cuadro 5.6: Escenarios de manejo explorados y su clasificación.

Combinación de actividades	Estrategia
- - - -	Otra
- - - T	Orientada a servicios
- - C -	Otra
- - C T	Orientada a servicios
- A - -	Otra
- A - T	Orientada a servicios
- A C -	Otra
- A C T	Orientada a servicios
M - - -	Tradicional
M - - T	Mixta
M - C -	Tradicional
M - C T	Mixta
M A - -	Tradicional
M A - T	Mixta
M A C -	Tradicional
M A C T	Mixta

M: agricultura (milpa)

A: apicultura

C: producción de carbón

T: provisión de servicios ecoturísticos

6. Resultados

6.1. Calibración

Se exploraron un total de 315 escenarios distintos (Figura 6.1) que corresponden a todas las posibles combinaciones de los valores elegidos para los cuatro parámetros calibrados (véase 5.3.2 Calibración). Se obtuvieron 26 combinaciones para las que el área total quemada observada de 2003 a 2015 por Rangel-Rivera (2017) (667.2 ha) se encontró dentro del rango intercuartílico (criterio de selección 1). En el Cuadro 6.1, se muestran las 10 combinaciones de parámetros que presentaron una menor dispersión o un menor rango intercuartílico (criterio de selección 2). De estas 10 combinaciones la número 5 y la número 7 son las que tienen el valor más bajo de probabilidad de quemarse (criterio de selección 3). De estas dos combinaciones se seleccionó la número 7, dado que es la tiene el valor más bajo de porcentaje de cuadros afectados en caso de no ocurrir una tormenta (criterio de selección 4). Todos los análisis posteriores se realizaron fijando los valores de estos cuatro parámetros en los valores seleccionados.

Cuadro 6.1: Combinaciones de parámetros calibrados que presentaron una menor dispersión. p_1 y p_2 : parámetro función sigmoidea 1 y 2; P_{qm} : probabilidad de cuadros de quemarse; \bar{x}_{dr} : media duración de la biomasa combustible; Me : media (ha); $Q1$ y $Q3$: cuantiles 1 y 3; R_{int} : rango intercuartílico; $\%_{af}$: porcentaje de cuadros afectados cuando no hay tormenta

	Parámetros				Me	$Q1$	$Q3$	R_{int}	$\%_{af}$
	p_1	p_2	P_{qm}	\bar{x}_{dr}					
1	0.02	96	0.56	9	276	126	687	561	15.19
2	0.02	74	0.56	6	391.5	149.25	716.25	567	21.76
3	0.025	96	0.6	12	333	105.75	703.5	597.75	10.43
4	0.02	96	0.7	6	307.5	133.5	778.5	645	15.19
5	0.02	74	0.5	9	465	198.75	892.5	693.75	21.76
6	0.03	74	0.56	12	349.5	62.25	847.5	785.25	12.79
7*	0.025	74	0.5	12	466.5	148.5	956.25	807.75	16.80
8	0.03	96	0.7	12	210	47.25	885.75	838.5	7.04
9	0.025	96	0.7	9	343.5	106.5	959.25	852.75	10.43
10	0.02	111	0.7	9	646.5	230.25	1225.5	995.25	11.71

*Combinación de parámetros elegida

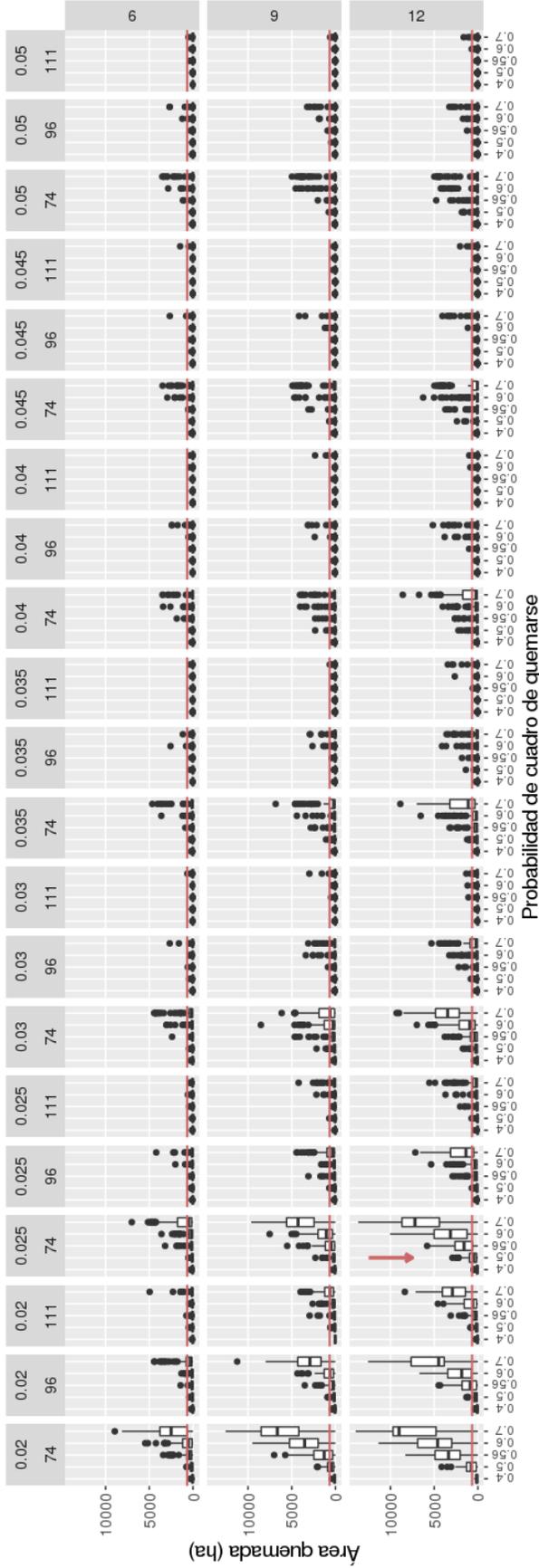


Figura 6.1: Calibración de cuatro parámetros con valores desconocidos. Cada columna de gráficas representa una combinación de valores de los dos parámetros que controlan la forma de la función sigmoidea (parámetro función sigmoidea 1 y parámetro función sigmoidea 2). Las fila de gráficas representan diferentes valores de la media de la duración de la biomasa combustible. Cada columna de cada gráfica representa un valor distinto de la probabilidad de los cuadros de quemarse. La línea roja está ubicada en 667.2 ha que fue el área total quemada observada de 2003 a 2005 por Rangel-Rivera (2017) y era el valor que se buscaba reproducir. Se señala con una flecha la combinación de valores que se eligió (ver Cuadro 6.1).

6.2. Análisis de sensibilidad

En las simulaciones se observaron los siguientes patrones de comportamiento para las variables de salida:

- (1) Área de selva mayor a 50 años. En la mayoría de las simulaciones esta variable presenta tres eventos de crecimiento notable que son resultado de las condiciones iniciales del modelo y de las categorías de edad tan amplias que se utilizaron para clasificar la selva. El primer evento corresponde a los 21 años, cuando los cuadros que iniciaron en la categoría de 30 a 50 (edad sucesional inicial de 30 años) alcanzan la categoría de selva mayor a 50 años. El segundo corresponde a los 35 años, cuando los cuadros que iniciaron en la categoría de 16 a 29 (edad sucesional inicial de 16 años) alcanzan la categoría de selva madura. Y el tercer evento corresponde a los 50 años, cuando los cuadros que iniciaron en la categoría de 2 a 15 (edad sucesional inicial de 2 años) alcanzan la categoría de selva madura. Después de estos tres eventos la variable alcanza cierta estabilidad.
- (2) Número de monos. En la mayoría de los casos esta variable presenta una ligera disminución hasta aproximadamente los 21 años. Posteriormente la variable crece gradualmente hasta alcanzar cierta estabilidad. La variable presenta el comportamiento característico de una función logística.
- (3) Valor monetario promedio. En la mayoría de los casos esta variable se estabiliza desde el inicio y se mantiene oscilando al rededor de ciertos valores de equilibrio a lo largo de toda la simulación. En otros casos los valores de equilibrio disminuyen gradualmente en cierto punto del tiempo hasta alcanzar un equilibrio en un valor menor.

Los valores en equilibrio de algunas variables de salida resultaron muy sensibles a la modificación de ciertos parámetros. El área de selva mayor a 50 años y el tamaño de la población de monos fueron sensibles a los parámetros de la función sigmoidea 1 y 2, la probabilidad de los cuadros de quemarse, la media de la duración de la biomasa combustible y al tamaño del cuadro. Por otro lado, el valor monetario promedio de las actividades de los hogares fue sensible al tamaño de cuadro, la probabilidad de los cuadros de quemarse, la probabilidad de flujo alto de turistas y a la cantidad de monos necesarios para que lleguen turistas. A continuación se describen las observaciones para cada uno de los parámetros analizados.

Las tres variables de salida fueron sensibles al tamaño del cuadro (Figura 6.2). Los valores de equilibrio del área de selva madura y del número de monos fueron mayores para el tamaño de cuadro de 1 ha que para el tamaño de 3ha. En el caso del valor monetario promedio el valor en equilibrio alcanzado con un tamaño de cuadro de 3 ha fue menor a largo plazo que el de 1 ha.

En el caso del parámetro 1 de la función sigmoidea, conforme su valor se hace más pequeño el valor en equilibrio del área de selva mayor a 50 años y el tamaño de la población de monos disminuyen (Figura 6.3). En los casos en que el valor de dicho parámetro es muy bajo (0.01 y 0.015) el valor monetario promedio también disminuye.

A medida que el valor del parámetro 2 de la función sigmoidea se hace más pequeño el valor en equilibrio del área de selva madura y la población de monos es menor (Figura 6.4). Sin embargo, la disminución no es proporcional, ya que se ve una abrupta disminución

cuando el parámetro es igual a 74. El valor monetario promedio no fue sensible a este parámetro.

Las tres variables de salida fueron muy sensibles a la probabilidad de los cuadros de quemarse (Figura 6.5). Hay un notable umbral cuando la probabilidad de quemarse vale 0.5. Cuando la probabilidad de quemarse es mayor o igual a 0.56 los valores de equilibrio de las tres variables de salida disminuyen, mientras que cuando es menor o igual a 0.5 crecen. Los valores de equilibrio para el área de selva madura y el tamaño de la población de monos convergieron a los mismos valores cuando la probabilidad de quemarse fue menor a 0.4. De igual manera, el área de selva madura y el número de monos convergieron al mismo valor de equilibrio para las probabilidades de quemarse mayores a 0.56.

El área de selva madura y el tamaño de la población de monos fueron sensibles a la media de la duración de la biomasa combustible (Figura 6.6). Conforme la media de la duración de la biomasa combustible aumentó, los valores en equilibrio de la selva madura y del número de monos disminuyeron. El valor monetario promedio no fue sensible a este parámetro.

En el caso de la probabilidad del flujo alto de turistas, solamente el valor monetario promedio fue sensible (Figura 6.7). A medida que este valor disminuye, el valor monetario promedio también disminuye.

El valor monetario promedio fue la única variable de salida sensible al número mínimo de monos necesarios para que llegue un flujo alto de turistas (Figura 6.8). Cuando el número mínimo de monos necesarios para que lleguen turistas fue mayor a 20, el valor en equilibrio del valor monetario promedio se redujo.

Las variables de salida no fueron sensibles a la desviación estándar de la duración de la biomasa combustible (Figura 6.9).

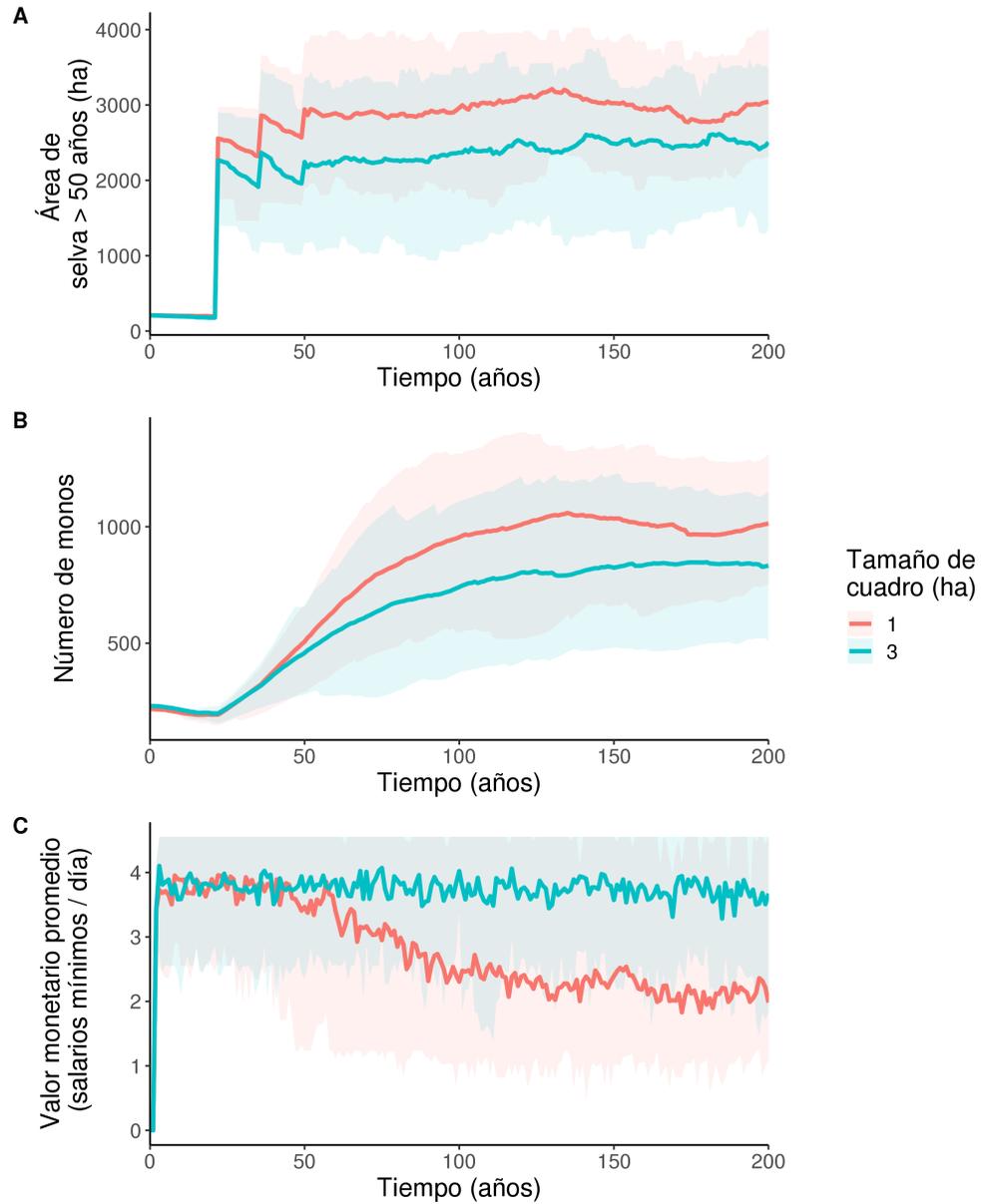


Figura 6.2: Análisis de sensibilidad del tamaño del cuadro. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

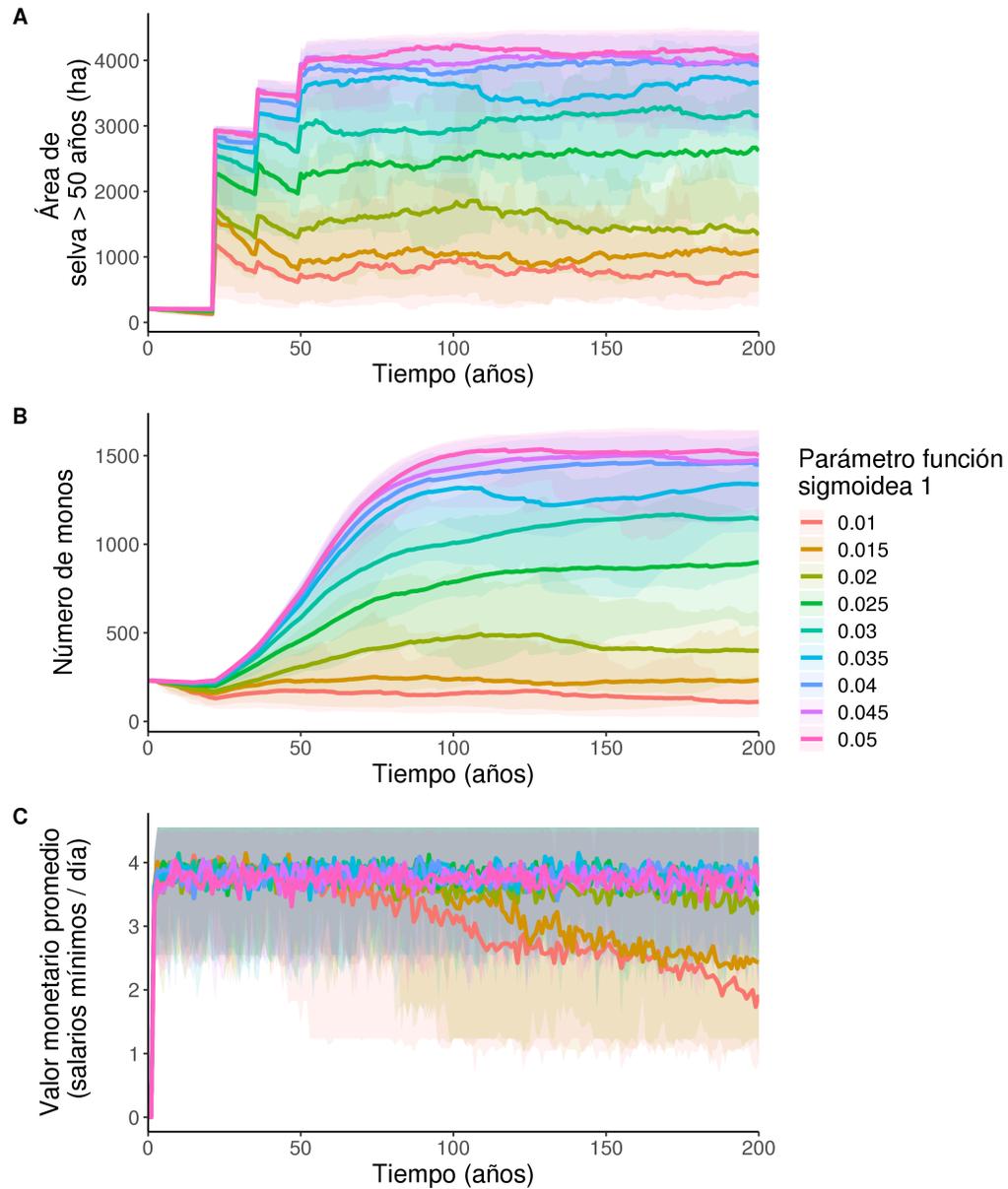


Figura 6.3: Análisis de sensibilidad del parámetro 1 de la función sigmoidea (forma de la curva). A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

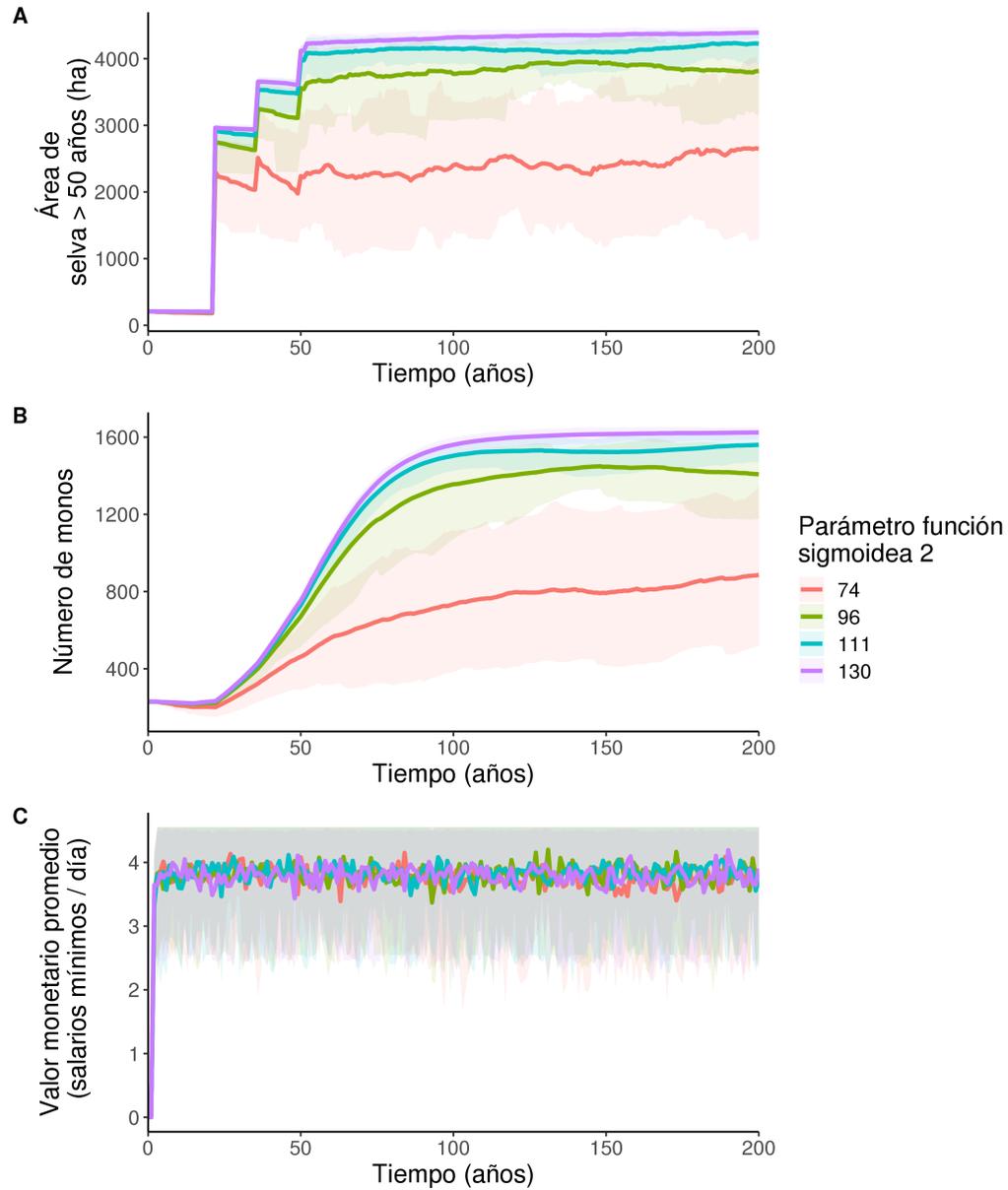


Figura 6.4: Análisis de sensibilidad del parámetro 2 de la función sigmoidea (posición del punto de inflexión). A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de mones. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

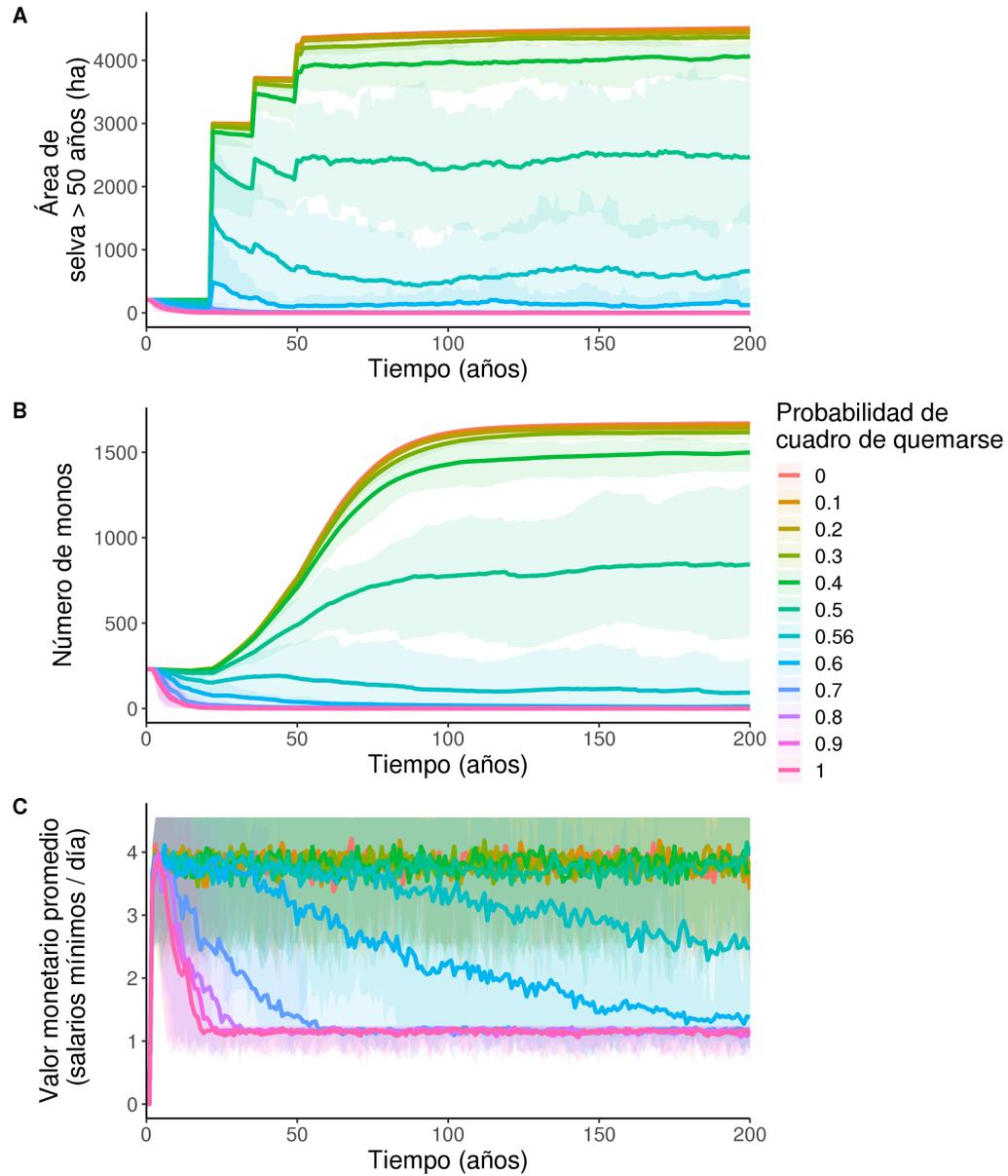


Figura 6.5: Análisis de sensibilidad de la probabilidad de los cuadros de quemarse. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

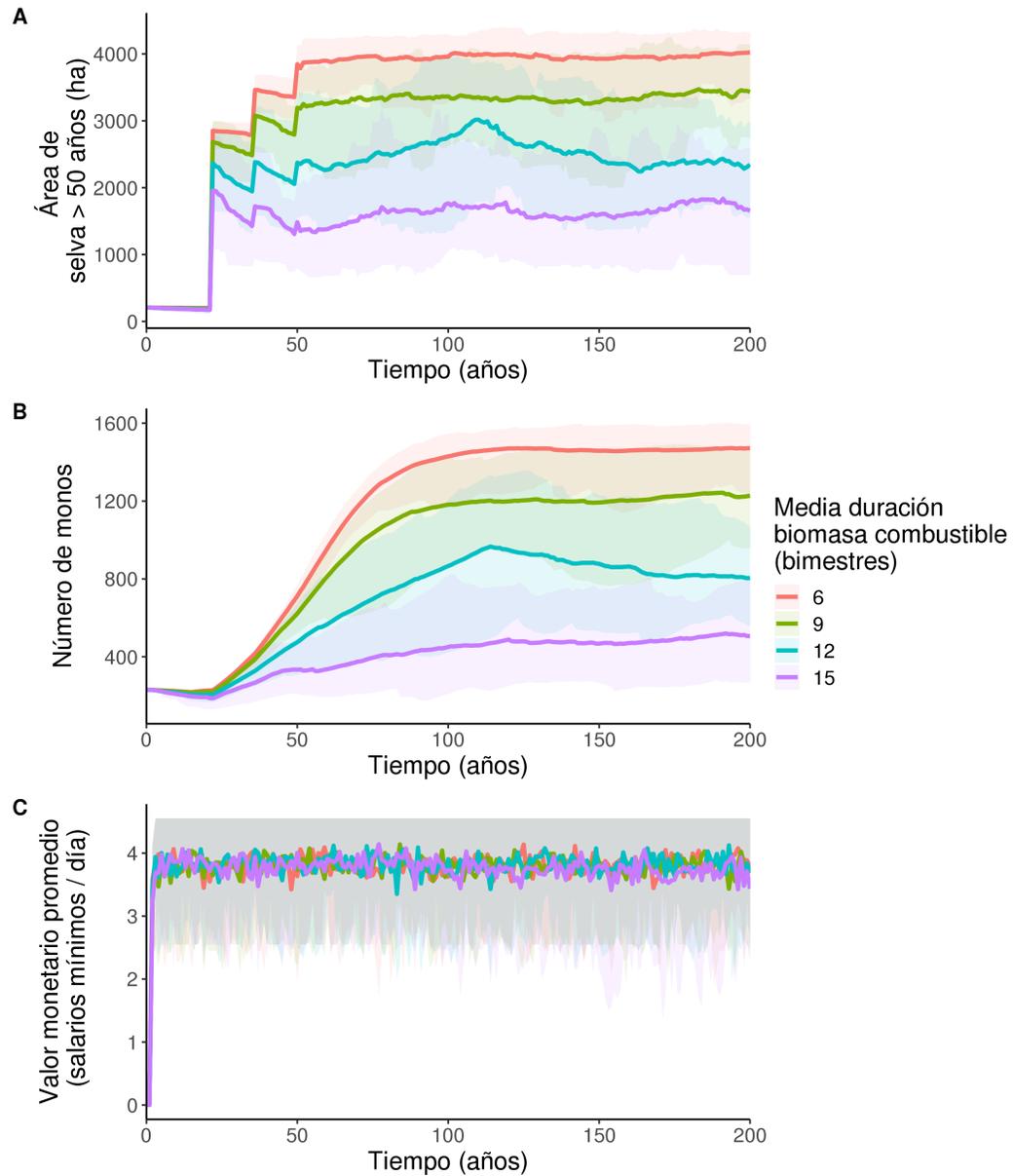


Figura 6.6: Análisis de sensibilidad de la media de la duración de la biomasa combustible. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

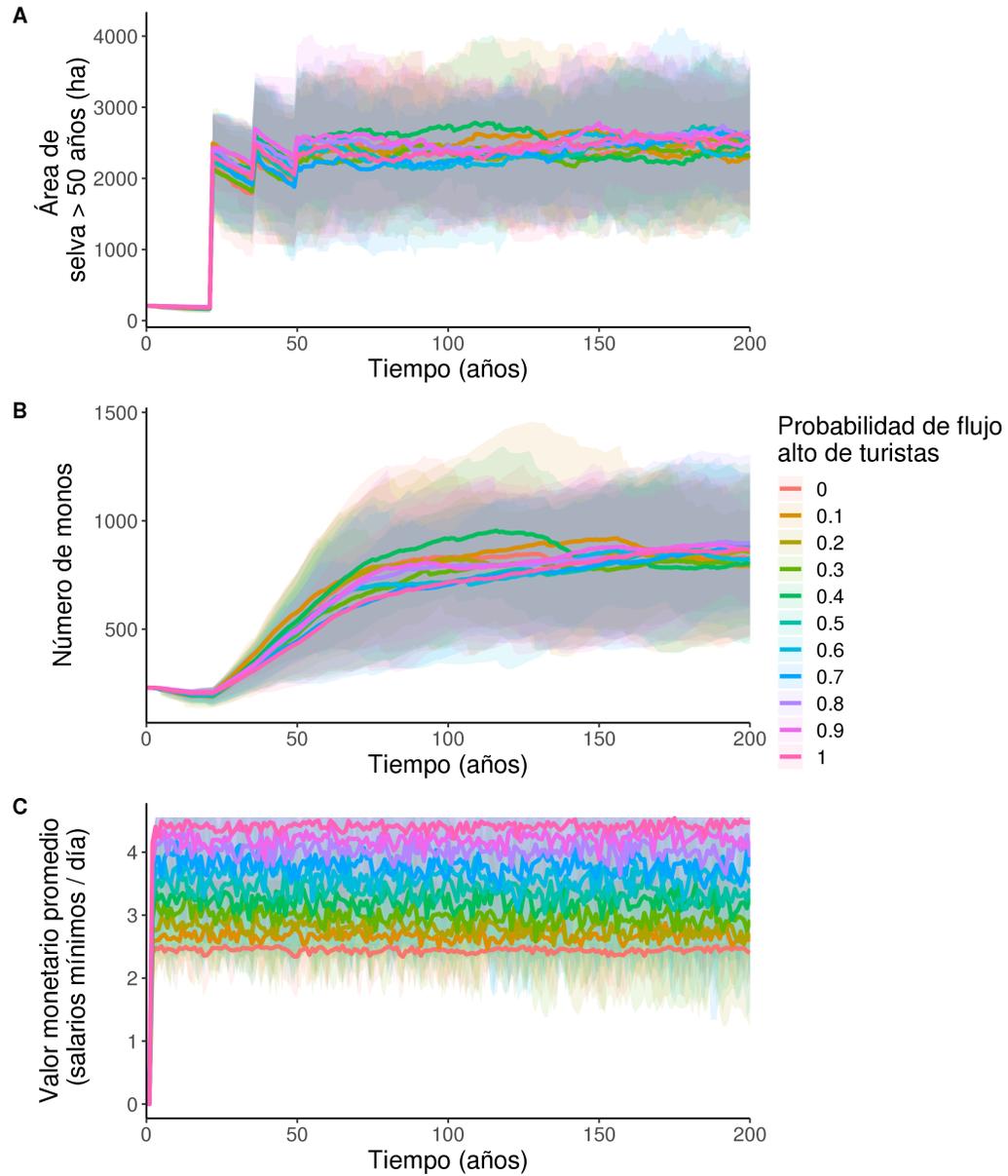


Figura 6.7: Análisis de sensibilidad de la probabilidad de flujo alto de turistas. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

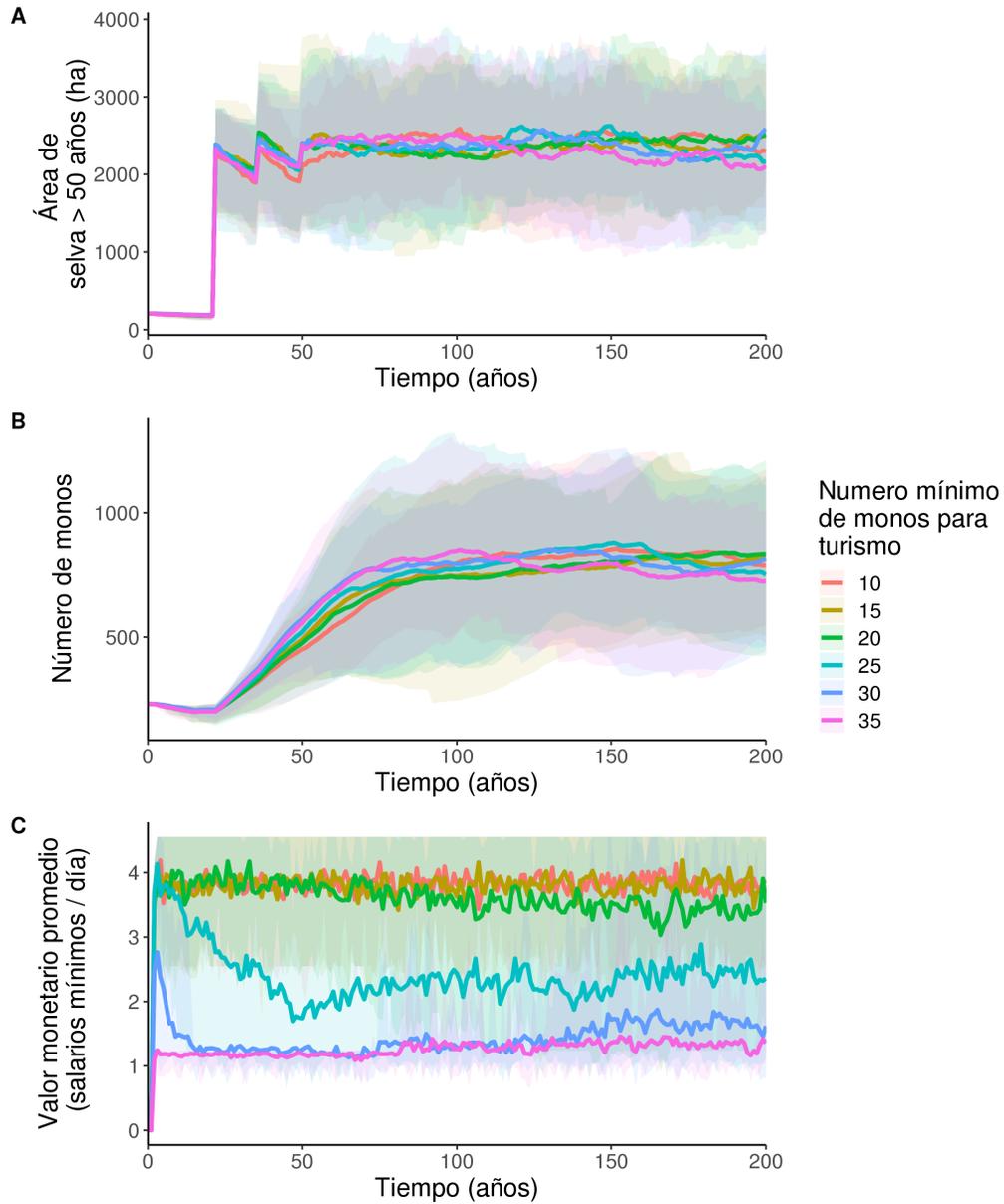


Figura 6.8: Análisis de sensibilidad del número mínimo de monos necesarios para que lleguen turistas. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

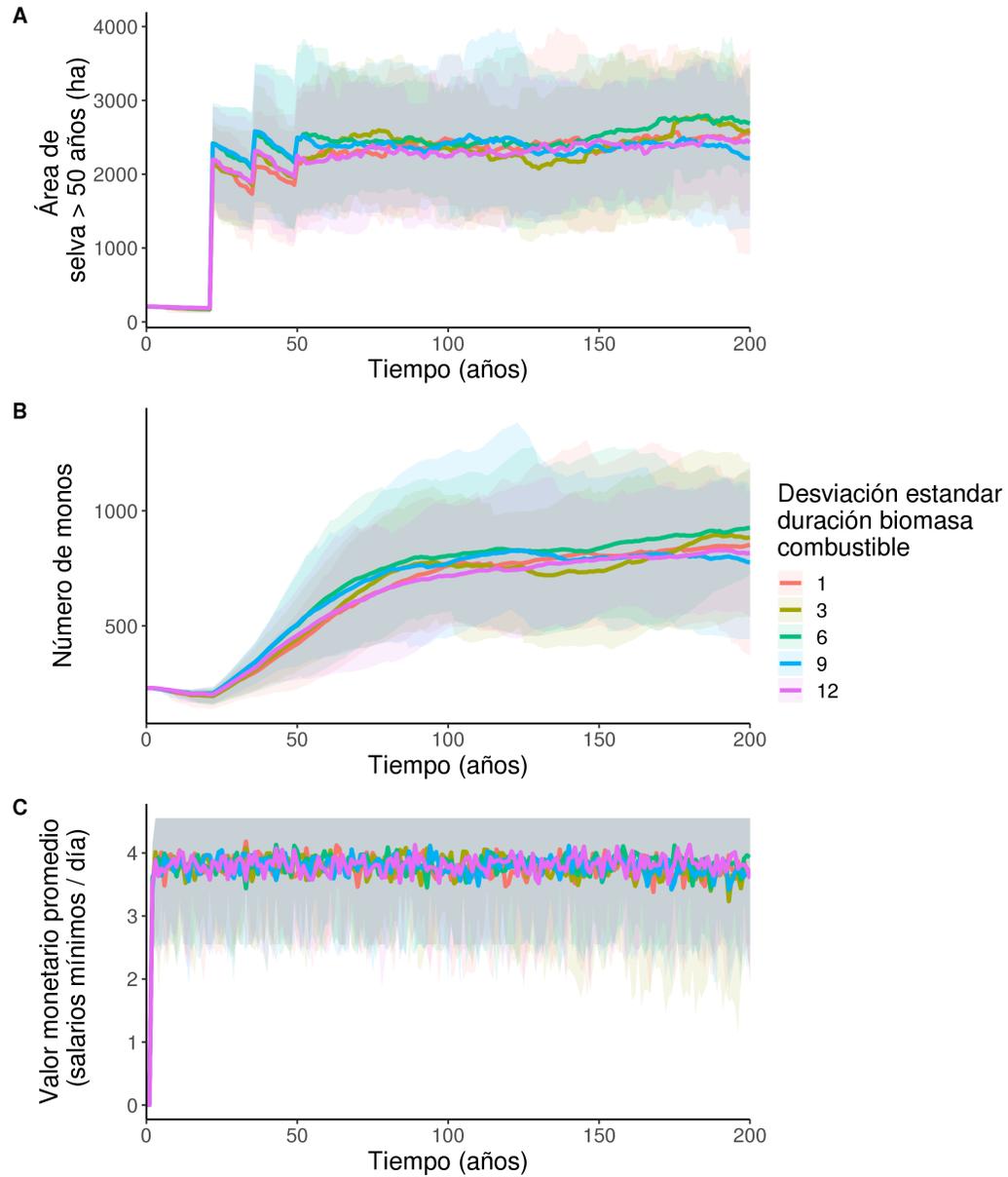


Figura 6.9: Análisis de sensibilidad de la desviación estándar de la duración de la biomasa combustible. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número total de monos. C: Valor monetario promedio. La línea representa la media y las sombras inferiores y superiores los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

6.3. Prueba de validación

La comparación de los resultados del modelo con los datos observados empíricamente se muestran en la Figura 6.10 y en el Cuadro 6.2. El modelo parece reproducir relativamente bien las áreas de selva de 2 a 15 años, selva de 16 a 29 años y selva de 30 a 50 años (Figura 6.10.A-C). Sin embargo, el modelo parece sobre estimar ligeramente el área de la selva mayor a 50 años y el número total de monos (Figura 6.10.D-E).

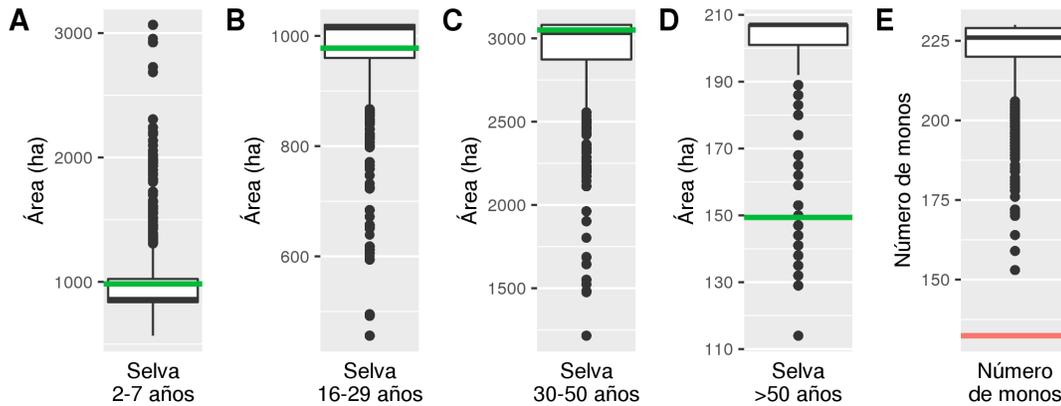


Figura 6.10: Resultados de la validación. Las cajas representan los resultados de 100 simulaciones después de lo equivalente a 12 años (2003 a 2015). Las líneas representan los valores observados empíricamente por Rangel-Rivera (2017) para los distintos tipos de selva (verde) en 2015 y el número de monos estimado en 2015 a partir de los datos de Spaan (2017) (rojo). A: área de selva de 2 a 15 años. B: área de selva de 16 a 29 años. C: área de selva de 30 a 50 años. D: área de selva mayor a 50 años. E: número total de monos dentro de la reserva.

Cuadro 6.2: Valores observados empíricamente y resultados del modelo. Los valores de selva observados se obtuvieron de (Rangel-Rivera 2017). El número de monos se estimó a partir de las densidades reportadas por (Spaan 2017). \bar{x} : media; $s.e.$: error estándar; Me : mediana.

	Observado 2003	Observado 2015	Resultados modelo 2015	
			$\bar{x} \pm s.e.$	Me
Selva de 2 a 15 años	686.60	983.60	971.19 ± 3.94	861
Selva de 16 a 29 años	1007.80	977.80	972.80 ± 1.01	1014
Selva de 30 a 50 años	3088.80	3050.40	2906.00 ± 3.35	3033
Selva > 50 años	212.30	149.40	199.59 ± 0.20	207
Número de monos	152.00	132.38	222.5 ± 0.12	226

6.4. Simulación de escenarios

Para todas las combinaciones de actividades se observó una tendencia de crecimiento del área de selva mayor a 50 años y del número de monos (Figura 6.11.A-B). En el caso del valor monetario promedio, todas aquellas combinaciones de actividades que no incluían el turismo alcanzaron valores de estabilidad entre 0 y 1.15, mientras que aquellas combinaciones de actividades que sí incluían al turismo alcanzaron valores de estabilidad entre 3.19 y 6.23 (Figura 6.11.C).

Al agrupar las combinaciones de actividades por estrategia se puede ver que el área de selva madura en las estrategias Orientada a Servicios y Otra es mayor que en las estrategias

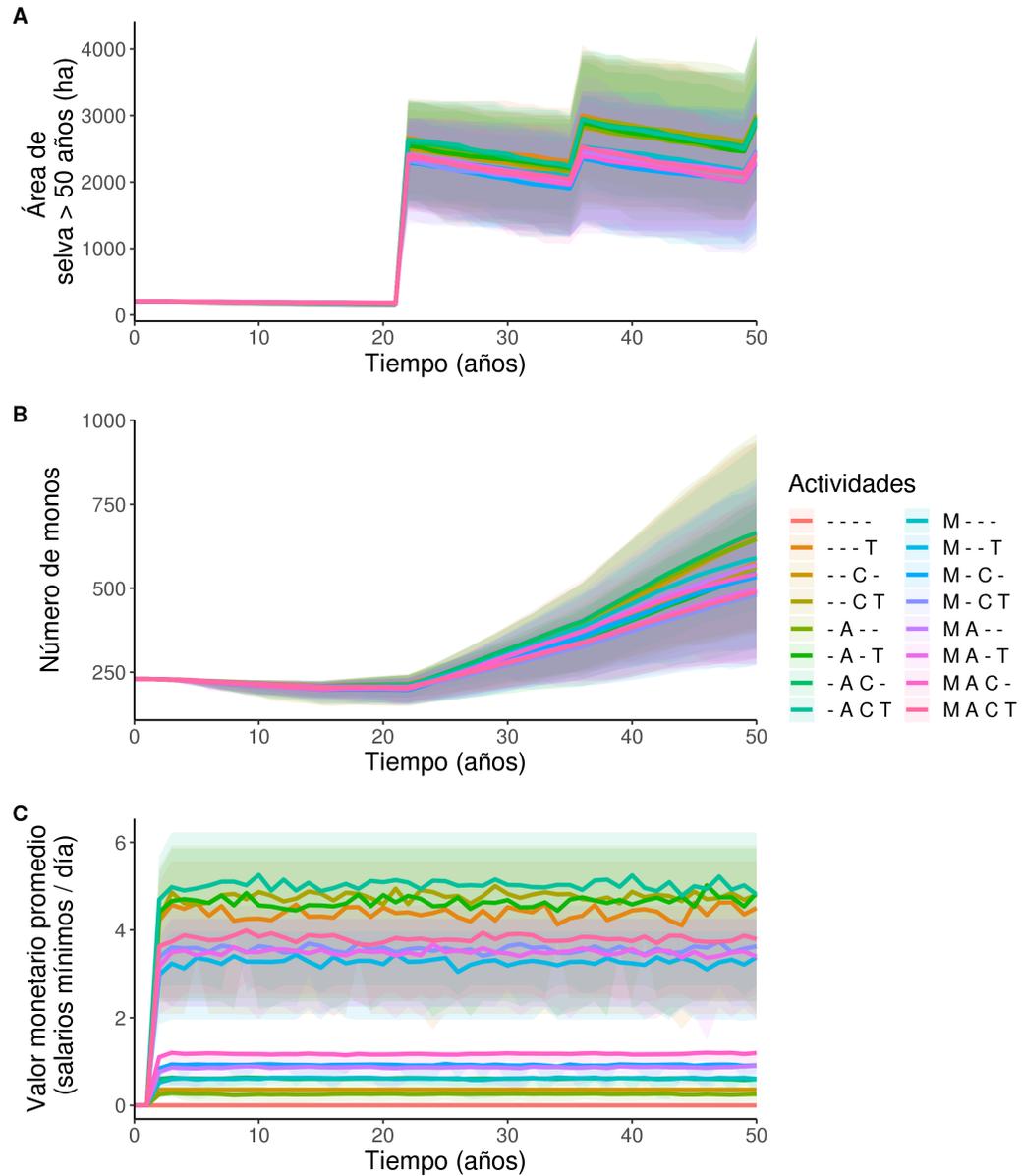


Figura 6.11: Simulación de escenarios por combinación de actividades. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número de monos. C: Valor monetario promedio. M: agricultura (milpa); A: apicultura; C: producción de carbón; T: provisión de servicios ecoturísticos. Cada color indica una combinación distinta de actividades. Las líneas muestran la media y las sombras inferior y superior indican los cuartiles 5 y 95, respectivamente.

Mixta y Tradicional (Cuadro 6.12). Sin embargo, la tendencia en todas las estrategias es la de aumento del área de selva. En el caso del número de monos se observa que Otra favorece un mayor número de monos, seguida de las estrategias Tradicional y Orientada a Servicios, y finalmente la estrategia Mixta. Y por último se puede observar que la estrategia que genera un mayor valor monetario promedio es la Orientada a Servicios, seguida por la Mixta y finalmente la Tradicional y la Otra. Nótese que la estrategia Orientada a Servicios a demás de ser la que genera mayor valor monetario también es la que presenta una mayor variación (Cuadro 6.3).

Cuadro 6.3: Resultados de la simulación de escenarios por estrategia y por variable de salida. \bar{x} : media promedio; \bar{s} : desviación estándar promedio; $\overline{C.V.}$: coeficiente de variación promedio.

Estrategia	Área de selva madura			Número de monos			Valor monetario promedio		
	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$
Otra	508.11	112.89	17.11	329.14	57.03	14.40	0.30	0.22	73.67
Tradicional	447.71	104.21	17.85	307.19	52.45	14.37	0.86	0.23	26.29
Mixta	454.63	101.28	17.26	287.57	42.09	12.73	3.39	0.72	21.12
Orientada a Servicios	519.08	111.55	16.90	304.10	45.52	12.89	4.52	1.17	26.00

En la Figura 6.13 se muestran los resultados de los escenarios donde se exploró el efecto del incremento de distintos disturbios. Al aumentar la probabilidad de que ocurran tormentas y huracanes se obtuvo una ligera reducción de las trayectorias para todas variables de salida con todas las estrategias. Al aumentar la probabilidad de que ocurran incendios se obtuvo una importante reducción en el área de selva madura y en el número de monos; sin embargo, en el valor monetario promedio no hubo diferencias notables. En contraste, al reducir la probabilidad del flujo alto de turistas no hubo cambios notables para ninguna estrategia en el área de selva madura ni en el número de monos, pero sí hay una importante reducción del valor monetario promedio para las estrategias Mixta y Orientada a Servicios (Cuadro 6.4). En el caso de la estrategia Orientada a Servicios, cuando no hay aumento en este disturbio el valor monetario promedio es de 4.52 y cuando hay aumento del disturbio es 3.25, lo que representa una diferencia de 1.27. En el caso de la estrategia Mixta sin aumento del disturbio, el valor monetario promedio es de 3.39 y con aumento del disturbio es 2.64, lo que representa una diferencia de 0.75. En todos los escenarios la estrategia Mixta presentó una menor variación en el valor monetario promedio que la Estrategia Orientada a Servicios (Cuadro 6.4).

Cuadro 6.4: Valor monetario promedio de las actividades económicas de los hogares bajo distintos disturbios. \bar{x} : media promedio; \bar{s} : desviación estándar promedio; $\overline{C.V.}$: coeficiente de variación promedio.

Estrategia	Sin aumento de disturbios			Aumento tormentas			Aumento incendios			Disminución turismo		
	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$	\bar{x}	\bar{s}	$\overline{C.V.}$
Otra	0.30	0.22	73.67	0.27	0.21	78.36	0.30	0.22	73.68	0.29	0.22	73.81
Tradicional	0.86	0.23	26.29	0.78	0.25	32.45	0.86	0.22	25.69	0.86	0.23	26.35
Mixta	3.39	0.72	21.12	3.19	0.81	25.36	3.36	0.77	22.96	2.64	0.70	26.42
O.Servicios	4.52	1.17	26.00	4.25	1.30	30.65	4.45	1.27	28.54	3.25	1.09	33.68

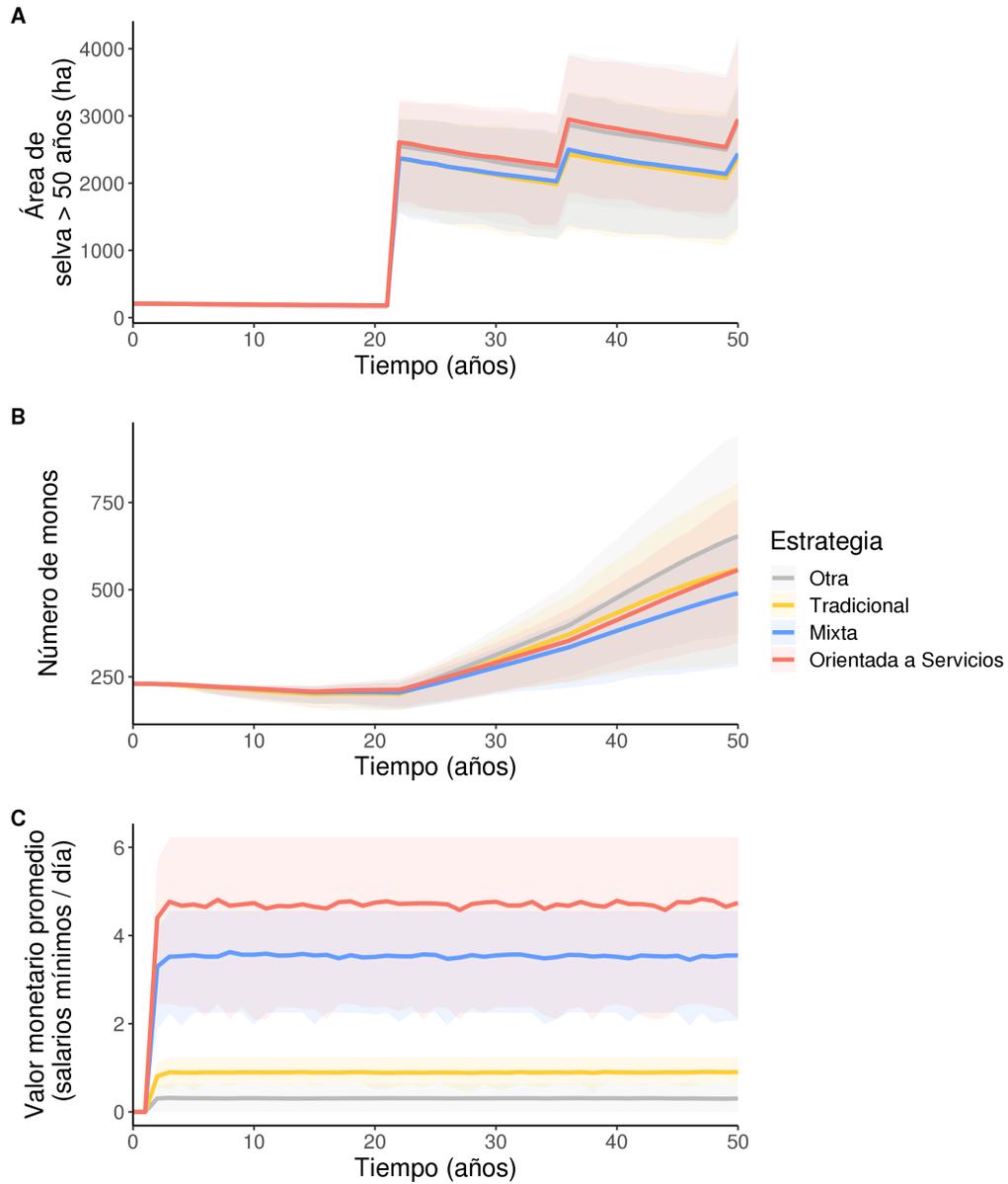


Figura 6.12: Simulación de escenarios por estrategia. Se agruparon las actividades por estrategia de acuerdo a la Tabla 7 y se promediaron. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número de monos. C: Valor monetario promedio. Cada color indica una estrategia distinta. Las líneas muestran la media y las sombras inferior y superior indican los cuartiles 5 y 95 respectivamente.

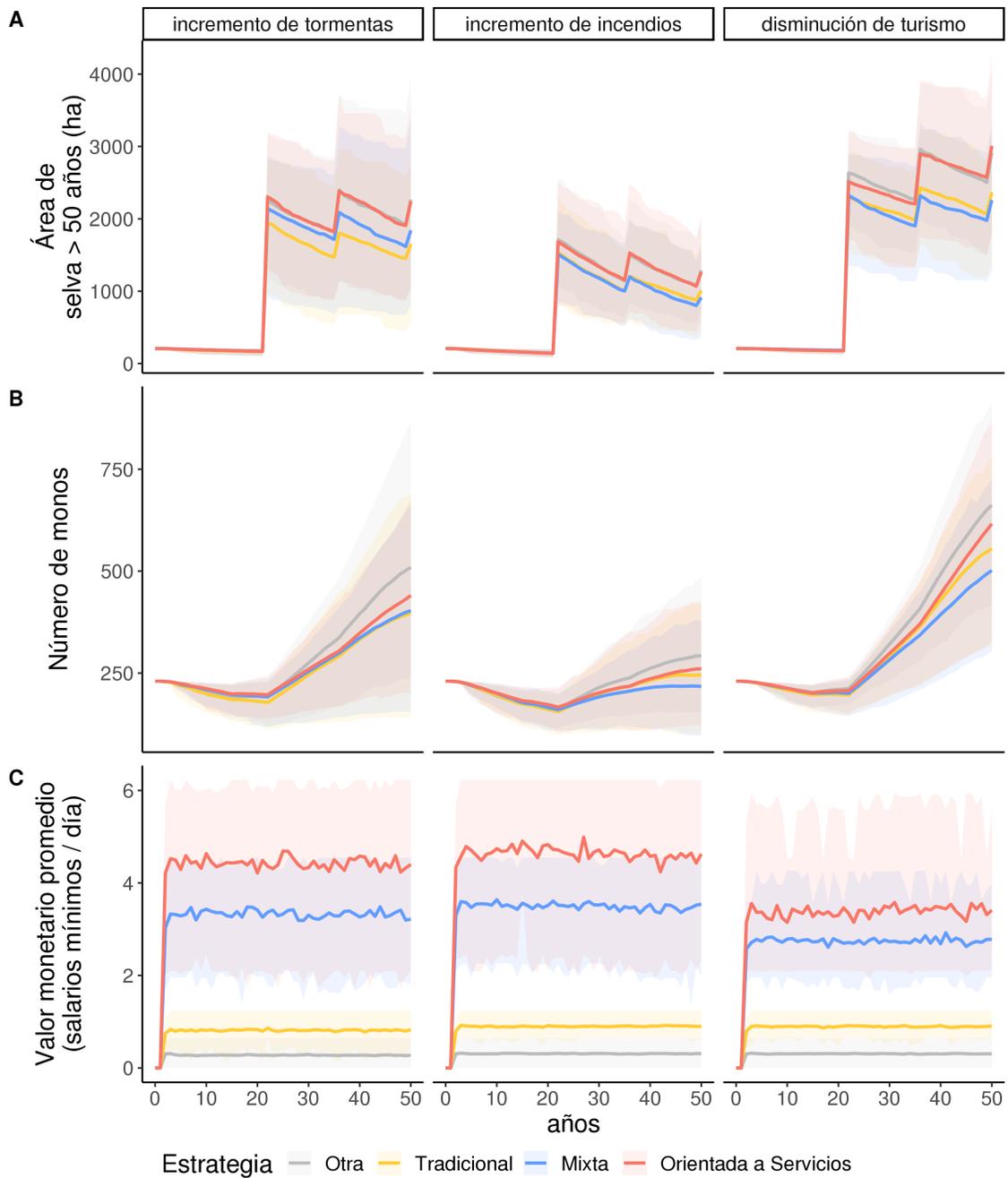


Figura 6.13: Escenarios con aumento de tormentas, aumento de incendios y disminución de turismo. A: Área de selva mayor a 50 años. B: Número de monos. C: Valor monetario promedio. Cada color indica una estrategia distinta. Las líneas muestran la media y las sombras inferior y superior indican los cuartiles 5 y 95 respectivamente.

7. Discusión

La comunidad maya de Punta Laguna, así como otras comunidades cercanas, han experimentado importantes cambios en las formas como manejan sus recursos debido principalmente al crecimiento del turismo en la región, al decreto del ANP en parte de sus territorios y a distintos programas gubernamentales. Estos importantes cambios en la forma de manejar sus recursos han conducido a preguntarse ¿cuáles estrategias de manejo pueden ser compatibles con la conservación de la biodiversidad en el sitio? y ¿cómo distintas estrategias de manejo afectan la capacidad para responder ante disturbios frecuentes en la región como los huracanes, los incendios y las fluctuaciones en el turismo?

En esta sección, primero se discuten los resultados del análisis de sensibilidad, los cuales sugieren que el modelo es poco robusto a la modificación de algunos de sus parámetros. En segundo lugar, se discuten los resultados de la prueba de validación y se sostiene que, a pesar de algunas limitaciones en el proceso de validación, el modelo reproduce relativamente bien el comportamiento cualitativo de referencia del sistema. En tercer lugar, se discuten los resultados de las simulaciones de escenarios, los cuales surgieron que todas las estrategias de manejo exploradas permiten el crecimiento de la selva y de la población de monos, y que la estrategia especializada en el ecoturismo, a pesar de generar un mayor valor monetario promedio, tiene asociada una mayor variabilidad y una menor resistencia en la economía de los hogares. En esta misma sección se discuten algunos de los supuestos del modelo y algunos aspectos que no fueron tomados en consideración. Posteriormente, se discuten algunas posibles implicaciones de estos resultados en términos del contexto del sitio. Finalmente se discuten algunas aportaciones y limitaciones del enfoque de sistemas y de las herramientas utilizadas.

7.1. Resultados del análisis de sensibilidad

Las tres variables de salida del modelo resultaron sensibles a la mayoría de los parámetros explorados en el Análisis de sensibilidad. A continuación se explican algunos de los resultados de la prueba de sensibilidad.

En el caso del “tamaño del cuadro”, con un tamaño de cuadro de 1 ha se obtuvo una mayor área de selva madura y una mayor población de monos que un tamaño de cuadro de 3 ha. Esta diferencia puede ser resultado de que un menor tamaño de cuadro disminuye el número de cuadros con biomasa combustible que se encuentran en contacto, favoreciendo una menor extensión de los incendios. Por otro lado, la reducción del valor monetario promedio cuando se tiene un tamaño de cuadro de 1 ha puede deberse a una mayor fragmentación del hábitat en la zona donde se realizan las actividades económicas. Esta mayor fragmentación podría ser resultado de que con un tamaño de cuadro de 1 ha se utiliza un mayor número de cuadros para producir milpa. Por lo tanto, al estar más fragmentada esta parte del hábitat, el número de monos en la zona de actividades puede

ser menor y, como consecuencia se reducen los ingresos por el ecoturismo.

La sensibilidad del área de selva madura y de la población de monos a los dos parámetros de la función sigmoidea se deben a mecanismos similares. En el caso del “parámetro función sigmoidea 1”, cuando su valor es menor (i.e., cuando la forma de la función es más similar a una línea recta) entonces el porcentaje de cuadros afectados cuando no ocurre una tormenta es mayor y, por lo tanto, los incendios pueden tener una mayor extensión. En el caso del “parámetro función sigmoidea 2”, cuando su valor es menor (i.e., el punto de inflexión de la función es menor) el porcentaje de cuadros afectados cuando no ocurre tormenta es mayor, por lo que los incendios tienen una mayor extensión.

La disminución del área de selva madura y de la población de monos conforme aumenta la “media de la duración de la biomasa” se debe a que con una mayor duración de la biomasa la cantidad neta de cuadros afectados en un punto dado del tiempo aumenta y como consecuencia se favorecen los incendios de mayor extensión. La sensibilidad del modelo a este parámetro sugiere que la tasa de descomposición de la biomasa combustible, así como las actividades humanas que implican la remoción de biomasa combustible podrían tener un importante efecto en la propagación de los incendios.

La “probabilidad de los cuadros de quemarse” fue el parámetro al que las variables de salida del modelo resultaron más sensibles. Al explorar este parámetro se obtuvo el característico comportamiento de los modelos de percolación (Wilensky, 2006), en este caso con un punto crítico aproximadamente en un valor de 0.5. Al cruzar este punto crítico el área de selva madura y del número de monos disminuyen en lugar de crecer. Es interesante notar que como resultado de la Calibración, en la cual se buscaba que el modelo reprodujera el área quemada observada empíricamente, este parámetro se colocó en 0.5, es decir, cerca del punto crítico. Esta observación de que algunos sistemas biológicos se organizan cerca de los puntos críticos, es conocida como *criticalidad auto-organizada* y ha demostrado explicar bien la incidencia de incendios en algunas regiones (Ricotta et al., 1999).

Debido la alta sensibilidad del área de selva madura y de la población de monos a los parámetros relacionados a los submodelos Tormentas e Incendios, en los siguientes dos párrafos se discuten algunos de los supuestos y limitaciones de estos dos submodelos.

El submodelo Tormentas supone que la relación de la velocidad máxima del viento y el daño en la vegetación sigue la forma de una función sigmoidea. Sin embargo, Doyle y col. (1995) en un estudio de los efectos del huracán Andrew en manglares en Florida, encontraron que el daño a la vegetación incrementa exponencialmente con el aumento de la velocidad del viento. Esto sugiere que el modelo podría estar sobreestimando el daño cuando la velocidad del viento es baja y media. Otro supuesto de este submodelo es que el daño ejercido por los huracanes se reduce a la acumulación de materia orgánica. No obstante, la defoliación así como la muerte de la vegetación pueden favorecer la abundancia de especies pioneras y/o del sotobosque provocando grandes cambios en las comunidades bióticas y cambiar las trayectorias sucesionales (Myers & van Lear, 1998; Tanner et al., 1991).

En el submodelo Incendios se supuso que todos los cuadros dañados durante una tormenta generan la misma cantidad de biomasa combustible y, por lo tanto, que tienen la misma probabilidad de incendiarse. Sin embargo, el daño a la vegetación puede ser diferente dependiendo de su edad sucesional. Por ejemplo, Bonilla-Moheno (2010) encontró que los árboles con un diámetro mayor son más susceptibles a sufrir mayor daño, lo que podría implicar que la selva con una mayor edad sucesional podría generar mayor biomasa combustible y, como consecuencia, ser más susceptible a incendiarse. Así, el modelo puede estar sobreestimando el área de selva madura. Otro aspecto a notar es que en este

submodelo se supuso que la probabilidad de que ocurran incendios es independiente a la probabilidad de que ocurran tormentas y huracanes. Sin embargo, el riesgo de incendio se incrementa después de los huracanes ya que, además de haber una mayor acumulación de materia combustible, se favorecen algunas condiciones microambientales óptimas para los incendios, como una mayor insolación y velocidad del viento (Myers & van Lear, 1998).

La sensibilidad del valor monetario promedio a los diferentes parámetros explorados está relacionada a los supuestos que se hicieron sobre el flujo de turistas. En el caso del “parámetro función sigmoidea 1” y de la “probabilidad de quemarse”, la disminución del valor monetario se debe a que al modificar estos dos parámetros se quema una mayor área de selva y, como consecuencia, disminuye el número de monos en la zona de turismo y deja de haber ingresos por esta actividad. En el caso de la “probabilidad de flujo alto de turistas”, el valor monetario disminuye conforme el valor de este parámetro se hace menor ya a que van siendo menos frecuentes los bimestres en los que llega un flujo alto de turistas. Finalmente, en el caso del parámetro “número de monos para que lleguen turistas”, se encontró que en un radio de 3 km de los hogares solamente se puede sostener a largo plazo 20 individuos, por lo que en los casos en que se requiere una mayor cantidad mínima de monos no llegan turistas y disminuye el valor monetario.

La sensibilidad de las variables de salidas del modelo a la mayoría de los parámetros explorados sugiere que el modelo es poco robusto por lo que los resultados de las simulaciones tienen mucha incertidumbre asociada a la modificación de sus parámetros. Sin embargo, los comportamientos obtenidos en la prueba de sensibilidad pueden ser explicados por los supuestos del modelo conceptual (i.e., los mecanismos propuestos para representar los procesos simulados, que se describen en la sección 5.2, explican los comportamientos observados). Este hecho incrementa la confianza en que el modelo fue correctamente implementado (Schouten et al., 2014) y que puede ser una herramienta útil para entender el efecto conjunto de las variables consideradas y ganar intuición o comprensión sobre el funcionamiento del sistema de estudio, aunque no para hacer predicciones cuantitativas precisas.

7.2. Resultados de la prueba de validación

El modelo reprodujo relativamente bien las áreas observadas en 2015 por Rangel-Rivera (2017) de selva de 2 a 15 años, de 16 a 19 años y de 30 a 50 años. Sin embargo, el modelo sobreestima el área de selva madura. Además de la posible explicación sobre esta sobreestimación de la selva madura que se da en la subsección anterior, cabe señalar que durante el periodo que se usó para la validación, ocurrieron dos incendios de gran extensión que consumieron una parte importante de la selva madura en la zona norte de la reserva (Rangel-Rivera, 2017). Como consecuencia de la sobreestimación de la selva madura, el modelo también sobreestimó el número total de monos.

Es importante señalar que la calibración y la validación se hicieron con datos obtenidos en el mismo estudio. Esto podría implicar que la buena predicción generada por el modelo puede ser únicamente consecuencia de haber utilizado datos no independientes provenientes del mismo estudio. Por lo tanto, para evaluar mejor la capacidad predictiva del modelo será necesario contrastar sus resultados con futuros estudios empíricos.

A pesar de la imposibilidad de validar correctamente los resultados del modelo, y a la imposibilidad real de validar cualquier modelo (Oreskes et al., 1994), nuestro modelo, una vez calibrado, reproduce relativamente bien el comportamiento cualitativo del sistema.

Cabe resaltar que el propósito del trabajo no era construir una herramienta predictiva cuantitativamente ni una herramienta concluyente, sino, se buscaba una herramienta exploratoria que integrara distintas fuentes de información y mejorara nuestro entendimiento general sobre el SES.

7.3. Resultados de la simulación de escenarios

Los resultados del modelo sugieren que todas las estrategias exploradas permiten el crecimiento de la selva madura. El modelo captura algunas diferencias esperadas entre las distintas estrategias. Por ejemplo, la reducción en el área de selva madura en las estrategias en las que se produce milpa (Mixta y Tradicional). Sin embargo, el modelo podría estar sobreestimando esta reducción, ya que al considerar únicamente el espacio que ocupa el polígono del ANP se ignora que los hogares de la comunidad de Punta Laguna también utilizan el espacio fuera de la reserva para llevar a cabo esta actividad (Rangel-Rivera, 2017). Además, también se supuso que las parcelas utilizadas para producir milpa son elegidas de manera parcialmente aleatoria. No obstante, la selección del terreno para producir la milpa está determinada por múltiples factores como: la calidad del suelo, la estructura de la vegetación, la distancia al pueblo, los rumbos familiares así como la facilidad para la preparación de la parcela (e.g., es más fácil tumbar un acahual joven que uno más antiguo) (Rivera-Núñez, 2014; García-Frapolli et al., 2007). Esto implica que el patrón espacial generado por el modelo podría ser muy distinto al patrón del paisaje real. Así mismo, no se consideran algunos procesos humanos que pueden influir en la velocidad de la regeneración de la selva. Por ejemplo, la tumba selectiva de árboles al preparar la milpa (García-Frapolli, 2006; Rivera-Núñez, 2014). Otro aspecto que no se toma en consideración son los cambios demográficos humanos, los cuales podrían promover el crecimiento del núcleo urbano y del área necesaria para la producción de milpa. Igualmente, tampoco se consideraron algunos factores que incrementan el riesgo de incendios en la zona, como los accidentes por la producción de carbón vegetal (CONANP, 2006) (como ocurrió en los incendios de 2006 y 2011 (Rangel-Rivera, 2017)) o los incendios accidentales por la quema en la preparación de la milpa (CONANP, 2006; Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003). Análogamente, tampoco se tomaron en consideración las actividades que se realizan para reducir el riesgo de incendio como los conocimientos y habilidades de control de fuego de los "guardianes del viento." *zu ik'ob* (en maya Yucateco) (Nigh & Diemont, 2013, s1), la construcción de brechas corta-fuego o la técnica "tolché" (García-Frapolli, 2006; Rivera-Núñez, 2014), la limpia de materia combustible o las guardias para prevención de incendios (Rios-Beltrán, 2016).

Los resultados del modelo para el crecimiento de la selva concuerdan con los resultados y propuestas de García-Frapolli y col. (2007). Estos autores mediante un modelo probabilístico simularon tres distintos escenarios de manejo: (1) un escenario donde se mantenía la producción de milpa a las mismas tasas a las que producía en 2003, (2) un escenario donde la producción de milpa disminuía, y (3) un escenario donde la producción de milpa desaparecía. Los autores observaron una tendencia de regeneración de la selva en los tres escenarios, sin encontrar diferencias significativas entre ellos.

En el caso de la población de monos, la estrategia que favorece un mayor número de éstos es Otra. Esto se debe a que en este caso no actúa ninguno de los dos factores que reduce el número de monos: (1) la reducción del hábitat de los monos por la producción de milpa, y (2) la reducción de la tasa intrínseca de crecimiento de los monos por el arri-

bo de un flujo alto de turistas. Es interesante notar cómo estos dos factores generan de manera independiente trayectorias similares para la población de monos (Estrategia Tradicional y Orientada a Servicios en Figura 6.12.B). La estrategia Mixta también genera una tendencia de crecimiento de la población de monos, no obstante, ésta es menor que en las otras tres estrategias dado que en este caso se tiene el efecto conjunto de los dos factores. Un aspecto importante a considerar es que el modelo supone que la regeneración de la selva es determinista y que el único factor que determina su estado sucesional de la selva es el tiempo. No obstante, a pesar de que la riqueza de algunas selvas secundarias puede alcanzar los niveles de riqueza de una selva madura relativamente rápido, la composición y estructura de éstas puede diferir bastante (Bonilla-Moheno, 2008; Finegan, 1996). Esto implicaría que el modelo, al suponer que los cuadros con una edad sucesional mayor a 50 son equivalentes en composición y estructura a la selva madura, sobreestima el hábitat del mono y su tamaño poblacional. Otro aspecto importante a considerar es que, en paisajes fragmentados, como la mayoría de las regiones tropicales, las extinciones locales son un fenómeno normal e inevitable, por lo que la recolonización es fundamental para la supervivencia a largo plazo de las especies (Perfecto et al., 2009). En particular, los monos araña son una especie que se ha visto es altamente sensible a la fragmentación de su hábitat (Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003). En este sentido, la supervivencia de esta especie en la región podría depender fuertemente de la conectividad entre las distintas poblaciones y hábitats en la región. Por lo tanto, otro factor importante a considerar es que, a pesar de que el hábitat del mono se puede estar recuperando dentro de la reserva, fuera de ésta podrían estar ocurriendo procesos que ponen en riesgo su permanencia a largo plazo. Por ejemplo, es posible que la prohibición de la producción de milpa en el interior del polígono haya promovido la intensificación de esta actividad en la periferia de la reserva, lo cual podría reducir la conectividad de esta población con otros hábitats en la región. En este mismo sentido, otro riesgo latente es la posible parcelación del ejido bajo el Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (PROCEDE) (García-Frapolli et al., 2007). En los últimos años hubo un intento de parcelar el territorio el cual fue finalmente cancelado fue dado que el proceso presentó múltiples irregularidades. La parcelación implicaría que los terrenos que colindan con la reserva cambiarían de propiedad colectiva a propiedad privada, lo cual permitiría la venta de terrenos. Esto facilitaría la entrada de agentes externos y, potencialmente, dado que son tierras con alto valor por su cercanía a la Riviera Maya (Rios-Beltrán, 2016), de la industria turística e inmobiliaria. Por lo tanto, futuros estudios podrían estudiar la conectividad entre distintos hábitats en la región. Esto permitiría evaluar mejor el papel de la reserva en la conservación de esta especie y el efecto de algunas de las más importantes fuerzas de cambio de uso de suelo en la región.

De manera general, la tendencia de crecimiento de la selva y de la población de monos con todas las estrategias y, en particular en las estrategias que incluyen la producción de milpa, apoyan la hipótesis de que las actividades tradicionales son compatibles con la conservación de la biodiversidad en este sitio. Esto es resultado de la pequeña escala en que esta actividad se realiza, de los acuerdos comunitarios sobre la misma (i.e, no utilizar la selva madura para la agricultura) y de conocimientos ecológicos tradicionales sobre la dinámica de la selva.

En el caso del valor monetario promedio, el modelo ilustra cómo el ecoturismo representa una importante opción económica para los hogares. El modelo muestra una importante diferencia del valor monetario promedio entre aquellas estrategias que incluyen el ecoturismo (Orientada a Servicios y Mixta) y aquellas que no (Tradicional y Otra). No obstante,

las estrategias que incluyen el ecoturismo tienen una mayor variabilidad asociada, es decir, presentan mayores fluctuaciones en el ingreso. Por ejemplo, el modelo sugiere que el valor monetario diario promedio de la estrategia Orientada a Servicios puede llegar a ser poco mayor a 6 en un buen año y aproximadamente 2.5 en un mal año (Figura 6.12.C), lo que implica una importante incertidumbre en la economía del hogar. A pesar de esta mayor variabilidad, el valor monetario promedio de las estrategias que incluyen ecoturismo nunca llega a ser tan bajo como en las estrategias que no incluyen esta actividad. Es importante señalar que estos valores solamente representan una estimación sobre-simplificada que omite múltiples factores como: (1) diversidad de formas de realizar las actividades (e.g., la producción de la agricultura puede diferir de acuerdo a la estrategia ya que varían los tamaños de las milpas y varían las prácticas de manejo (e.g., periodo de barbecho) (García-Frapolli et al., 2008)), (2) valor monetario de otras actividades económicas no consideradas en el modelo (e.g., recolección de productos del monte, jardines de traspatio, asistente de campo, trabajo asalariado fuera de la comunidad y migración temporal, remesas), y (3) costos de reproducción de la vida. Sobre este último punto, es importante señalar que aquellas estrategias que no incluyen actividades de autosustento implican la necesidad de comprar más productos en el mercado, por lo que el costo de reproducción de vida puede ser mayor. De la misma manera, el modelo ignora todo el valor no monetario asociado a las diferentes estrategias, como su valor para reproducir conocimientos, prácticas y/o creencias tradicionales, los cuales son importante en sí mismos y también en su relación con la conservación de la biodiversidad (Gadgil et al., 1993). Otra limitación a considerar es que el modelo supone una distribución equitativa de los ingresos generados por el ecoturismo y la posibilidad de acceso a esta actividad de todos los miembros de la comunidad. Finalmente, es importante hacer la aclaración de que en este modelo se agruparon como estrategias Orientadas a Servicios aquellas combinaciones de actividades en las que los hogares proveían servicios turísticos pero no realizaban milpa. No obstante, de acuerdo a la clasificación original de García-Frapolli y col. (2007), Rios-Beltrán (2016), algunos hogares con una estrategia Orientada a Servicios sí producen milpa (aunque en extensiones mucho menores) y generalmente no se dedican a la apicultura ni a la producción de carbón.

El incremento de la probabilidad de que ocurran tormentas y huracanes tuvo un relativo bajo impacto en el área de selva madura y en la población de monos, lo que concuerda con la idea de que la selva y la población de monos están bien adaptados a este disturbio frecuente en la región (Bonilla-Moheno, 2008; Spaan, 2017). Por otro lado, la disminución en el flujo de turistas fue el disturbio que tuvo el mayor efecto sobre el valor monetario promedio de los hogares. A pesar de que el valor monetario promedio de la estrategia Orientada a Servicios resultó mayor que el de la Mixta aún con el aumento de este disturbio, la mayor resistencia y la menor variabilidad de esta variable para la estrategia Mixta, apoyan la hipótesis de que una diversificación económica balanceada entre actividades tradicionales y alternativas ayuda a promover la resiliencia económica de los hogares. Esto se debe a que una diversificación de ingresos balanceada favorece la redundancia funcional (i.e., hay múltiples actividades que tiene la función de aportar sustento al hogar) y la diversidad de respuesta (i.e., las distintas actividades responden distinto ante los disturbios) (Biggs et al., 2012). A grandes rasgos, estos resultados coinciden con múltiples estudios que surgieron que la diversificación económica es una estrategia que ayuda a los hogares rurales a reducir la pobreza, a asegurar el alimento y a reducir su vulnerabilidad (Ellis, 2008; Martin & Lorenzen, 2016; Thulstrup, 2015). Finalmente, se encontró que el disturbio que más podría afectar al área de selva madura y a la población de monos son los incendios.

Esta observación, aunada a la sensibilidad que presentó el modelo a los cambios en los parámetros asociados a la probabilidad de que ocurran incendios (véase 7.1 Resultados del análisis de sensibilidad), sugieren que los incendios son unos de los principales disturbios en la región y que éstos pueden tener un efecto importante en la capacidad de la reserva de preservar la biodiversidad. Por lo tanto, futuros estudios podrían centrarse en analizar de este fenómeno y el uso y manejo del fuego asociado a las distintas estrategias de manejo. De manera particular, dados los importantes conocimientos tradicionales ecológicos de los mayas (Ford & Nigh, 2015) parece fundamental revalorar y fomentar las prácticas y conocimientos locales respecto al manejo del fuego.

7.4. Interpretación de los resultados en el contexto del sitio

El balance de consecuencias del decreto del ANP en la biodiversidad es, en general, positivo. Con la entrada en vigor del plan de manejo del sitio, en 2006, se prohibió el uso de fuego para las actividades agroforestales dentro de la reserva. Dadas estas condiciones se podría esperar que la selva y los monos sigan trayectorias similares a las de la estrategia Orientada a Servicios de la Figura 6.12. Estudios posteriores al decreto del ANP han documentado una tendencia de regeneración de la selva (Rangel-Rivera, 2017) y han sugerido la viabilidad a largo plazo de la población de monos (Spaan, 2017). No obstante, estudios previos a la implementación de esta medida de conservación también sugerían la viabilidad de la población de monos (Ramos-Fernández & Ayala-Orozco, 2003) y la tendencia de regeneración de la selva (García-Frapolli et al., 2007). Este hecho apoya las predicciones del modelo y sugiere que, si bien el decreto del ANP ha favorecido la conservación biológica, existen otras formas de conservación que no excluyen a las actividades tradicionales y que también pueden favorecer la conservación de la biodiversidad.

Ahora bien, las consecuencias del decreto del ANP en las comunidades locales han sido mixtas. Por un lado, los beneficios se relacionan principalmente con el crecimiento que ha tenido el ecoturismo. Como ilustra el modelo, la integración del ecoturismo definitivamente ha permitido un mayor ingreso económico de los hogares, reduciendo su necesidad de salir de la comunidad en busca de trabajo temporal (García-Frapolli et al., 2007) y mejorando su acceso a servicios de salud y a la educación (García-Frapolli, 2006; Rios-Beltrán, 2016; Rivera-Núñez, 2014). Igualmente, el ecoturismo ha favorecido algunos aspectos del manejo colectivo y la gestión local, como la constitución de la cooperativa ecoturística *Najil Tucha*, la cual ha favorecido la toma colectiva de decisiones y la participación (García-Frapolli et al., 2013; Rios-Beltrán, 2016). De manera general, el caso de OMYK se ha sugerido como un caso exitoso de conservación en el que el ecoturismo ha favorecido el empoderamiento de las comunidades locales (Kurnick, 2019). Esto contrasta con otros parques naturales e iniciativas turísticas en la región, que a través de la colonización y mercantilización espacial han exacerbado las inequidades sociales (Kurnick, 2019).

Por otro lado, el ecoturismo y las restricciones impuestas por el ANP también han generado algunas consecuencias negativas. En primer lugar, es importante notar que los beneficios del ecoturismo no se han distribuido de igual manera para todos. La comunidad de Punta Laguna es la comunidad que más se ha beneficiado por esta actividad, mientras que otras comunidades han sido excluidas o no han logrado la consolidación de iniciativas que les permitan disfrutar de los mismos beneficios (Rios-Beltrán, 2016; Rivera-Núñez, 2014). Además, dentro de la misma comunidad también ha habido importantes conflictos

asociados al ecoturismo, lo que ha dado lugar al empoderamiento de los hogares que históricamente han tenido una mayor participación en esta actividad y a la exclusión de los hogares que se han mantenido más apegados a las actividades tradicionales (García-Frapolli et al., 2018). En este sentido, como señala Durand (2014), el ecoturismo es una actividad que sigue la misma lógica del turismo convencional, por lo que es fácil que las ganancias económicas se impongan sobre las metras sociales y ambientales, y que éstas sean acaparadas por los actores en posiciones de más poder.

En segundo lugar, la integración del ecoturismo y del decreto del ANP han generado una tendencia hacia la especialización económica en esta actividad y un gradual abandono de algunas actividades tradicionales. En Punta Laguna, en 2004, el 50 % de los hogares se dedicaba al turismo y el 77 % producía milpa, mientras que en 2013 estas cifras cambiaron a 82 % y 55 %, respectivamente (Rios-Beltrán, 2016). Estas tendencias son preocupantes principalmente por dos aspectos. Primero, porque el abandono de las actividades tradicionales representa un riesgo para la reproducción de la diversidad biocultural. En particular, el sistema milpa es un componente central en la identidad maya ya que tiene asociada una gran diversidad de conocimientos, prácticas y creencias tradicionales (Barrera-Bassols & Toledo, 2005; Faust, 2001; Frece & Poole, 2008). En este sentido, el abandono de esta actividad puede implicar una pérdida de éstos. Además, este abandono también ha sido acompañado por un proceso de aculturación, el cual se ve ilustrado por la forma en que las ceremonias y rituales tradicionales ha sido mercantilizados, convirtiéndose en un espectáculo para los turistas (García-Frapolli et al., 2018). El segundo aspecto preocupante de estas tendencias son sus implicaciones en la resiliencia y autonomía de los hogares. Como ilustran los resultados del modelo, una diversificación económica balanceada entre actividades tradicionales y alternativas es un mecanismo que ayuda a maximizar los flujos de materia y a promover la resiliencia económica de los hogares ante algunos disturbios. Además, la EUM que solían practicar estas comunidades, se caracteriza por su flexibilidad, su adaptabilidad y por estar abierta a integrar nuevas actividades, promoviendo así la capacidad adaptativa (García-Frapolli et al., 2012; Toledo et al., 2003). Por lo tanto, la especialización en el ecoturismo y el abandono de la EUM compromete la resiliencia de las comunidades locales y aumenta su dependencia de agentes externos, ocasionado que pierdan el control parcial que tenían sobre su sustento y su soberanía alimentaria. Estas mismas tendencias se ha observado en otros estudios que concluyen que la integración del turismo en las comunidades debe hacerse de forma que no desplace las actividades existentes (Su et al., 2016; Tao & Wall, 2009).

Actualmente, en la Península de Yucatán se sigue privilegiando e impulsando fuertemente al sector turístico. Por ejemplo, el “Tren Maya” es un megaproyecto del gobierno federal que apuesta al sector turístico para detonar el desarrollo socio-económico en la región (SECTUR, s.f.). Este megaproyecto busca conectar los principales centros turísticos de la península con el propósito de promover un esquema turístico en el que los visitantes recorren las comunidades de la región evitando la concentración turística en un solo punto” (SECTUR, s.f.). Por lo tanto, se puede esperar que con proyectos de este tipo cada vez más comunidades rurales e indígenas de la región integren el turismo como una opción económica. Como consecuencia, ante este escenario futuro contradictorio, en el que se espera una mayor frecuencia de los disturbios que afectan al sector turístico (e.g., crisis financieras, crisis del sargazo, mayor intensidad de huracanes) y en el que se espera que el turismo se siga promoviendo como principal opción económica, es importante buscar mecanismos para asegurar una diversificación económica balanceada de tal forma que no se comprometa la resiliencia y la autonomía de las comunidades.

7.5. Aportes y limitaciones de la modelación dinámica y la perespectiva de SES

El modelo se construyó integrando modelos de redes booleanas y modelos basados en agentes. Hasta donde sabemos, este es el primer trabajo en el estudio de SES que integra estas dos herramientas de modelación. Los modelos de redes booleanas son una herramienta de modelación que ha sido poco utilizada más allá del estudio de sistemas de escala molecular y celular. En cambio, los modelos basados en agentes se han utilizado ampliamente para estudiar SES. No obstante, una de las principales limitaciones de estos últimos es que demandan de mucha información empírica para ser parametrizados (Iwamura et al., 2014). En contraste, los modelos de redes booleanas no requieren ser parametrizados por lo que pueden servir como un punto de partida para modelar sistemas pobremente caracterizados (Saadatpour & Albert, 2013). Este sentido, al demandar una menor cantidad de datos empíricos, la aproximación cualitativa que ofrece la modelación de redes booleanas puede facilitar y simplificar la construcción de modelos para el estudio de SES.

Este trabajo ilustra cómo la modelación computacional y la perspectiva de SES son formas efectivas para integrar y sintetizar información de fuentes muy distintas. En este trabajo se integraron explícitamente algunos de los resultados de los más de 20 años de investigación multidisciplinaria en este sitio. Esta aproximación permitió generar una representación conjunta de fenómenos que se habían estudiado separadamente, permitiendo mejorar nuestra intuición sobre algunos de los procesos que ocurren en este sitio. En concordancia con esto, el modelo puede ser utilizado como un primer acercamiento en futuras investigaciones en el sitio. Además, futuros estudios podrían mejorar la representación de algunos de los procesos aquí simulados y utilizarlo para contestar nuevas preguntas. Otra posible aplicación del modelo podría ser como base para desarrollar herramientas de apoyo en procesos participativos, como los juegos socioecológicos (Benítez et al., 2014; D’Aquino et al., 2003). Este tipo de herramientas pueden ayudar en la comunicación de conocimientos, promover la reflexión y aprendizaje colectivos y facilitar la toma colectiva de decisiones para la construcción de medidas efectivas de manejo y gobernanza (Braasch et al., 2018). Por ejemplo, este tipo de herramientas pueden ayudar a aportar elementos a las poblaciones locales para adaptar sus normas comunitarias, sus prácticas y modos de vida a los retos y oportunidades sociales y ecológicas que enfrentan (García-Barrios & González-Espinosa, 2017).

Por otro lado, una de las principales limitaciones que se presentaron en este trabajo fue la integración de factores culturales, políticos e históricos, los cuales son fundamentales para entender las complejas dinámicas que ocurren en estos territorios. Por ejemplo, el modelo no permitió evaluar los efectos que las distintas estrategias tienen en la reproducción de la diversidad biocultural y en el aumento de la desigualdad. Esta limitada integración de dichos factores ha sido una de las principales críticas hacia este tipo de perspectivas y herramientas (Olsson et al., 2015; Stojanovic et al., 2016; Herrero-Jáuregui et al., 2018). Estas limitaciones, aunadas a la ambición que acompaña a estas perspectivas por unificar disciplinas y a su creciente popularidad, pueden resultar contraproducentes para una investigación interdisciplinaria fructífera. Esto es debido a que puede desencadenar en un “imperialismo científico”, es decir, que una disciplina intente dar explicaciones a fenómenos de otras disciplinas extrapolando teorías y enfoques desarrollados para estudiar problemas distintos (Olsson et al., 2015). Por lo tanto, para lograr una investigación fructífera se debe reconocer que la perspectiva de SES y de sistemas no coexiste con todas las ontologías y

perspectivas, y por lo tanto también se debe promover el pluralismo disciplinario (Olsson et al., 2015).

8. Conclusiones

El modelo presentado en este trabajo contribuye a la integración y a la síntesis de parte de la información que se han generado en más de 20 años de investigación multidisciplinaria en OMYK. Además, en concordancia con las hipótesis planteadas, los resultados del modelo dan mayor soporte a las propuestas de que: (1) las estrategias de conservación que no excluyen la realización de actividades tradicionales pueden ser compatibles con la conservación de la biodiversidad en OMYK, y (2) la diversificación balanceada de actividades tradicionales y alternativas es una estrategia que promueve la resiliencia de los hogares. Por lo que se refiere a la utilidad futura del modelo, éste puede servir para orientar futuras investigaciones en el sitio y como una base para la construcción de herramientas de reflexión y aprendizaje colectivos que ayuden a desarrollar medidas efectivas de manejo y gobernanza. En adición, este trabajo es un ejemplo de la forma como el modelado basado en agentes y el modelado de redes booleanas pueden incorporarse para facilitar la construcción de modelos para el estudio de SES. Finalmente, este trabajo también ayuda a ilustrar algunas de las limitaciones de la perspectiva de SES y de la modelación dinámica computacional como la dificultad para representar aspectos políticos, culturales e históricos.

9. Referencias

- Adams, W. M. & Hutton, J. (2007). People, Parks and Poverty: Political Ecology and Biodiversity Conservation. *Conservation and Society*, 5(2), 147-183.
- Albert, I., Thakar, J., Li, S., Zhang, R. & Albert, R. (2008). Boolean network simulations for life scientists. *Source Code for Biology and Medicine*, 3(1), 16.
- An, L. (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. *Ecological Modelling*, 229, 25-36.
- An, L., Linderman, M., Qi, J., Shortridge, A. & Liu, J. (2005). Exploring Complexity in a Human-Environment System: An Agent-Based Spatial Model for Multidisciplinary and Multiscale Integration. *Annals of the Association of American Geographers*, 95(1), 54-79.
- Arias Del Angel, J. A., Escalante, A. E., Martínez-Castilla, L. P. & Benítez, M. (2018). Cell-fate determination in *Myxococcus xanthus* development: Network dynamics and novel predictions. *Development, Growth & Differentiation*, 60(2), 121-129.
- Armendáriz-Villegas, E. J., Covarrubias-García, M. d. l. Á., Troyo-Diéguez, E., Lagunes, E., Arreola-Lizárraga, A., Nieto-Garibay, A., . . . Ortega-Rubio, A. (2015). Metal mining and natural protected areas in Mexico: Geographic overlaps and environmental implications. *Environmental Science & Policy*, 48, 9-19.
- Barnosky, A. D., Matzke, N., Tomiya, S., Wogan, G. O. U., Swartz, B., Quental, T. B., . . . Ferrer, E. A. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471(7336), 51-57.
- Barrera-Bassols, N. & Toledo, V. M. (2005). Ethnoecology of the Yucatec Maya: Symbolism, Knowledge and Management of Natural Resources. *Journal of Latin American Geography*, 4(1), 9-41.
- Barreteau, O., Bousquet, F. & Attonaty, J.-M. (2001). Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal Rivere Valley irrigated systems. *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4(2).
- Benítez, M., Espinosa-Soto, C., Padilla-Longoria, P. & Alvarez-Buylla, E. R. (2008). Interlinked nonlinear subnetworks underlie the formation of robust cellular patterns in *Arabidopsis* epidermis: a dynamic spatial model. *BMC Systems Biology*, 2(1), 98.
- Benítez, M., Fornoni, J., García-Barrios, L. & López-Martínez, R. (2014). Dynamical networks in agroecology: the milpa as a model system. En M. Benítez, O. Miramontes & A. Valiente-Banuet (Eds.), *Frontiers in Ecology, Evolution and Complexity* (CopIt-xives, p. 16). Ciudad de México.
- Berkes, F., Colding, J. & Folke, C. (2003). *Navigating Social-Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Nueva York: Cambridge University Press.

-
- Biggs, R., Schlüter, M., Biggs, D., Bohensky, E. L., BurnSilver, S., Cundill, G., . . . West, P. C. (2012). Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annual Review of Environment and Resources*, 37(1), 421-448.
- Bonilla-Moheno, M. (2008). *Forest Recovery and Management Options in the Yucatan Peninsula, Mexico* (doctorado, University of California, Santa Cruz).
- Bonilla-Moheno, M. (2010). Damage and recovery of forest structure and composition after two subsequent hurricanes in the Yucatan Peninsula. *Caribbean Journal of Science*, 46(2), 240-248.
- Bonilla-Moheno, M. & García-Frapolli, E. (2012). Conservation in Context: A Comparison of Conservation Perspectives in a Mexican Protected Area. *Sustainability*, 4, 2317-2333.
- Bonilla-Moheno, M. & Holl, K. D. (2010). Direct Seeding to Restore Tropical Mature-Forest Species in Areas of Slash-and-Burn Agriculture. *Restoration Ecology*, 18, 438-445.
- Braasch, M., García-Barrios, L., Cortina-Villar, S., Huber-Sannwald, E. & Ramírez-Marcial, N. (2018). TRUE GRASP: Actors visualize and explore hidden limitations of an apparent win-win land management strategy in a MAB reserve. *Environmental Modelling & Software*, 105, 153-170.
- Brockington, D., Duffy, R. & Igoe, J. (2008). *Nature Unbound: Conservation, Capitalism and the Future of Protected Areas*. Londres ; Sterling, VA: Earthscan.
- Brockington, D. & Wilkie, D. (2015). Protected areas and poverty. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1681), 20140271.
- CDB. (1992). *Convenio Sobre la Diversidad Biológica*. Naciones Unidas.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M. & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253.
- Chattoe, E., Saam, N. J. & Möhring, M. (2000). Sensitivity Analysis in the Social Sciences: Problems and Prospects. En R. Suleiman, K. G. Troitzsch & N. Gilbert (Eds.), *Tools and Techniques for Social Science Simulation* (pp. 243-273). Heidelberg: Physica-Verlag.
- CONABIO. (2019). Puntos de calor detectados con imágenes de satélite [Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad]. Recuperado el 29 de abril de 2019, desde http://terra2.conabio.gob.mx/prueba_dom1/consultasAvanzadas.php
- CONANP. (S.f.). Áreas Naturales Protegidas de México. Recuperado el 19 de abril de 2019, desde http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm
- CONANP. (2006). *Programa de conservación y manejo Área de Protección de Flora y Fauna Otoch Ma'ax Yetel Kooh: México*. Ciudad de México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP).
- Cretney, R. (2014). Resilience for Whom? Emerging Critical Geographies of Socio-ecological Resilience: Resilience of What, for Whom? *Geography Compass*, 8(9), 627-640.
- Cretney, R. & Bond, S. (2014). 'Bouncing back' to capitalism? Grass-roots autonomous activism in shaping discourses of resilience and transformation following disaster. *Resilience*, 2(1), 18-31.
- D'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F. & Bah, A. (2003). Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management: The SelfCormas Experiment in Senegal. *The Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6(3).

-
- DeAngelis, D. L. & Grimm, V. (2014). Individual-based models in ecology after four decades. *F1000Prime Reports*, 6.
- Denevan, W. M. (1992). The Pristine Myth: The Landscape of the Americas in 1492. *Annals of the Association of American Geographers*, 82(3), 369-385.
- Doyle, T. W., Smith, T. J. & Robblee, M. B. (1995). Wind Damage Effects of Hurricane Andrew on Mangrove Communities Along the Southwest Coast of Florida, USA. *Journal of Coastal Research*, 21, 159-168.
- Duran, E., Robson, J., Briones-Salas, M., Barton, D. & Berkes, F. (2012). Mexico: Wildlife conservation on community conserved lands in Oaxaca. En N. Dudley & S. Stolton (Eds.), *Values of Protected Landscapes and Seascapes* (Vol. 3, p. 104). Protected Landscapes and Wild Biodiversity. Gland, Switzerland: IUCN.
- Durand, L. (2014). ¿Todos ganan? Neoliberalismo, naturaleza y conservación en México. *Sociológica*, 29(82), 183-223.
- Durand, L., Figueroa, F. & Trench, T. (2014). Inclusion and Exclusion in Participation Strategies in the Montes Azules Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. *Conservation and Society*, 12(2), 175-189.
- Durand, L. & Jiménez, J. (2010). Sobre áreas naturales protegidas y la construcción de no-lugares. Notas para México. *Revista Lider*, 16, 59-72.
- Egli, L., Weise, H., Radchuk, V., Seppelt, R. & Grimm, V. (2018). Exploring resilience with agent-based models: State of the art, knowledge gaps and recommendations for coping with multidimensionality. *Ecological Complexity*. En prensa.
- Ellis, F. (2008). The Determinants of Rural Livelihood Diversification in Developing Countries. *Journal of Agricultural Economics*, 51(2), 289-302.
- Emerson, R. A. (1953). A Preliminary Survey of the Milpa System of Maize Culture as Practiced by the Maya Indians of the Northern Part of the Yucatan Peninsula. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 40(1), 51-62.
- Faust, B. B. (2001). Maya environmental successes and failures in the Yucatan Peninsula. *Environmental Science & Policy*, 4(4), 153-169.
- Finegan, B. (1996). Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession. *Trends in Ecology & Evolution*, 11(3), 119-124.
- Folke, C. (2006). Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, 16(3), 253-267.
- Ford, A. & Nigh, R. (2015). Chapter 2 - Dwelling in the Maya Forest: The High-Performance Milpa. En *The Maya Forest Garden: Eight Millennia of Sustainable Cultivation of the Tropical Woodlands* (Vol. 6, pp. 41-75). United States of America: Left Coast Press, Inc.
- Frece, A. d. & Poole, N. (2008). Constructing Livelihoods in Rural Mexico: Milpa in Mayan Culture. *The Journal of Peasant Studies*, 35(2), 335-352.
- Gadgil, M., Berkes, F. & Folke, C. (1993). Indigenous Knowledge for Biodiversity Conservation. *Ambio*, 22(2), 151-156.
- García-Barrios, L. & González-Espinosa, M. (2017). Investigación ecológica participativa como apoyo de procesos de manejo y restauración forestal, agroforestal y silvopastoril en territorios campesinos. Experiencias recientes y retos en la sierra Madre de Chiapas, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. La Ecología en México: retos y perspectivas, 88, 129-140.
- García-Frapolli, E. (2006). *Conservation from Below: Socioecological Systems in Natural Protected Areas in the Yucatan Peninsula, Mexico* (doctorado, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España).

-
- García-Frapolli, E. (2015). Exclusión en Áreas Naturales Protegidas: Una Aproximación desde los Programas de Manejo. En L. Durand, F. Figueroa & M. Guzmán (Eds.), *La naturaleza en contexto: Hacia una ecología política mexicana*. (pp. 221-236). México, D.F.: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades.
- García-Frapolli, E., Ayala-Orozco, B., Bonilla-Moheno, M., Espadas-Manrique, C. & Ramos-Fernández, G. (2007). Biodiversity conservation, traditional agriculture and ecotourism: Land cover/land use change projections for a natural protected area in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico. *Landscape and Urban Planning*, *83*(2), 137-153.
- García-Frapolli, E., Ayala-Orozco, B., Bonilla-Moheno, M., Espadas-Manrique, C. & Ramos-Fernández, G. (2012). Conservación Comunitaria en Punta Laguna: Ecoturismo y Desarrollo Sustentable. En E. Silva Rivera, M. d. C. Vergara Tenorio & E. Rodríguez-Luna (Eds.), *Casos exitosos en la construcción de sociedades sustentables* (Primera edición, pp. 413-430). Quehacer científico y tecnológico. Serie Hacia la sustentabilidad. Xalapa, Ver., México: Universidad Veracruzana.
- García-Frapolli, E., Ayala-Orozco, B., Oliva, M. & Smith, R. J. (2018). Different Approaches Towards the Understanding of Socio-Environmental Conflicts in Protected Areas. *Sustainability*, *10*(7), 2240.
- García-Frapolli, E., Bonilla-Moheno, M. & Ramos-Fernández, G. (2013). Community Conservation in Punta Laguna: A Case of Adaptive Ecotourism Management. En L. Porter-Bolland, I. Ruiz-Mallén, C. Camacho-Benavides & S. R. McCandless (Eds.), *Community Action for Conservation* (pp. 101-113). Nueva York: Springer.
- García-Frapolli, E., Ramos-Fernández, G., Galicia, E. & Serrano, A. (2009). The complex reality of biodiversity conservation through Natural Protected Area policy: Three cases from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Land Use Policy*, *26*(3), 715-722.
- García-Frapolli, E., Toledo, V. M. & Martínez-Alier, J. (2008). Adaptations of a Yucatec Maya Multiple-Use Ecological Management Strategy to Ecotourism. *Ecology and Society*, *13*(2). En línea.
- Gaucherel, C., Théro, H., Puiseux, A. & Bonhomme, V. (2017). Understand ecosystem regime shifts by modelling ecosystem development using Boolean networks. *Ecological Complexity*, *31*, 104-114.
- Gómez-Pompa, A. & Kaus, A. (1992). Taming the Wilderness Myth. *BioScience*, *42*(4), 271-279.
- Hamby, D. M. (1994). A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment*, *32*(2), 135-154.
- Herrero-Jáuregui, C., Arnaiz-Schmitz, C., Reyes, M. F., Telesnicki, M., Agramonte, I., Easdale, M. H., ... Montes, C. (2018). What do We Talk about When We Talk about Social-Ecological Systems? A Literature Review. *Sustainability*, *10*(8), 2950.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *4*(1), 1-23.
- IUCN. (2008). *Guidelines for Applying Protected Area Management Categories* (N. Dudley, Ed.). Gland, Suiza: International Union for Conservation of Nature.
- Iwamura, T., Lambin, E., Silvius, K., Luzar, J. & Fragoso, J. (2014). Agent-based modeling of hunting and subsistence agriculture on indigenous lands: Understanding interactions between social and ecological systems. *Environmental Modelling & Software*, *58*, 109-127.

-
- Iwamura, T., Lambin, E., Silvius, K., Luzar, J. & Fragoso, J. (2016). Socio-environmental sustainability of indigenous lands: simulating coupled human-natural systems in the Amazon. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(2), 77-83.
- Kurnick, S. (2019). Creating Nature in the Yucatan Peninsula: Social Inequality and the Production of Eco-Archaeological Parks. *American Anthropologist*, 121(2), 376-389.
- López-Martínez, R. (2017). *Modelos Dinámicos de Redes Ecológicas para un Sistema Productivo Complejo: la Milpa Mexicana* (maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México).
- Manzón-Che, M. d. J. (2015). *Evaluación del impacto socioeconómico de la producción de carbón vegetal en una comunidad forestal en la Península de Yucatán, México* (maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica).
- Martin, S. M. & Lorenzen, K. (2016). Livelihood Diversification in Rural Laos. *World Development*, 83, 231-243.
- Mirenda, C. & Lazos-Chavero, E. (2018). Miradas críticas de los paradigmas normativos de adaptación y resiliencia en discursos cambio climático. En P. Curvello Saavedra & G. Parola (Eds.), *Cambios Climáticos, Tratados Ambientales y Derechos Humanos* (pp. 39-72). Rio de Janeiro: Grupo Multifoco.
- Morett-Sánchez, J. C. & Cosío-Ruiz, C. (2017). Panorama de los ejidos y comunidades agrarias en México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 14(1), 125.
- Myers, R. K. & van Lear, D. H. (1998). Hurricane-fire interactions in coastal forests of the south: a review and hypothesis. *Forest Ecology and Management*, 103(2), 265-276.
- Ngo, T. A. & See, L. (2012). Calibration and Validation of Agent-Based Models of Land Cover Change. En A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See & M. Batty (Eds.), *Agent-Based Models of Geographical Systems* (pp. 181-197). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Nigh, R. & Diemont, S. A. (2013). The Maya milpa: fire and the legacy of living soil. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11.
- NOAA. (2019a). IBTrACS - International Best Track Archive for Climate Stewardship. Recuperado el 2 de mayo de 2019, desde <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php?name=ibtracs-data>
- NOAA. (2019b). Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale [National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)]. Recuperado el 7 de mayo de 2019, desde <https://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php?text>
- Olsson, L., Jerneck, A., Thoren, H., Persson, J. & O'Byrne, D. (2015). Why resilience is unappealing to social science: Theoretical and empirical investigations of the scientific use of resilience. *Science Advances*, 1(4), e1400217.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.
- Perfecto, I., Vandermeer, J. H. & Wright, A. L. (2009). *Nature's matrix: linking agriculture, conservation and food sovereignty*. OCLC: ocn317824545. London ; Sterling, VA: Earthscan.
- Peterson, N. D. (2011). Excluding to include: (Non)participation in Mexican natural resource management. *Agriculture and Human Values*, 28(1), 99-107.
- Pisanty, I., Urquiza-Haas, E. & Vargas-Mena, A. (2017). Instrumentos de conservación in situ en México: logros y retos. En J. Saruhkán & J. Soberón (Eds.), *Capital natural de México* (Vol. IV. Capacidades humanas e institucionales, pp. 245-302). México: CONABIO.

-
- Ponce, E. L., Barrera, L. C. & Aliphath Fernández, M. (2012). El sistema milpa roza, tumba y quema de los Maya Itzá de San Andrés y San José, Petén Guatemala, 23.
- Railsback, S. F. & Grimm, V. (2012). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton: Princeton University Press.
- Ramos-Fernández, G., Aureli, F., Schaffner, C. M. & Vick, L. G. (2018). Ecología, comportamiento y conservación de los monos araña (*Ateles geoffroyi*): 20 años de estudio en Punta Laguna, México. En B. Urbani, M. Kowalewski, R. G. Teixeira da Cunha, S. de la Torre & L. Cortés-Ortiz (Eds.), *La Primatología en Latinoamérica 2* (Vol. Tomo II, p. 13). Caracas, Venezuela: Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC).
- Ramos-Fernández, G. & Ayala-Orozco, B. (2003). Population Size and Habitat use of Spider Monkeys at Punta Laguna, Mexico. En L. K. Marsh (Ed.), *Primates in Fragments* (pp. 191-209). Boston, MA: Springer US.
- RAN. (S.f.). Padrón e Historial de Núcleos Agrarios - Registro Agrario Nacional (RAN). Recuperado el 5 de diciembre de 2019, desde <https://phina.ran.gob.mx/consultaPhina.php>
- Rangel-Rivera, C. E. (2017). *Uso del hábitat del mono araña (Ateles geoffroyi) y cobertura vegetal en un Área Natural Protegida de la península de Yucatán, México* (maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Oaxaca, México).
- Resilience-Alliance. (S.f.). Social-ecological Systems. Recuperado el 23 de abril de 2019, desde <https://www.resalliance.org/concepts-social-ecological-systems>
- Rico-Gray, V. & Chemas, A. (1991). Apiculture and management of associated vegetation by the maya of Tixcacaltuyub, Yucatán, México. *Agroforestry Systems*, 13, 13-25.
- Ricotta, C., Avena, G. & Marchetti, M. (1999). The flaming sandpile: self-organized criticality and wildfires. *Ecological Modelling*, 119(1), 73-77.
- Rios-Beltrán, F. I. (2016). *Análisis de los Medios de Vida Sostenibles en el Área de Protección de Flora y Fauna Otoch Ma'ax Yetel Kooh* (licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia).
- Rivera-Núñez, T. A. (2014). *¿Conservacionismo biológico o agencia humana en el manejo ambiental? El caso del Área de Protección de Flora y Fauna Otoch Ma'ax Yetel Kooh* (maestría, Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Mérida, Yucatán, México).
- Rivera-Núñez, T. A., Fargher, L. & Nigh, R. (S.f.). Toward an historical agroecology: An academic approach in which time and space matter. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. En prensa.
- Robeva, R. & Murrugarra, D. (2016). The spruce budworm and forest: a qualitative comparison of ODE and Boolean models. *Letters in Biomathematics*, 3(1), 75-92.
- Robinson, J. G. & Redford, K. H. (1986). Intrinsic rate of natural increase in Neotropical forest mammals: relationship to phylogeny and diet. *Oecologia*, 68(4), 516-520.
- Ross, C. (1988). The intrinsic rate of natural increase and reproductive effort in primates. *Journal of Zoology*, 214(2), 199-219.
- Rozzi, R., Massardo, F., Anderson, C. B., Heidinger, K. & Silander, J. A., Jr. (2006). Ten Principles for Biocultural Conservation at the Southern Tip of the Americas: the Approach of the Omora Ethnobotanical Park. *Ecology and Society*, 11(1), art43.
- Saadatpour, A. & Albert, R. (2013). Boolean modeling of biological regulatory networks: A methodology tutorial. *Methods*, 62(1), 3-12.

-
- Schouten, M., Verwaart, T. & Heijman, W. (2014). Comparing two sensitivity analysis approaches for two scenarios with a spatially explicit rural agent-based model. *Environmental Modelling & Software*, 54, 196-210.
- SECTUR. (S.f.). Tren Maya. Recuperado el 21 de agosto de 2019, desde http://www.sectur.gob.mx/gobmx/wp-content/uploads/2019/04/PRESENTACION_TREN_MAYA.pdf
- SECTUR. (2019). Portal del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica de Turismo -SNIEGT. Compendio Estadístico Estado de Quintana Roo [Secretaría de Turismo]. Recuperado el 1 de mayo de 2019, desde <https://www.datatur.sectur.gob.mx/>
- SMN. (2019). Información Climatológica por estado [Servicio Meteorológico Nacional (SMN)]. Recuperado el 26 de abril de 2019, desde <https://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado>
- Spaan, D. (2017). *The Effects of Habitat Disturbance on the Populations of Geoffroy's Spider Monkeys in the Yucatan Peninsula* (doctorado, Universidad Veracruzana).
- Stojanovic, T., McNae, H. M., Tett, P., Potts, T. W., Reis, J., Smith, H. D. & Dillingham, I. (2016). The "social" aspect of social-ecological systems: a critique of analytical frameworks and findings from a multisite study of coastal sustainability. *Ecology and Society*, 21(3), 15.
- Su, Y., Hammond, J., Villamor, G. B., Grumbine, R. E., Xu, J., Hyde, K., ... Ma, X. (2016). Tourism leads to wealth but increased vulnerability: a double-edged sword in Lijiang, South-West China. *Water International*, 41(5), 682-697.
- Tanner, E. V. J., Kapos, V. & Healey, J. R. (1991). Hurricane Effects on Forest Ecosystems in the Caribbean. *Biotropica*, 23(4), 513.
- Tao, T. C. & Wall, G. (2009). Tourism as a sustainable livelihood strategy. *Tourism Management*, 30(1), 90-98.
- Thulstrup, A. W. (2015). Livelihood Resilience and Adaptive Capacity: Tracing Changes in Household Access to Capital in Central Vietnam. *World Development*, 74, 352-362.
- Toledo, V. M. (2013). Indigenous Peoples and Biodiversity. En *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 269-278). Elsevier.
- Toledo, V. M., Ortiz-Espejel, B. F., Cortés, L., Moguel, P. & Ordoñez, M. d. J. (2003). The Multiple Use of Tropical Forests by Indigenous Peoples in Mexico: a Case of Adaptive Management. *Conservation Ecology*, 7(3), art9.
- UNEP-WCMC & IUCN. (2016). *Protected Planet Report 2016*. Cambridge, UK y Gland, Suiza: UNEP.
- Vaccaro, I., Beltran, O. & Paquet, P. A. (2013). Political ecology and conservation policies: some theoretical genealogies. *Journal of Political Ecology*, 20(1), 255.
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R. & Kinzig, A. P. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society*, 9(2), art5.
- Wilensky, U. (2006). NetLogo Fire Simple Extension 1 model. Northwestern University, Evanston, IL: Center for Connected Learning y Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems.
- Wilensky, U. & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- With, K. A. & Crist, T. O. (1995). Critical Thresholds in Species' Responses to Landscape Structure. *Ecology*, 76(8), 2446-2459.

Xiang, X., Kennedy, R., Madey, G. & Cabaniss, S. (2005). Verification and Validation of Agent-based Scientific Simulation Models. En L. Yilmaz (Ed.), *Proceedings of the 2005 Agent-Directed Simulation Symposium* (pp. 47-55). The Society for Modeling y Simulation International.

A. Apéndice 1

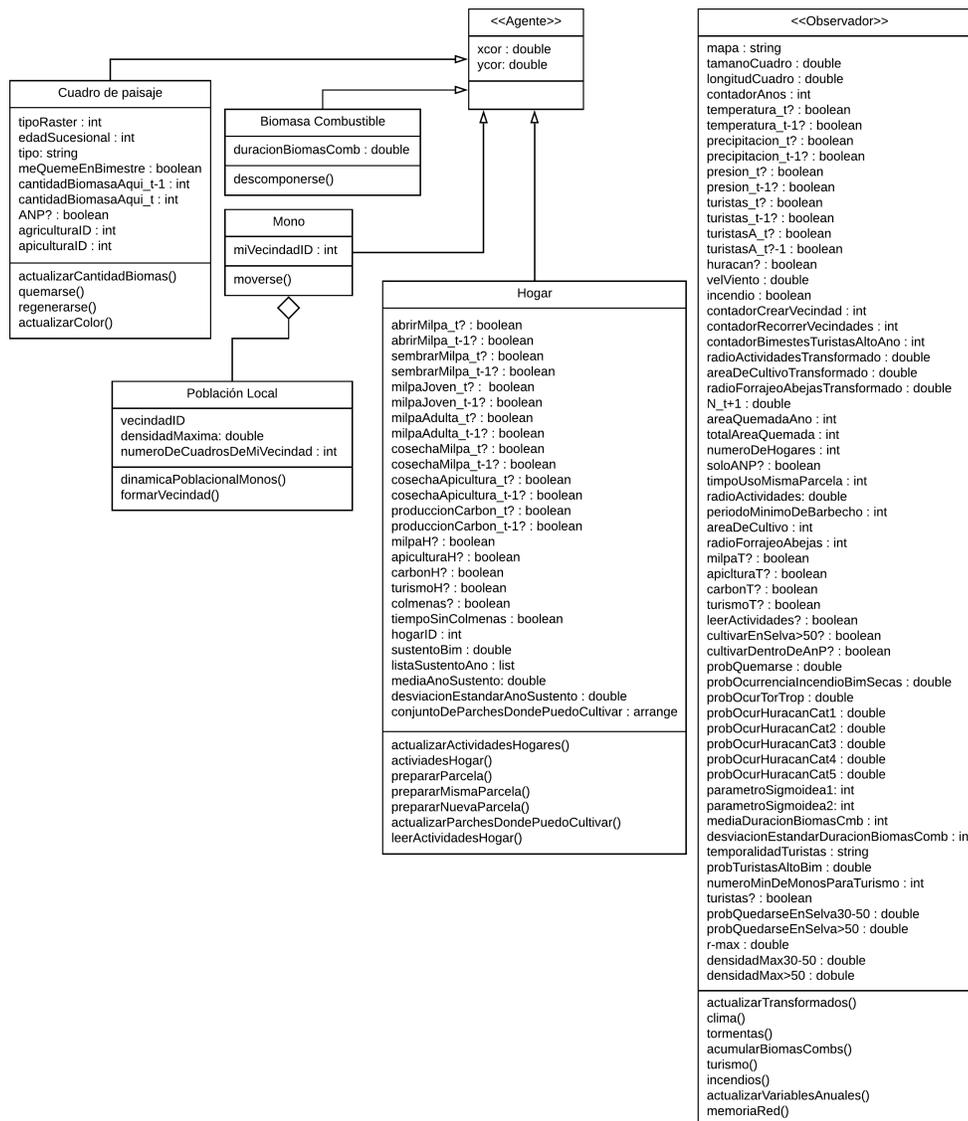


Figura A.1: Diagrama de clase UML que representa la estructura del modelo. Cada cuadro está formado por tres secciones: la sección superior presenta el nombre del agente, la sección media muestra el conjunto de variables que conforman a cada agente y la sección inferior representa los métodos o procesos (reglas de comportamiento) que determinan las acciones de cada agente.

B. Apéndice 2

Para calcular el valor monetario bimestral se utilizaron las estimaciones de los valores monetarios anuales de García-Frapolli (2006) y los ingresos del ecoturismo reportados por Rivera-Núñez (2014). El valor monetario se convirtió en salarios mínimos para poder utilizar datos de distintos años y hacerlos comparables. El cuadro B.1 se muestra el valor monetario anual que generan la milpa, la apicultura y la producción de carbón y su equivalente en salarios mínimos al día promedio por bimestres en los que se realiza la actividad. Por ejemplo, la apicultura genera un valor monetario neto de \$6,417 al año. Dado que en el modelo se realiza la cosecha de la apicultura solamente en tres de los seis bimestres, si se supone que en todos los meses de cosecha se obtiene el mismo valor monetario, en cada bimestre de cosecha se obtienen $\$6,417 / 3 \text{ bimestres} = \2139 . Esto equivale, considerando un salario mínimo de \$45.81 al día, a 0.78 salarios mínimos al día durante el bimestre.

Cuadro B.1: Cálculos del valor monetario de la milpa, apicultura y producción de carbón. Salario mínimo en Área C en 2006 = \$45.81/día.

Actividad	Valor monetario al año	Número de bimestres en los que se realiza la actividad en el modelo	Valor monetario por bimestre en que se realiza la actividad	
			Pesos	Salarios mínimos al día
Milpa	\$10,695	1	\$10,695	3.89
Apicultura	\$6,417	3	\$2139	0.78
Producción de carbón	\$4,984	5	\$997	0.36

En el Cuadro B.2 se muestra el valor monetario que un hogar percibe de las actividades turísticas así como su equivalencia en salarios mínimos promedio diarios al bimestre en que se obtiene ganancia. Por ejemplo, en un bimestre de temporada alta un hogar con un hombre ayudante de guía y mujer artesana percibe \$28,000 ($\14000×2), lo que equivale a un promedio de 7.32 salarios mínimos al día durante dicho bimestre. Para este calculo se supuso que la tipología del hogar con Chaman o guía y mujer artesana corresponde a aquellos hogares cuya principal actividad económica es el turismo (estrategia Orientada a Servicios) y la tipología del hogar con hombre ayudante de guía y mujer artesana corresponde a hogares en los que el turismo no es la principal actividad (estrategia Mixta o estrategia Tradicional). Por lo tanto, si un hogar se dedica al turismo pero no a la milpa se supuso que percibe lo correspondiente a la primera tipología (Orientada a Servicios) y si el hogar se dedica tanto a la agricultura como al turismo percibe lo correspondiente a la segunda tipología (Mixta).

Cuadro B.2: Cálculos del valor monetario del ecoturismo. Salario mínimo en 2014 = \$63.77/día.

Tipología de prestación de servicio	Ganancia al mes	Número de bimestres en los que se puede obtener esta ganancia	Valor monetario por bimestre en que se obtiene ganancia	
			Pesos	Salarios mínimos al día
Con hombre Chaman o guía y mujer artesana (temporada alta)	\$24,000	2	\$48,000	12.55
Con hombre ayudante de guía y mujer artesana (temporada alta)	\$14,000	2	\$28,000	7.32
Con hombre Chaman o guía y mujer artesana (temporada baja)	\$4,000	4	\$8,000	2.09
Con hombre ayudante de guía y mujer artesana (temporada baja)	\$2,500	4	\$5,000	1.31