

Perspectivas de desarrollo resiliente:

reflexiones
teóricas
y empíricas
para la costa
de Oaxaca

V. Sophie Ávila-Foucat
(coordinadora)



PERSPECTIVAS DE DESARROLLO RESILIENTE:
REFLEXIONES TEÓRICAS Y EMPÍRICAS PARA LA COSTA DE OAXACA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas

Rector

Dra. Patricia Dolores Dávila Aranda

Secretaria General

Mtro. Tomás Humberto Rubio Pérez

Secretario Administrativo

Dra. Guadalupe Valencia García

Coordinadora de Humanidades



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS

Dr. Armando Sánchez Vargas

Director

Dr. José Manuel Márquez Estrada

Secretario Académico

Ing. Patricia Llanas Oliva

Secretaria Técnica

Mtra. Graciela Reynoso Rivas

Jefa del Departamento de Ediciones

PERSPECTIVAS DE DESARROLLO RESILIENTE: REFLEXIONES TEÓRICAS Y EMPÍRICAS PARA LA COSTA DE OAXACA

V. Sophie Ávila-Foucat
(coordinadora)



Primera edición digital en pdf, marzo 2024

D.R. © UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Ciudad Universitaria, Coyoacán,

04510, Ciudad de México.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS

Circuito Mario de la Cueva s/n,

Ciudad de la Investigación en Humanidades,

04510, Ciudad de México.

Los Programas UNAM-PAPIIT IN302720 “Resiliencia y medios de vida de los hogares rurales” y UNAM-PAPIIT IV300123 “Resiliencia de socioecosistemas costeros asociados al turismo ante covid-19 y cambio climático”, así como ANR-Conacyt 290832 “Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change (TRASSE)” proporcionaron el financiamiento para la preparación de esta obra; también colaboró el programa PASPA-DGAPA-UNAM.

Esta obra fue arbitrada por pares académicos en un proceso doble ciego, a cargo del Comité Editorial de Publicaciones No Periódicas del Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM.

ISBN: 978-607-30-8831-2

Diseño de portada: Laura Elena Mier Hughes.

Fotografía de portada publicada bajo la licencia *creative commons* CC-BY-SA-4.0: Kenia.AN.

Cuidado de la edición: Graciela Reynoso Rivas y Héliida De Sales Y.

Las opiniones expresadas en cada uno de los trabajos son de exclusiva responsabilidad de las autoras y de los autores.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

AGRADECIMIENTOS

La obra *Perspectivas de desarrollo resiliente: reflexiones teóricas y empíricas para la costa de Oaxaca* ha sido concretada con el apoyo de los colaboradores del proyecto y los autores de los capítulos, por lo que agradezco infinitamente su profesionalismo y grandes aportes a lo largo de varios años. De igual modo, refleja el esfuerzo y la dedicación de un grupo de trabajo consolidado, cuyo empeño en responder preguntas de investigación e inquietudes científicas sobre el tema deriva de su interés por el desarrollo de nuestro país.

Quiero reconocer en particular a los estudiantes en este proyecto, quienes han mostrado siempre mucha disposición y capacidad profesional para llevar a cabo sus trabajos.

Un agradecimiento también a todos los actores y familias que dedicaron tiempo a las entrevistas, las encuestas y los talleres que se llevaron a cabo durante el proyecto y cuyos resultados se reúnen en este libro.

La investigación fue realizada gracias a los Programas UNAM-PAPIIT IN302720 “Resiliencia y medios de vida de los hogares rurales” y UNAM-PAPIIT IV300123 “Resiliencia de socioecosistemas costeros asociados al turismo ante covid-19 y cambio climático”, así como ANR-Conacyt 290832 “Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change (TRASSE)”, que proporcionaron el financiamiento para la preparación de esta obra; también colaboró el programa PASPA-DGAPA-UNAM.

V. Sophie Ávila-Foucat

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	7
INTRODUCCIÓN <i>V. Sophie Ávila-Foucat</i>	11
I. TRAYECTORIAS HISTÓRICAS Y ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA COPALITA	
1. TRAYECTORIA HISTÓRICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO DE LA CUENCA COPALITA <i>Alejandra Ramírez León y Ángel Merlo Galeazzi</i>	21
2. ESTADO ACTUAL DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN DENTRO DE LAS FINCAS CAFETALERAS DE LA CUENCA DEL RÍO COPALITA <i>Pierre Mokondoko Delgadillo y José Mauricio Galeana-Pizaña</i>	53
3. LA MIGRACIÓN COMO UN MEDIO DE VIDA EN LOS HOGARES DEL COMPLEJO COZIHUA EN OAXACA. UN ENFOQUE MICROECONOMÉTRICO <i>Uberto Salgado Nieto y Ulises Sánchez Guerrero</i>	85

II. TRAYECTORIAS FUTURAS DE LA CUENCA COPALITA

4. MODELACIÓN DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y COBERTURA EN EL COMPLEJO COPALITA-ZIMATÁN-HUATULCO (COZIHUA)	125
<i>Julieta Blancas-Zamora, Juan Manuel Núñez y José Mauricio Galeana-Pizaña</i>	
5. MODELACIÓN BASADA EN AGENTES PARA SIMULAR CAMBIOS EN SOCIOECOSISTEMAS: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ	157
<i>Pierre Mokondoko Delgadillo, V. Sophie Ávila-Foucat, Driss Ezzine de Blas, José Mauricio Galeana-Pizaña y Juan Manuel Núñez</i>	
6. IMPULSORES DE CAMBIO Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO SOCIOCLIMÁTICO: UNA VISIÓN DESDE LO LOCAL, A TRAVÉS DE CARTOGRAFÍA PARTICIPATIVA EN COPALITA	185
<i>José Mauricio Galeana-Pizaña, V. Sophie Ávila-Foucat, Juan Manuel Núñez, Driss Ezzine de Blas, Alejandra Ramírez León, Ángel Merlo Galeazzi y Pierre Mokondoko Delgadillo</i>	
CONCLUSIONES	215
<i>V. Sophie Ávila-Foucat</i>	
SEMBLANZAS	223

INTRODUCCIÓN

V. Sophie Ávila-Foucat

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), aprobados en la cumbre de las Naciones Unidas en 2015, marcan la pauta de las políticas de desarrollo mundiales y de manera particular para los 193 países firmantes del documento “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” [Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2015]. Los 17 objetivos descritos en dicho documento abarcan temáticas sociales, económicas, ambientales y de gobernanza; y aunque existen indicadores específicos para cada una de estas dimensiones, se ha reconocido su interdependencia, ya que no es posible un desarrollo a expensas del deterioro de los ecosistemas y tampoco es factible erradicar la pobreza sin un medioambiente sano. De igual manera, resaltan el poder de las acciones humanas a favor del medioambiente, como las que apuntan a generar una producción más limpia. Lo anterior muestra que el desarrollo y el bienestar social dependen de las interacciones entre la sociedad y la naturaleza.

Con la finalidad de estudiar esas interacciones, en la literatura se ha creado y utilizado de manera amplia el marco teórico de sistemas socioecológicos [Ávila Foucat y Perevochtchikova, 2018: 334]. Dicho enfoque parte de la premisa de que las interacciones sociedad-naturaleza constituyen sistemas complejos que manifiestan relaciones anidadas entre escalas, procesos de retroalimentación y comportamientos no lineales. La suma

de los componentes y sus interacciones en los sistemas generan propiedades emergentes que permiten el desarrollo del sistema, por lo que la dinámica del sistema completo es diferente a la de sus partes independientes. La resiliencia es una propiedad emergente de los socioecosistemas y se refiere a la capacidad para enfrentar, reponerse y evolucionar después de un disturbio interno o externo al sistema [Folke *et al.*, 2010].

Dado que alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible depende de las interacciones sociales y naturales, como ya se mencionó, aquí se maneja el enfoque de resiliencia de socioecosistemas para el desarrollo (o desarrollo resiliente, de aquí en adelante). El desarrollo resiliente permite a las regiones experimentar una evolución o trayectoria que favorece la coevolución entre los ecosistemas y el bienestar, lo cual precisa no sobrepasar los límites biofísicos y construir el desarrollo con base en actividades más sustentables, así como en capacidades de persistencia, adaptación y transformación [Ávila-Foucat, en dictamen]. Para seguir desarrollándose, los socioecosistemas pueden aprender y autoajustarse en respuesta a los estresores [Folke *et al.*, 2010]. Con la finalidad de observar las posibles trayectorias y formas de enfrentar diversos estresores, a lo largo de esta investigación se analizan las interacciones entre sociedad y naturaleza, y su evolución en el tiempo. La resiliencia se presenta como un enfoque útil para cumplir con el desarrollo sostenible y sus objetivos, dada la necesidad de incorporar una visión más compleja y dinámica, porque la evaluación lineal de impacto de los proyectos de desarrollo ya no es suficiente [Reyers *et al.*, 2022]. En este sentido, el estudio de la resiliencia supone incluir las diversas capacidades de reacción de los sistemas, explicar las dinámicas de los sistemas y no el comportamiento independiente de sus partes, analizar los efectos de diversas escalas y estudiar procesos que moldean los impactos de políticas públicas, así como la influencia del contexto en los socioecosistemas y la

determinación de causalidades [Reyers *et al.*, 2022]. Asimismo, se reconoce la importancia de identificar umbrales y trayectorias, pero también las dificultades metodológicas para lograrlo [Ávila-Foucat y Espejel, 2020]. Aunado a lo anterior, el estudio de los socioecosistemas requiere visiones interdisciplinarias y transdisciplinarias, de modo que trasciendan los métodos disciplinarios y den paso a la construcción de nuevas propuestas o al uso de métodos más integrales [Gómez-Sántiz *et al.*, 2021; González-Quintero y Ávila-Foucat, 2019].

La presente obra abona a los puntos antes mencionados, toda vez que expone cómo las interacciones entre sociedad y naturaleza definen las trayectorias de los socioecosistemas y aborda las implicaciones teórico-metodológicas para lograrlo. Los procesos de diferente índole en un socioecosistema, al igual que las causalidades y el efecto del contexto local en las mismas, se estudian por medio de enfoques interdisciplinarios y la visión de diversos actores. Por tanto, se toma como guía la pregunta de investigación: ¿cuáles son las principales interacciones y causalidades de un socioecosistema costero y cómo estas definen su trayectoria?

En concreto, se busca evidenciar la forma en que los diversos factores de cambio, denominados *drivers* o estresores y *shocks*, afectan a diversos elementos sociales y naturales de una región, a fin de comprender la dinámica de los socioecosistemas como respuesta a varios factores de cambio, dado que son sistemas complejos. De manera específica, se proyecta revelar el papel del cambio de uso del suelo y el cambio climático en el sistema, por ser dos de los estresores reconocidos a nivel mundial. Por otro lado, se pretende demostrar el rol de los servicios ecosistémicos en las actividades productivas, debido a que los beneficios derivados de la naturaleza no están integrados en los precios de mercado y en el bienestar social [Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), 2022], por lo que existe la necesidad de cuantificar este tipo de interacciones.

La obra describe ejemplos de estrategias de adaptación y de políticas públicas (tales como la migración, la diversificación, las políticas sociales y de conservación) en respuesta a los estresores en una región. Con ello se representan algunas capacidades para responder a eventos externos e internos, en el caso de estudio. Por último, se indaga en la importancia de utilizar métodos cualitativos y cuantitativos, así como herramientas de modelación espacial y econométrica.

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados, se analiza el caso de la costa de Oaxaca, en particular las cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco, llamado también a lo largo del libro el complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Cozihua) o, de manera más genérica, cuenca Copalita. La región cubre una superficie total de 268 023 hectáreas, y posee diversos tipos de vegetación, desde bosques templados hasta selva mediana y seca. Asimismo, cuenta con diversas actividades económicas, como la turística, las agropecuarias y agroforestales, y el aprovechamiento forestal. Las principales zonas urbanas son Pluma Hidalgo, asociada con la producción de café, y Huatulco y Santa María Huatulco, vinculadas con la actividad turística. Cada capítulo contiene descripciones más específicas de la zona de estudio. La región es de interés para los objetivos del libro porque mantiene un cierto grado de conservación, registra diversas actividades económicas y enfrenta los embates del crecimiento poblacional y el cambio climático, entre otros estresores. Por otro lado, la región se caracteriza por la tenencia de la tierra principalmente comunal y con sistemas de gobernanza comunitaria, por lo que las acciones locales son de suma importancia.

La primera parte del libro, en sus tres capítulos iniciales, describe la trayectoria histórica y actual de la región, mientras que una segunda parte, en los capítulos 4 a 6, expone los resultados de algunos escenarios futuros y las estrategias que se han utilizado hasta ahora para enfrentar disturbios futuros.

El capítulo 1 ofrece un recuento histórico de los estresores y *shocks* que han existido en la región desde 1980 hasta la fecha y sus efectos biofísicos, sociales y económicos. El capítulo 2 analiza el papel del sistema agroforestal de café bajo sombra en la provisión de servicios ecosistémicos, como la provisión superficial del agua, la retención de sedimentos y el almacenamiento de carbono. El capítulo 3 examina los medios de vida de los hogares en la región y, de manera específica, los determinantes de la migración como una estrategia de vida a lo largo del tiempo.

En la segunda parte del libro, el capítulo 4 se adentra en los escenarios prospectivos de la región, generados mediante la modelación de cambios de uso de suelo y cobertura en los años 1989, 1999, 2011 y 2019, con un modelo que refleja las tendencias actuales y otro que privilegia la conservación de bosques y sistemas agroforestales. El capítulo 5 contiene una modelación basada en agentes para simular los efectos del cambio climático en la producción de café bajo diferentes tipos de manejo: el tradicional, el comercial y el de transición, que varían en función de la cantidad de sombra. El capítulo 6 presenta los logros de un taller participativo encaminado a compartir las estrategias de adaptación y políticas en la región, en un esfuerzo por corroborar varios de los resultados de capítulos anteriores y que deja algunos puntos novedosos que capturan la experiencia local y las posibles estrategias a seguir.

A lo largo de la obra, se observan diversas formas de interacción de los componentes de la sociedad y la naturaleza, así como la trayectoria del socioecosistema de la cuenca Copalita. Los autores de este libro invitan al lector a sumergirse en el mundo de los sistemas complejos y a comprender, a través del estudio de la cuenca Copalita, la dinámica, trayectoria y resiliencia de los socioecosistemas, con la finalidad de contribuir al mejor desarrollo en la región.

REFERENCIAS

- Ávila-Foucat, V. S. [en dictamen], “Diversificación y resiliencia de los hogares rurales”, México, UNAM-IIEC-RedPal.
- Ávila Foucat, V. S., e I. Espejel (coords.) [2020], *Resiliencia de socioecosistemas costeros*, México, UNAM-IIEC-Facultad de Ciencias, <http://www.iiec.unam.mx/sites/www.iiec.unam.mx/files/libros_electronicos/RSC_SAT_0.pdf>.
- Ávila Foucat, V. S., y M. Perevochtchikova (coords.) [2018], *Sistemas socio-ecológicos: marcos analíticos y estudios de caso en Oaxaca, México*, México, UNAM-IIEC, 334.
- Folke, C. *et al.* [2010], “Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability”, *Ecology and Society*, 15(4): 20, <<http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/>>.
- Gómez-Sántiz, F. *et al.* [2021], “Behind the scenes: Scientific networks driving the operationalization of the Social-Ecological System frame-work”, *Science of the Total Environment*, 787: 147-473.
- González-Quintero, C., y V. S. Ávila-Foucat [2019], “Operationalization and measurement of social-ecological resilience: A systematic review”, *Sustainability*, 11(6073): 1-18, <<http://dx.doi.org/10.3390/su11216073>>.
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) [2022], *Summary for Policymakers of the IPBES Methodological Assessment Report on the Diverse Values and Valuation of Nature of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, U. Pascual *et al.* (eds.), Bonn, Alemania, IPBES secretariat, <<https://doi.org/10.5281/zenodo.6522392>>.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) [2015], “Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después

de 2015” [en línea], ONU: 41, <https://reds-sdsn.es/wp-content/uploads/2015/09/7891Transforming-Our-World_ESP.pdf>.

Reyers, B. *et al.* [2022], “The contributions of resilience to reshaping sustainable development”, *Nature Sustainability*, marzo, 5(8): 657-664, <<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00889-6>>.

I. TRAYECTORIAS HISTÓRICAS Y ESTADO ACTUAL DE LA CUENCA COPALITA

1. TRAYECTORIA HISTÓRICA DEL SISTEMA SOCIOECOLÓGICO DE LA CUENCA COPALITA

*Alejandra Ramírez León
Ángel Merlo Galeazzi*

RESUMEN

El estudio de la trayectoria histórica de sistemas socioecológicos posibilita entender a profundidad la manera en que las interacciones complejas entre sociedad y naturaleza evolucionan a lo largo del tiempo y determinan las características actuales de esos sistemas, así como las posibilidades de cambio hacia el futuro. En este capítulo, se explora cómo estudiar la trayectoria histórica de un sistema socioecológico definido a nivel cuenca, donde se anidan diversas actividades humanas que han modificado el entorno a lo largo de 40 años y que también han experimentado las consecuencias de procesos ecológicos y naturales (por ejemplo, los terremotos y huracanes), lo mismo que del cambio climático (como el aumento de temperatura). La presente propuesta para el estudio de la trayectoria histórica abarca la identificación de impulsores de cambio que generan respuestas tanto en el ámbito social como natural, las cuales transforman el entorno y el curso mismo de esa trayectoria. Los impulsores referidos ejercen efectos diferenciados en el tiempo, es decir, pueden percibirse de manera inmediata o a largo plazo. Para el análisis, se tomó el caso de las cuencas Copalita y Huatulco, ubicadas entre la sierra sur y la costa de Oaxaca, donde se ubica el complejo

turístico de Huatulco, y entre cuyas actividades agropecuarias destaca la producción de café de sombra; estas cuencas producen gran riqueza ecosistémica y una diversidad de condiciones socioeconómicas que hacen aún más relevante su estudio. De igual manera, se recabó información mediante entrevistas semiestructuradas a 39 actores clave para los servicios ecosistémicos hídricos y el sistema agroalimentario de café en las cuencas; la información obtenida se sometió a un análisis de contenido mediante el *software* MAXQDA versión 20.4. Los resultados demuestran una trayectoria cambiante: el sistema socioecológico ha transitado entre periodos de crisis y recuperación ocasionados por impulsores económicos, políticos y ambientales. En conclusión, este tipo de estudios puede ser útil para la planeación y toma de decisiones hacia la resiliencia y la sustentabilidad de un sistema socioecológico.

INTRODUCCIÓN

El cambio y la incertidumbre representan características inherentes a los sistemas adaptativos complejos, cuyos componentes se transforman y evolucionan en respuesta a retroalimentaciones y cambios en el contexto de cada sistema. Los sistemas socioecológicos (SSE) poseen memoria y capacidad para aprender de respuestas previas, lo que significa que sus trayectorias anteriores influyen y dan forma a las trayectorias actuales y futuras [Preiser *et al.*, 2018].

Un enfoque aplicado para analizar cambios en el estudio de SSE define la trayectoria como la ruta, el camino o la dirección que toma un sistema al pasar de un estado a otro y su patrón de cambio, y se ubica en un contexto histórico que cambia con el tiempo en función de eventos específicos que perturban el sistema [Ávila Foucat *et al.*, 2020]. En la trayectoria, los cambios de estado surgen cuando se rebasan condiciones de continuidad o el balance (umbrales), mientras que

el estado intermedio entre dos estados se conoce como transición [Castillo-Villanueva y Velázquez-Torres, 2015]. Así, una trayectoria puede mostrar una evolución que no haya implicado un cambio de estado o traspasado un umbral conservando su resiliencia [Ávila Foucat *et al.*, 2020]. Por tanto, la trayectoria histórica de un SSE identifica la evolución respecto del estado actual del sistema.

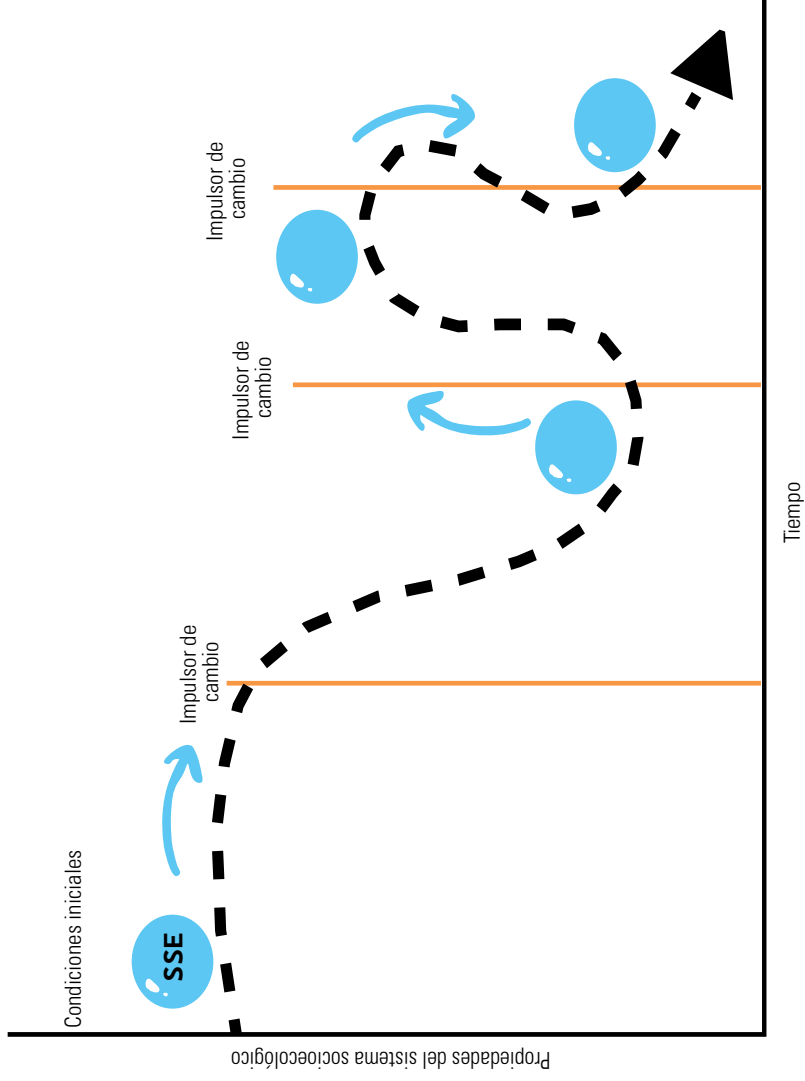
Los estudios de trayectorias de sistemas socioecológicos son un enfoque para revelar los caminos dinámicos de los sistemas tomando en cuenta sus impulsores e interacciones (figura 1.1) [Walker *et al.*, 2002]. A través del estudio de la trayectoria se distinguen los impulsores del cambio que desencadenan las transiciones del SSE: *shocks* y estresores. Los *shocks* son eventos repentinos de gran magnitud que pueden conducir rápidamente a cambios; en contraste, los estresores son fuerzas lentas pero constantes que empujan un sistema hacia su umbral [Biggs *et al.*, 2018; Walker *et al.*, 2012]. Un SSE generalmente recibe la influencia de múltiples impulsores que generan cambios diferenciados de varios grados y escalas dentro del sistema, con lo que se establecen relaciones no lineales entre los componentes [Nguyen *et al.*, 2019]. Los impulsores se denominan “naturales” o “provocados por el hombre”, según su origen; y no ocurren de forma aislada, ya que suelen combinarse o agravarse con otros sucesos.

El SSE puede aprender, combinar experiencia y conocimiento, para ajustar sus respuestas a los impulsores de cambio externos e internos, y continuar desarrollándose dentro del dominio de estabilidad actual o cuenca de atracción, es decir, mantenerse en el mismo estado o evolucionar a otro [Folke *et al.*, 2010]. En otras palabras, el sistema evoluciona y se adapta a los cambios suscitados en las relaciones entre los componentes, lo mismo que entre los componentes y su entorno [Folke *et al.*, 2010; Preiser *et al.*, 2018]. Como parte del aprendizaje, el SSE puede adoptar dos tipos de estrategias: el *afrontamiento*, como una respuesta de reacción desencadenada por

impulsores pasados o actuales; y la *adaptación*, caracterizada por ajustes de gestión deliberados en respuesta a impulsores pasados, actuales y futuros. El afrontamiento es una respuesta inmediata común al cambio, pero no necesariamente preparada para el sistema para cambios futuros; por tanto, es sobre todo eficaz a corto plazo. La adaptación anticipa de forma intencionada cambios futuros o esperados, así que por lo general su eficacia se observa a largo plazo y está enfocada en mantener el *statu quo* del sistema [Speelman *et al.*, 2014; Béné *et al.*, 2016].

El estudio de una trayectoria permite comprender qué determina las transformaciones y la evolución del sistema, para lo cual se requiere conocer los impulsores de cambio, así como establecer qué y de qué manera cambió el sistema. Los sistemas adaptativos complejos como los SSE son bastante autoorganizativos y conservadores [Allen y Holling, 2010], y esta característica da como resultado la identidad basada en la “memoria” central de un sistema; es decir, la identidad de un sistema reside en la presencia espacial y temporal continua de componentes clave y relaciones clave entre sus componentes [Cumming y Collier, 2005]. Sin embargo, el cambio es inevitable y, desde una perspectiva socioecológica, la perturbación puede implicar mejores oportunidades para afrontar las condiciones inciertas derivadas de un socioecosistema [Burkhard *et al.*, 2011]. Por ejemplo, si bien un sistema socioecológico es capaz de adaptarse para mantener una identidad y funcionalidad específica, su trayectoria no necesariamente tenderá hacia la sostenibilidad porque pueden permanecer las condiciones indeseables o una trampa de pobreza o rigidez [Gunderson *et al.*, 2022]. Por tanto, se debe comprender la naturaleza de los eventos que impulsan cambios en un SSE y continuar indagando sobre las complejidades que estos generan a su trayectoria [Moore *et al.*, 2018]. Asimismo, el análisis de la trayectoria histórica de un SSE proporciona información importante de las implicaciones en la planificación del suelo y la toma de decisiones [Nguyen *et al.*, 2019], para llevar la sustentabilidad al sistema en el presente y futuro.

Figura 1.1. Concepto de trayectorias de un sistema socioecológico (SSE). Los impulsores de cambio modifican el estado del SSE, que adquiere nuevas propiedades internas



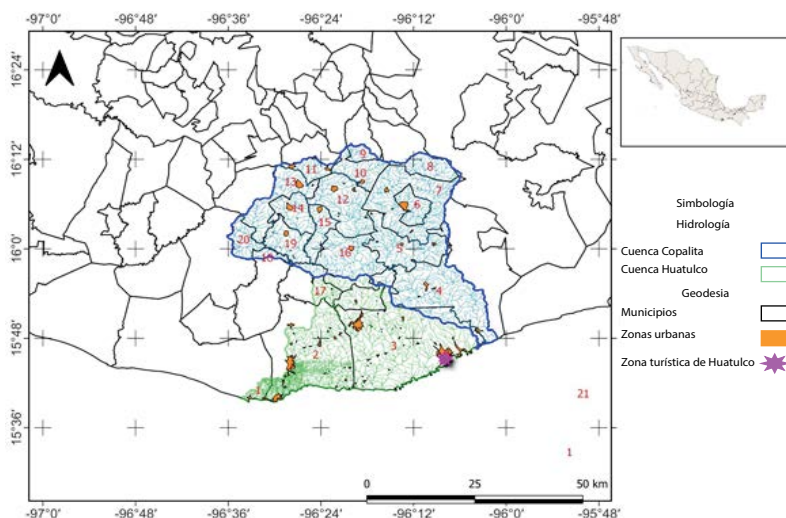
Este capítulo plantea el estudio de la trayectoria histórica de un SSE, con el fin de entender a profundidad las interacciones socioecológicas en una cuenca hidrográfica y cómo han influido estresores y *shocks* diversos en sus condiciones actuales, a efecto de conocer sus retos hacia el futuro. En particular, este análisis se llevó a cabo utilizando como ejemplo el caso de las cuencas Copalita y Huatulco, localizadas entre las regiones costa y sierra sur de Oaxaca, caracterizadas por ser de las regiones hidrológicas mejor conservadas en la región Pacífico Sur de México. Este complejo es diverso en ecosistemas, actividades productivas y condiciones sociales, además de que en él prevalecen conflictos sociales arraigados; también aporta las condiciones relevantes para estudiar la trayectoria histórica que lo ha llevado al estado actual y los retos que enfrenta para su sustentabilidad. Por ello, se plantea la descripción del SSE de las cuencas Copalita y Huatulco, y se muestra el proceso metodológico para identificar estresores y *shocks*, así como las respuestas ante estos. El periodo de estudio abarca 40 años, de 1980 a 2020, considerando el inicio de profundos cambios sociales, políticos y económicos que dejaron huella en toda la región.

ZONA DE ESTUDIO

Condiciones ambientales

Las cuencas Copalita y Huatulco se ubican en la porción sur del estado de Oaxaca, entre los paralelos 15°40' y 16°14' de latitud norte y los meridianos 96°00' y 96°36' de longitud oeste, y cuentan con una superficie de 194 268 hectáreas en conjunto (mapa 1.1). La cuenca Copalita nace en la Sierra Madre del Sur, a 3 350 metros sobre el nivel del mar; desemboca en el Océano Pacífico; cubre una superficie de 152 945 hectáreas, e incluye cinco subcuencas: Copalita, La Venta, Yuviaga, Pluma Hidalgo y Río Hondo. Por su parte, la cuenca

Mapa 1.1. Localización geográfica de las cuencas Copalita y Huatulco, con los municipios que abarcan



Fuente: elaboración propia. 1) Santa María Tonameca; 2) San Pedro Pochutla; 3) Santa María Huatulco; 4) San Miguel del Puerto; 5) Santiago Xanica; 6) San Juan Ozolotepec; 7) San Francisco Ozolotepec; 8) San Pedro Mixtepec; 9) San Juan Mixtepec Distrito 22; 10) Santo Domingo Ozolotepec; 11) San Sebastián Río Hondo; 12) Santa María Ozolotepec; 13) San Mateo Río Hondo; 14) San Miguel Suchixtepec; 15) San Marcial Ozolotepec; 16) San Mateo Piñas; 17) Pluma Hidalgo; 18) Candelaria Loxicha; 19) San Pedro el Alto y 20) San Agustín Loxicha .

Huatulco está formada por los ríos Magdalena y Cruz, consta de una superficie de 41 323 hectáreas y se compone de 10 microcuencas que corren de manera perpendicular a la línea de costa [Escolero, 2006; González-Mora, 2014].

La región exhibe una clara estacionalidad de precipitaciones, y la precipitación durante la estación de lluvias representa alrededor de 91 % del porcentaje anual [Pérez Morga, 2013]. Su orografía explica la diversidad climática y ambiental. Las zonas bajas costeras se caracterizan por climas semicálido húmedo y cálido subhúmedo, al igual que las selvas mediana

subperennifolia y caducifolia que cubren, respectivamente, 14 % y 11 % de la zona de estudio [Colegio de Profesionales Forestales de Oaxaca (CPFO), 2015; Comisión Nacional para la Biodiversidad (Conabio), 2013]. Por encima de los 800 metros sobre el nivel del mar, en las cuencas media y alta, predominan climas templados subhúmedos y se desarrollan ecosistemas como bosques de pino (19 % de la superficie) y bosques mesófilos (18 %), principalmente [CPFO, 2015; Conabio, 2013].

Hidrológicamente se trata de una zona rica en aguas superficiales permanentes, de cauces cortos que no sobrepasan los 42 kilómetros, a excepción del río Copalita cuya longitud de 78.5 kilómetros lo señala como el afluente principal de la región [Ramírez y Mendoza, 2018]. Los procesos hidrológicos se encuentran establecidos por procesos de escurrimientos e infiltración, que a su vez se determinan por la pendiente, el tipo de vegetación y la cobertura de las mismas; por consiguiente, la región presenta un drenaje pluvial pobre cuya mayor cobertura corresponde a las áreas con menores coeficientes de escorrentía y mayores de infiltración [Blancas-Díaz *et al.*, 2021; Escolero, 2006]. En cuanto al agua subterránea, las dos cuencas se unen hidrológicamente por medio del acuífero Huatulco, el cual se define como de tipo libre y heterogéneo en sentidos horizontal y vertical, además de constituirse en su porción superior por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos depositados en los subálveos de los arroyos y en la planicie costera [Comisión Nacional del Agua (Conagua), 2015].

La región es considerada una zona de alto valor ecológico con buen estado de conservación [World Wildlife Fund (WWF), 2009]. Sin embargo, enfrenta deterioro ambiental por la pérdida de masas forestales como resultado del cambio de uso de suelo (CUS) y alteraciones en la hidrodinámica y la calidad de agua de los afluentes. Esos aspectos se relacionan con problemáticas como la contaminación por materia fecal y agroquímicos [González-Mora *et al.*, 2006; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), 2009] y

la modificación de la estructura de los ríos por causa de la extracción de material pétreo [González-Mora *et al.*, 2006; Jiménez, 2005].

Otra amenaza ambiental surge del cambio climático, ya que se ha observado una tendencia al alza en la temperatura media anual, en parte por la decreciente disponibilidad de agua [García Juárez, 2019]. En contraste, se observa un éxito parcial resultante de la poca pérdida de superficie vegetal, gracias al manejo comunitario de los bosques y a la actividad cafetalera de bajo impacto [García Alvarado *et al.*, 2017] y a la aceptación de esquemas compensatorios de Pagos por Servicios Ambientales (PSA) [Rodríguez-Robayo *et al.*, 2016].

Interacciones socioecológicas

En el complejo Copalita y Huatulco confluyen actividades económicas y sociales, así como procesos ambientales diversos que evolucionan y se retroalimentan bajo una gran variedad de condiciones ecológicas y socioeconómicas, con lo que se generan relaciones socioecológicas complejas. Las principales actividades económicas son la agricultura de temporal bajo el sistema de roza, tumba y quema con producción de maíz asociado con frijol, calabaza, tomate, chile y flor de Jamaica; la ganadería extensiva; la cafecultura bajo sombra en un sistema agroforestal primordialmente artesanal; y la actividad forestal privada y comunitaria [García Alvarado *et al.*, 2017; González *et al.*, 2008; Lozano, 2013]. En las partes altas de esta zona, reside población indígena zapoteca y chontal con alto grado de marginación; el tipo de tenencia de la tierra es en su mayoría comunal; y la población se dedica a la cafecultura y agricultura de temporal [Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), 2012; García Alvarado *et al.*, 2017].

Otras actividades económicas son: la silvicultura, concentrada en la parte alta; la pesca, la ganadería y la agricultura tecnificada, en la parte media y baja; y los cultivos de autoconsumo, a lo largo de la cuenca [Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) y Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Pesca y Acuicultura (Sedapa), 2015]. En la zona costera, específicamente en un predio de 20 975 hectáreas expropiado por el gobierno federal en 1984 a favor del Fondo Nacional de Fomento al Turismo (Fonatur), se asienta el desarrollo turístico Centro Integralmente Planeado (CIP) Bahías de Huatulco, señalado como el motor económico de la región al representar el 90 % del producto interno bruto (PIB) del municipio de Huatulco [Fonatur, 2017]. En 2019, el CIP Bahías de Huatulco recibió 632 529 visitantes, correspondientes a una ocupación promedio del 62 % de la capacidad hotelera instalada [Secretaría de Turismo (Sectur), 2019] y una derrama económica aproximada de 9 000 millones de pesos [Centro de Estudios Económicos y Finanzas Públicas (CEEFP), 2020].

La pobreza y la marginación constituyen problemáticas profundas en la región. En 2015, según datos oficiales, 53 % de la población de las cuencas mostraba alto grado de rezago social; 37 %, muy alto grado; y solo 10 %, bajo grado de rezago social [Coneval, 2020a]. En cuanto a la pobreza, en ese mismo año, 87 % de la población de las cuencas Copalita y Huatulco vivía en pobreza, 44 % en pobreza extrema y 42 % en pobreza moderada; asimismo, 87 % de la población percibía ingresos por debajo de la línea de bienestar [Coneval, 2020b]. Esto se ve acentuado por la falta de infraestructura básica y la desigualdad de acceso a servicios de agua potable y alcantarillado. Conforme a los datos del Censo de Población y Vivienda 2020, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi, 2020], ninguno de los municipios que conforman las cuencas alcanza 80 % de abasto y este se efectúa con grandes diferencias regionales.

En el complejo, el cultivo de café se desarrolla en terrenos con topografía accidentada, difíciles de aprovechar para la explotación rentable de otros cultivos [Inegi, 1997]. Esta actividad se arraigó con intensidad en la zona desde su introducción en el siglo XIX y fue su pilar económico hasta la segunda mitad del siglo XX. La producción de café depende de las condiciones biofísicas locales, como la ubicación geográfica, la elevación sobre el nivel del mar, la temperatura y la precipitación promedio, la vegetación, el tipo de suelo y la topografía. Los ecosistemas de las cuencas brindan esas condiciones propicias para el cultivo de café bajo sombra [Comisión Nacional Forestal (Conafor), 2013]; la variedad arábica se ha adaptado al cultivo con árboles de sombra, los cuales son seleccionados entre árboles nativos y frutales aclimatados a los ecosistemas locales. El sistema de cultivo de café predominante es rústico artesanal [García Alvarado *et al.*, 2017], que contribuye a evitar la erosión de los suelos y favorece el desarrollo de la cubierta vegetal, el refugio de la biodiversidad y la infiltración de agua [Sagarpa y Sedapa, 2015].

Para 2015, en el complejo Copalita y Huatulco, 40 % de la superficie cultivada con cafetales se localizaba en la cuenca media, 23 % en la cuenca alta, 21 % en la cuenca baja y 15 % en la parte alta [Sagarpa y Sedapa, 2015]. De igual modo, 50 % de las parcelas de café se concentraba en productores con más de 10 hectáreas (finqueros) en la parte media; 12 %, en productores con parcelas entre 5 y 10 hectáreas, ubicadas en las partes media y baja; y 37 % estaba en manos de 8 240 pequeños agricultores con terrenos menores a cinco hectáreas de propiedad común [Sagarpa y Sedapa, 2015].

En la zona se producen cafés diferenciados, especializados o de origen, además del convencional [Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (Aserca), 2016]. Las variedades de café cultivadas tradicionalmente son Mundo Novo, Caturra y Criollo, en altitudes que varían de los 0 a los 2 600 metros sobre el nivel del mar;

asimismo, desde 2017, se ha iniciado una transición paulatina hacia nuevas variedades híbridas como la Marsellesa [Valencia *et al.*, 2018]. Aunque las plantaciones de café prevalecen, su cantidad ha disminuido de manera significativa en comparación con los mejores años de la producción en la región.

MÉTODO

El estudio de SSE conlleva el uso de métodos que permiten observar y analizar relaciones, patrones y procesos producidos por el comportamiento general del sistema [Preiser *et al.*, 2018]. Para la trayectoria, se buscó describir variables asociadas con los *shocks* y estresores ambientales, sociales y políticos, al igual que con injerencia en los recursos hídricos y la actividad cafetalera de la región.

Las percepciones de cambio sirvieron para determinar la importancia y la repercusión de los impulsores de cambio, ya que las narrativas son expresiones generales que vinculan elementos del sistema [Lynam y Brown, 2012] e identifican impulsores clave de cambios rápidos [Paudel *et al.*, 2019]. Además, las entrevistas posibilitaron comprender el sistema desde el punto de vista de los actores y acceder a su amplio conocimiento del área [Charmaz, 2006].

Colección de datos

Se aplicó un cuestionario dividido en tres secciones, de acuerdo con la clase de información requerida: 1) funciones de la organización, así como tipo de acciones relacionadas con los servicios ecosistémicos hídricos (SEH) y el sistema agroalimentario de café (SAC) en la zona de estudio; 2) problemáticas del agua en la región; y 3) problemáticas en torno a la actividad cafetalera en la zona. En la primera sección se agregaron preguntas

acerca de las principales actividades económicas, los principales problemas ambientales y sus causas. En las secciones 2 y 3, las preguntas sirvieron para identificar los principales estresores y *shocks*, al enfocarse en averiguar qué eventos habían afectado al café y a los servicios hídricos, así como sus causas y consecuencias, y qué hicieron las personas para enfrentarlos. También se examinaron fuentes de información secundaria para complementar los resultados de las entrevistas. En total, se aplicaron 39 entrevistas en julio de 2019 (cuadro 1.1.), las cuales se repitieron de manera presencial en octubre, noviembre y diciembre de 2019, y por vía telefónica en marzo de 2020.

Cuadro 1.1. Tipo de actores entrevistados en 2019 y 2020, para estudiar la trayectoria histórica de las cuencas Copalita y Huatulco (Oaxaca, México)

Tipo de organización	Total	Nombre de las organizaciones
Organización de productores	4	Coordinadora Estatal de Productores de Café de Oaxaca (CEPCO)
		Confederación de Cafetaleros Oaxaqueños
		Yeni Navan
		Coordinadora Nacional de Organizaciones Cafetaleras (CNOC)
Gobierno federal	5	Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI)
		Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp)
		Comisión Nacional del Agua (Conagua)
		Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat)
		Fondo Nacional de Fomento al Turismo (Fonatur)
Organizaciones no gubernamentales	11	Mbis Bin Semillas para la Siembra
		WWF Ciudad de México
		Grupo Autónomo para la Investigación Ambiental (GAIA)
		WWF Oaxaca
		Servicios y Financiamiento Agrícola (Sefia)
		Asociación de Hoteles y Moteles de Huatulco
		Comité de Playas Limpias del Municipio de Santa María Huatulco
		Instituto de la Naturaleza y la Sociedad de Oaxaca (INSO)
		Macuiles Copalita
		Conservación Internacional (CI)
		Terra

continúa...

...continuación del cuadro 1.1.

Tipo de organización	Total	Nombre de las organizaciones
Cafetaleros	4	Finca El Nueve Café Pluma Finca Vista Hermosa Café La Caracola
Academia	2	Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO) Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIDIIR), Unidad Oaxaca
Municipio	5	San Pedro Pochutla (2) Santa María Huatulco (2) San Mateo Piñas
Cooperativas	4	Pueblos y Tradiciones Sistema Comunitario para el Manejo y Protección de la Biodiversidad (Sicobi) Cruz del Monte Senderos y Humedales
Total	39	

Fuente: elaboración propia.

Análisis de datos

El análisis de datos siguió un método mixto deductivo-inductivo, en el que los pasajes de texto se nombraron y clasificaron mediante códigos [Kuckartz y Rädiker, 2019], y se llevó a cabo en tres pasos: codificación, categorización y descripción. La recolección y la codificación de datos fueron procesos iterativos y dinámicos, con triangulación constante de datos para confrontar los resultados y evaluar la confiabilidad y

generalizaciones de la información interpretada [Carvalho Pires de Sousa *et al.*, 2019].

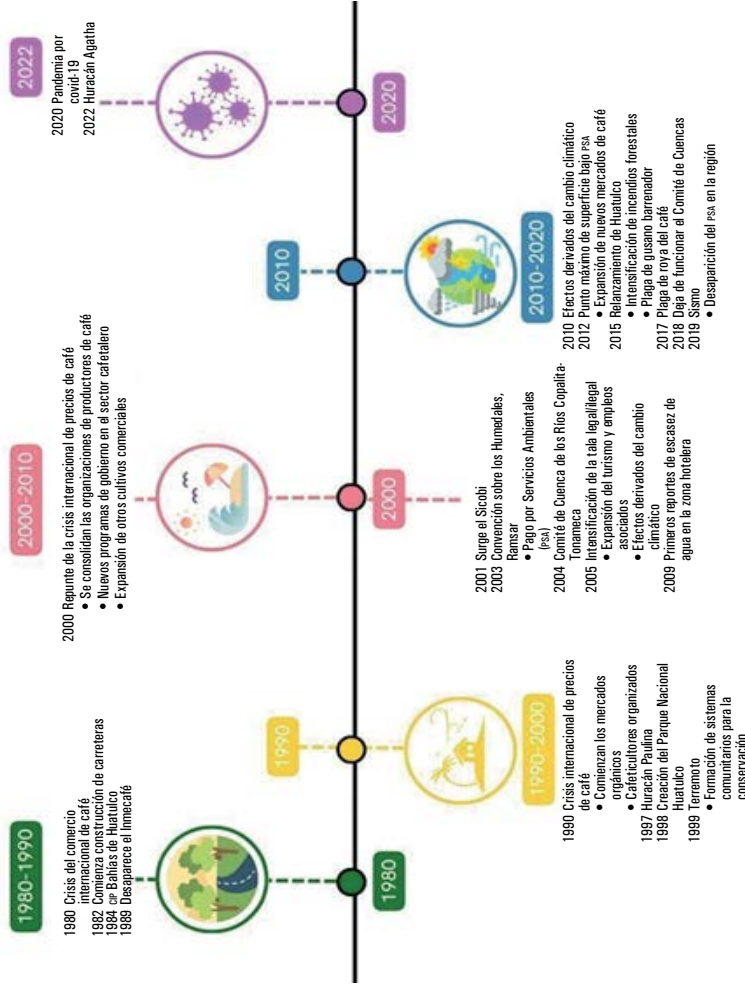
Las entrevistas se transcribieron por medio de Amberscript, y los textos resultantes se analizaron con el *software* MAXQDA versión 20.4, que también se utilizó en la tarea de codificación. Para la identificación de los impulsores y su distribución en el tiempo se asignaron códigos. Asimismo, los estresores y *shocks* se relacionaron con los componentes de los SEH y el sistema agroalimentario de café. Para los SEH se definieron los siguientes componentes: cobertura forestal, cantidad de agua, aspecto hidromorfológico, calidad del agua, infraestructura de acceso y demanda de agua. Los componentes para el SAC fueron: condiciones ecológicas y ambientales, producción de café, procesamiento de café y comercialización de café.

La trayectoria se describió con base en la identificación de impulsores de impacto en las cuencas; así se generaron códigos para diferenciarlos conforme a su definición: los *shocks* son acontecimientos que se producen con rapidez en un momento específico, mientras que los *estresores* ocurren durante periodos de tiempo relativamente más largos. Los datos se organizaron por décadas, desde 1980 hasta 2020, lo que constituye un periodo de 40 años.

RESULTADOS

A lo largo de los 40 años estudiados, se detectaron diversos impulsores que han moldeado las relaciones socioecológicas vigentes en la región. A continuación, se describen los impulsores principales, siguiendo una línea de tiempo organizada por décadas (figura 1.2).

Figura 1.2. Línea del tiempo de los principales impulsores de cambio que han moldeado las relaciones socioecológicas vigentes en las cuencas Copalita y Huatulco



Fuente: elaboración propia con Canva. Immacafé: Instituto Mexicano del Café; cIP: Centro Integralmente Planeado; Sicobi: Sistema Comunitario para el Manejo y Protección de la Biodiversidad.

Década de los ochenta: el café y la llegada del turismo

En 1958, se creó el Instituto Mexicano del Café (Inmecafé), cuyas actividades cobraron especial relevancia en 1968 [Paré, 1990]. Este instituto coordinó la producción, el procesamiento y la comercialización de café en México; también se responsabilizó de asegurar los precios, acopiar café, construir infraestructura, así como investigar y brindar financiamiento, asesoría técnica, capacitación e insumos. A lo largo de la década de los setenta, el Inmecafé impulsó la expansión del cultivo a pequeña escala desde la parte baja hacia la parte alta de las cuencas Copalita y Huatulco. Tal situación incrementó la producción de café en esta y otras regiones, convirtiendo a México en el cuarto productor de café del mundo [Pérez-Grovas G., 1999] durante la década de los ochenta.

El Inmecafé se disolvió en 1989, en medio de la suspensión de los convenios internacionales del café y la sobreoferta internacional de café. A nivel nacional, recibió acusaciones de corrupción e ineficiencia; y el gobierno federal redujo las empresas estatales y el gasto público del sector agrícola nacional. La infraestructura de procesamiento se abandonó o se vendió a grandes empresas cafetaleras; en algunos casos, el gobierno donó algunos centros de procesamiento propiedad del Inmecafé a pequeños propietarios. Así, se inició la reestructuración política y comercial que derivó en la liberalización económica del sector [Pérez-Grovas G., 1999]. Al mismo tiempo, el precio internacional del café se sumergía en una de sus crisis más profundas provocada también por la reestructuración internacional y la sobreoferta. El precio sufrió varios altibajos y llegó a estar muy por debajo de los costos de producción [Jaffee, 2019].

El establecimiento del Centro Integralmente Planeado Bahías de Huatulco se convirtió en el evento socioecológico más grande de la región y condujo a reorganizar la relación entre la población y sus recursos forestales e hidrológicos, al menos

en la cuenca baja. El CIP Bahías de Huatulco trajo consigo un aumento exponencial de la demanda de recursos naturales, como agua y grava para la construcción extraídas del río Copalita [Talledos Sánchez, 2012], lo mismo que un flujo masivo de turistas que, según datos oficiales del periodo 1992-1996, ascendía a 13 850 personas por año, lo que representaba una ocupación del 52.2 % de las 2 133 habitaciones ofertadas [Sectur, 2019]. La instalación del CIP Bahías de Huatulco requirió preparar terrenos y vías de comunicación, como carreteras y caminos, y la construcción del aeropuerto internacional de Huatulco. También introdujo el turismo y los puestos de trabajo asociados a él, lo que llevó a los cafeticultores a buscar nuevas fuentes de ingresos en este sector. Muchos cafeticultores abandonaron las plantaciones y dejaron de cultivar café por falta de rentabilidad, lo que agudizó la pobreza y la exclusión social [Jaffee, 2019] y reactivó enfermedades y plagas como la broca del café [Barrera, 2005].

Década de los noventa: grandes cambios políticos, económicos, sociales y ambientales

Un gran impulsor de cambios en esta década fue el huracán Paulina, que tocó tierra el 8 de octubre de 1997 [StormCatcher, 2019] cerca de Puerto Escondido, Oaxaca, y causó daños importantes en la zona: pérdida de 180 000 hectáreas de cultivos (incluidas 60 000 hectáreas de café), 80 000 hectáreas de bosques y 5 400 viviendas; y afectación de 54 000 viviendas [Britrán Bitrán, 2001]. Este huracán ha sido descrito como un hito geomorfológico e hidrológico en la región, ya que aumentó la desertificación por la pérdida de la cobertura vegetal en el suelo [Conabio, 2020]. Según testimonios recabados, disminuyó significativamente la disponibilidad de agua; cambiaron los cursos de ríos y arroyos; desaparecieron estanques y manantiales, y se acidificaron los suelos. La acidez reactivó

enfermedades y plagas de cultivos de café, lo que afectó de nuevo a las plantaciones [Lozano Trejo *et al.*, 2015] y redujo la productividad de los cafetos debido a la lixiviación de los suelos [Noriega Altamirano *et al.*, 2014]. Asimismo, el huracán Paulina aceleró el proceso migratorio en las partes altas de las cuencas, de manera que aumentó el abandono y la pérdida de grandes cantidades de plantaciones de café, lo que se tradujo en agudización de la pobreza y migración en la región. No obstante, la población creció 46 %, y alcanzó los 98 685 habitantes distribuidos en 20 306 viviendas (55 % más que en el periodo anterior) [Inegi, 2000].

En la década de los noventa, surgieron organizaciones de cafeticultores, conformadas por cooperativas, que absorbieron varias funciones del Inmecafé, tales como la Coordinadora Estatal de Productores de Café de Oaxaca (CEPCO) y la Coordinadora Nacional de Organizaciones Cafetaleras (CNOC) [CEPCO, 2019]. En 1990, estas organizaciones habían asumido la totalidad de las tareas que estaban a cargo del extinto Inmecafé; además, formaron canales de comercialización sin intermediarios, al igual que esquemas de gobernanza para gestionar y participar en programas gubernamentales. También se intensificó la comercialización de cultivos hasta entonces secundarios, que crecían en las plantaciones de café, tales como el plátano.

Después del huracán Paulina, un fuerte terremoto azotó la región en 1999. Los terremotos están asociados con deslizamientos de tierra y pérdida de suelo. El terremoto del 30 de septiembre de 1999 ocasionó disminución o desaparición del agua de manantiales debido a fracturas geológicas, y con ello planteó desafíos para los habitantes, que tuvieron que adaptar su infraestructura a las nuevas condiciones.

Un año antes, se estableció el área natural protegida Parque Nacional Huatulco (PNH), que de inmediato se convirtió en un área de conservación de la cobertura vegetal, los procesos hidrológicos, la fauna local y las propiedades estéticas de

los bosques secos. Además, el parque aumentó significativamente los SEH culturales, a través de eventos recreativos y educativos [Cid Rodríguez, 2006]. En el mismo año, las organizaciones comunitarias, apoyadas por organizaciones no gubernamentales (ONG), desarrollaron los esfuerzos de conservación, que se enfocaban principalmente en la seguridad alimentaria y la restauración de suelos a través de la agroecología y el turismo alternativo, y crearon sistemas comunitarios para áreas naturales protegidas.

Primera década del siglo XXI: relativa estabilidad

Durante la primera década del siglo XXI, se mantuvo la crisis internacional de precios de café. La diversificación de cultivos aumentó en la parte baja de las cuencas Copalita y Huatulco, donde se accedía fácilmente a mercados locales, y se extendió hacia las partes media y alta de las cuencas. La diversificación implicó la producción de plátano, cacao, miel, aguacate o durazno, entre otros; además, se reactivaron cultivos de autoconsumo como maíz, frijol, papa, chile y hortalizas. El café pasó a ser un cultivo secundario o se abandonó definitivamente, y creció el empleo en el sector servicios debido al incremento de visitas en el CIP Bahías de Huatulco, aunque se mantuvo la migración.

El café cultivado en la parte alta de las cuencas ingresó al mercado de especialidad y se convirtió en una importante fuente de ingresos, mientras que en la parte baja el cultivo de café disminuyó paulatinamente. Al mismo tiempo, los cafeticultores de las partes baja y media comenzaron a desarrollar proyectos de ecoturismo en sus fincas; otros participaban en el mercado certificado de café (orgánico y comercio justo, por ejemplo); y otros más empezaron a tostar y envasar café para vender en la zona turística, los mercados locales y el mercado nacional.

En 2004, se oficializó el Comité de Cuenca de los Ríos Copalita-Tonameca, con atribuciones para discutir los problemas y la toma de decisiones horizontal entre varios actores [Conagua, 2007]. También se implementaron algunas políticas públicas de conservación por parte del gobierno federal, entre las cuales el programa de Pago por Servicios Ambientales figura como la política pública de mayor trascendencia. Este programa se inició en 2003 y alcanzó su punto máximo en 2012, con 22 500 hectáreas entregadas para acciones de conservación, reforestación, monitoreo y combate de incendios forestales a cambio de una compensación económica [Conafor, 2019].

Si bien los efectos del cambio climático se perciben con mayor intensidad en la segunda década del siglo XXI, desde los primeros años del siglo ya se observa un aumento de las temperaturas regionales y modificaciones en el patrón de lluvias. Estas condiciones climáticas disminuyeron la productividad de las plantaciones de café que aún se conservaban. Desde 2009, se registraron periodos de escasez de agua en la zona turística; la priorización del abastecimiento a los hoteles generó restricciones de agua para los pobladores, principalmente en las semanas coincidentes con la temporada alta de semana santa. Estudios locales destacaron la contribución del café de sombra en la preservación del servicio ecosistémico de infiltración de agua, así como de la conservación de ecosistemas nativos [Lozano-Trejo *et al.*, 2020; Ramos Olivera, 2015]; las mayores tasas de deforestación se encontraron fuera del rango altitudinal del café (400-1600 metros sobre el nivel del mar) [Sagarpa y Sedapa, 2015].

Entre 2010 y 2020: enfrentando la incertidumbre

En 2010, la producción promedio de café era 44 % menor que en 2003, aunque para 2019 la producción disminuyó 30 % con respecto a 2010 [Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

(Sader), 2020]. Además, el precio medio local del café se colocó 76 % más arriba que en 2010, y la producción de café orgánico aumentó entre 2007 y 2015 con precios promedio superiores al del café convencional [Higuera Ciapara y Rivera Ramírez, 2018]. Esta leve recuperación de precios influyó positivamente entre los cafeticultores que habían mantenido la producción de café: mejoraron su manejo para hacerlo más productivo o ajustaron sus procesos de transformación, con el objeto de ofrecer un café de alta calidad. Al mismo tiempo, se intensificó la expansión de otros cultivos comerciales y de empleos ligados al turismo, esto último como consecuencia del aumento de visitas al CIP Bahías de Huatulco. Los proyectos turísticos se ampliaron de las partes bajas a las medias y altas, a través de iniciativas de turismo rural y ecoturismo, especialmente por el impulso del CIP Bahías de Huatulco. Sin embargo, esto elevó el consumo y la competencia por el agua, la generación de residuos sólidos y las emisiones de aguas residuales.

En 2015, el gusano descortezador dañó la calidad y cobertura del bosque de pino en la parte alta de las cuencas, y a ello se sumó un alza significativa de la tala por parte de empresas que aprovecharon la falta de seguimiento de la extracción de madera. El control del descortezador y el incremento de las áreas dedicadas a la agricultura tradicional (26 % de la superficie) convirtieron los incendios en un importante estresor. Según datos disponibles [Jurado Álvarez, 2022], en el lapso de 2010-2014 se quemaron 25 hectáreas, y esta cifra se elevó a 2 200 hectáreas para el periodo 2015-2020.

El cambio acentuado en las condiciones climáticas locales se tornó adverso para el cultivo del café. Específicamente, el aumento de la temperatura contribuyó a la expansión de la roya del café que brotó en 2015 y se agudizó en 2017. Según la opinión de los cafeticultores, la roya suscitó una nueva ola de abandono de cultivos y profundizó la diversificación económica, por las condiciones inciertas para la producción de café. Asimismo, las tormentas torrenciales vinculadas con la

intensificación del cambio climático causaron la pérdida de pozos destinados al abasto de agua potable para las poblaciones urbanas y rurales, que debieron ser reemplazados.

Por otro lado, en 2018 se celebraron en México elecciones presidenciales que implicaron la reducción del alcance de programas relacionados con el cultivo del café y los servicios ambientales; y, por consiguiente, motivaron importantes cambios en los esquemas de gobernanza locales y en las acciones de conservación. Respecto de la roya, los gobiernos federal y local impulsaron activamente la renovación de cafetos, con variedades de café cuyo cultivo requiere un manejo más intensivo y, en algunos casos, menos árboles de sombra. Diversas organizaciones no gubernamentales y organizaciones de productores de café han mostrado su preocupación por los posibles efectos de este nuevo esquema de manejo en las condiciones ambientales y ecológicas. El Pago por Servicios Ambientales también se contrajo de manera sustancial, y el financiamiento del Comité de Cuenca limitó su poder de acción en la región.

Finalmente, en el año 2020, la pandemia por covid-19 trajo efectos positivos y negativos para la región, ya que la actividad turística disminuyó, mientras que la producción y comercialización de café mantuvo su dinamismo a pesar de las restricciones. Asimismo, la reducción del turismo favoreció la recuperación de algunos ecosistemas perturbados por los visitantes. En 2022, el paso del huracán Agatha ocasionó una nueva crisis para la producción de café y la provisión del recurso hídrico.

CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se han determinado los principales impulsores de cambio del sistema socioecológico ubicado en las cuencas Copalita y Huatulco, con fundamento en la memoria histórica, reconstruida tomando en consideración

bases de datos y revisión documental, lo mismo que las percepciones de los actores. El SSE ha mostrado una trayectoria de cambio en la que se repiten etapas de inestabilidad y breves periodos de recuperación, debido principalmente a la diversidad de impulsores de cambio en la región a lo largo de 40 años. En particular, se observó que *shocks* como huracanes y sismos ejercen fuertes impactos en la dinámica socioecológica de la región.

Por otro lado, los vínculos entre actividades humanas y servicios ecosistémicos son profundos y muy estrechos; las actividades humanas resultan decisivas para enfrentar el cambio, pero sus efectos son inciertos y pueden ser positivos o negativos. A lo largo del tiempo se observan cambios en el sistema con puntos de inflexión y, por tanto, variaciones en su resiliencia. Finalmente, el estudio de trayectorias permite identificar impulsores de cambio y las respuestas del sistema a los mismos, facilitando la planeación territorial hacia la resiliencia.

REFERENCIAS

- Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (Aserca) [2016], “Avanza México en la producción de alimentos orgánicos certificados”, México, consultado el 10 de julio de 2023, <<https://cutt.ly/MwoeRec5>>.
- Allen, C. R., y C. S. Holling [2010], “Novelty, adaptive capacity, and resilience”, *Ecology and Society*, 15(3): 24.
- Ávila Foucat, V. S. *et al.* [2020], “Capítulo 5. Trayectoria de los socioecosistemas costeros”, V. S. Ávila Foucat e I. Espejel (coords.), *Resiliencia de socioecosistemas costeros*, México, UNAM-IIEC-Facultad de Ciencias, 134-167, <https://www.iiec.unam.mx/sites/www.iiec.unam.mx/files/libros_electronicos/RSC_SAT_0.pdf>.

- Barrera, J. F. [2005], "Investigación sobre la broca del café en México: Logros, retos y perspectivas", J. F. Barrera (ed.), *Simposio sobre Situación Actual y Perspectivas de la Investigación y Manejo de la Broca del Café en Costa Rica, Cuba, Guatemala y México*, México, Sociedad Mexicana de Entomología/El Colegio de la Frontera Sur, 1-13.
- Béné, C. *et al.* [2016], "Is resilience a useful concept in the context of food security and nutrition programmes? Some conceptual and practical considerations", *Food Security*, 8(1): 123-138, <<https://doi.org/10.1007/s12571-015-0526-x>>.
- Biggs, R. *et al.* [2018], "The Regime Shifts Database: A framework for analyzing regime shifts in social-ecological systems", *Ecology and Society*, 23(3): 9, <<https://doi.org/10.5751/ES-10264-230309>>.
- Bitrán Bitrán, D. [2001], *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*, México, Segob/Cenapred.
- Blancas-Díaz, E. E. *et al.* [2021], "Suministro y calidad del agua de escurrimientos en la selva mediana subcaducifolia de la costa de Oaxaca, México", *Revista Chapingo*, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 28(1): 89-103, <<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.063>>.
- Burkhard, B. *et al.* [2011], "Adapting the adaptive cycle: Hypotheses on the development of ecosystem properties and services", *Ecological Modelling*, 222 (16): 2878-2890, <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.016>>.
- Carvalho Pires de Sousa, D. *et al.* [2019], "Qualitative Data Analysis", U. P. Albuquerque *et al.* (eds.), *Methods and techniques in ethnobiology and ethnoecology*, Springer Protocols, Handbook, Nueva York, Humana Press, 45-54, <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-8919-5_5>.
- Castillo-Villanueva, L., y D. Velázquez Torres [2015], "Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia", *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 17(2): 11-32, <<https://quivera.uaemex.mx/article/view/9811>>.

- Centro de Estudios Económicos y Finanzas Públicas (CEEFP) [2020], “Derrama económica del sector turístico en el estado de Oaxaca”, México, Congreso del Estado Libre y Soberano de Oaxaca-CEEFP, 7.
- Charmaz, K. [2006], *Constructing grounded theory: A practical guide through qualitative analysis*, California, Sage.
- Cid Rodríguez, M. R. P. [2006], *Interpretación de la realidad socioambiental del Parque Nacional Huatulco para la elaboración de una propuesta educativa*, tesis de maestría, Guadalajara, Universidad de Guadalajara.
- Colegio de Profesionales Forestales de Oaxaca (CPFO) [2015], “Estudio de cuenca de abasto para el desarrollo industrial forestal maderable de la región Copalita, Oaxaca”, Oaxaca, CPFO, 205, <<https://cutt.ly/cwiEWDL2>>.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua) [2015], “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Huatulco [2011], Estado de Oaxaca”, México, Conagua, 26, <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/oaxaca/DR_2011.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua) [2007], “Reglas de integración, organización y funcionamiento del consejo de cuenca de la costa de Oaxaca”, consultado el 25 de marzo de 2022, <<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/contenido/documentos/09%20Reglas%20Costa%20de%20Oaxaca.pdf>>.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) [2019], “Pago por Servicios Ambientales”, México, Conafor, <<https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/pago-por-servicios-ambientales>>.
- Comisión Nacional Forestal (Conafor) [2013], “Sistemas Agroforestales Maderables en México”, México, Conafor, 1-157, consultado el 20 de mayo de 2021, <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/126296/Sistemas_agroforestales_maderables_en_Mexico.pdf>.
- Comisión Nacional para la Biodiversidad (Conabio) [2020], “Caso Huracán Paulina”, consultado el 25 de marzo de

- 2022, <https://www.biodiversidad.gob.mx/monitoreo/m_ecosistemas/huracan-paulina>.
- Comisión Nacional para la Biodiversidad (Conabio) [2013], “Sierra Sur y costa de Oaxaca. RTP-129”, Oaxaca, Conabio, 499-503, <<https://cutt.ly/2wiEYdUK>>.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) [2020a], “Pobreza a nivel municipio 2010-2020”, México, Coneval, consultado el 25 de marzo de 2022, <<https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobreza-municipio-2010-2020.aspx>>.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) [2020b], “¿Qué es el rezago social? Índice de Rezago Social”, México, Coneval, consultado el 25 de marzo de 2022, <<https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Que-es-el-indice-de-rezago-social.aspx>>.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) [2012], “Informe de pobreza y evaluación en el estado de Oaxaca 2012”, México, Coneval, 2012, <<https://cutt.ly/jwiEVrdI>>.
- Coordinadora Estatal de Productores de Café de Oaxaca (CEPCO) [2019], “Informe de Actividades 2017-2019”, Oaxaca, CEPCO, 272.
- Cumming, G. S., y J. Collier [2005], “Change and identity in complex systems”, *Ecology and Society*, 10(1): 29.
- Escolero, O. [2006], “Estudio hidrológico para evaluar el flujo base en las cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco”, México, WWF-México, 90.
- Folke, C. *et al.* [2010], “Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability”, *Ecology and Society*, 15(4), <<https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420>>.
- Fondo Nacional de Fomento al Turismo (Fonatur) [2017], “Relanzamiento del CIP Huatulco”, México, Fonatur, 136, <<https://cutt.ly/owiTbg3t>>.
- García Alvarado, M. E. *et al.* [2017], “Caracterización del agroecosistema de café bajo sombra en la cuenca del río

- Copalita”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, enero-junio, 40: 635-648.
- García Juárez, N. [2019], *Sustentabilidad de la cuenca del río Copalita, bajo el enfoque de bienes y servicios ecosistémicos*, tesis de maestría, Oaxaca, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca.
- González, M. A. *et al.* [2008], “El sistema comunitario para la biodiversidad: una estrategia para el manejo comunitario del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco”, R. Paré, D. Robinson y M. A. González (coords.), *Gestión de cuencas y servicios ambientales. Perspectivas comunitarias y ciudadanas*, Oaxaca, Semarnat, 231-258.
- González-Mora, I. D. [2014], “Régimen de caudales y los procesos biológicos y ecológicos. Caso de las Cuencas Copalita, Zimatán y Coyula, Oaxaca”, 1er. Simposio Nacional de Ecohidrología, Querétaro, México.
- González-Mora, I. D. *et al.* [2006], “Problemática ambiental y socioeconómica en las cuencas Copalita, Zimatán y Huatulco, Oaxaca: la perspectiva de los especialistas”, documento interno, Oaxaca, WWF-México: 20.
- Gunderson, L. H. *et al.* (eds.) [2022], *Applied panarchy: Applications and diffusion across disciplines*, Washington, Island Press.
- Higuera Ciapara, I., y J. Rivera Ramírez [2018], *Chiapas: problemáticas del sector cafetalero*, Guadalajara, CIATEJ, <<https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/645>>.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (Inegi) [1997], *El café en el estado de Oaxaca*, Aguascalientes, Inegi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) [2020], “Censo de Población y Vivienda 2020”, <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) [2000], “Censo de Población y Vivienda 2000”, <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/#Microdatos>>.

- Jaffee, D. [2019], *Cosechando Justicia: café de comercio justo, sustentabilidad y sobrevivencia*, California, Daniel Jaffee, <<https://doi.org/10.15760/soc-01>>.
- Jiménez, J. [2005], “Análisis regional y procesos actuales en las cuencas Copalita, Zimatán y Huatulco (Programa bosques mexicanos, Sierra Costera de Oaxaca)”, documento interno, WWF: 49.
- Jurado Álvarez, J. O. [2022], “Estadísticas Incendios Forestales 2015-2022”, abril, México, Conafor, <<https://snif.cnf.gob.mx/download/estadisticas-incendios-forestales-2015-2022/>>.
- Kuckartz, U., y S. Rädiker [2019], *Analyzing qualitative data with MAXQDA. Text, audio, and video*, Nueva York, Springer.
- Lozano, S. [2013], “Plan rector cuenca emblemática río Copalita”, documento interno, Oaxaca, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa).
- Lozano Trejo, S. *et al.* [2015], “Cambio climático desde la perspectiva productiva de los productores de maíz y café en la subcuenca del río Copalita”, documento interno, México, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa)/Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Forestal, Pesca y Acuacultura (Sedapa), 124.
- Lozano-Trejo, S. *et al.* [2020], “Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México”, *Terra Latinoamericana*, 38(1): 57-66, <<https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>>.
- Lynam, T., y K. Brown [2012], “Mental models in human-environment interactions: Theory, policy implications, and methodological explorations”, *Ecology and Society*, 17(3): 24, <<https://doi.org/10.5751/ES-04257-170324>>.
- Moore, A. W. *et al.* [2018], “Toward an integrative framework for local development path analysis”, *Ecology and Society*, 23(2): 13, <<https://doi.org/10.5751/ES-10029-230213>>.

- Nguyen, M. T. *et al.* [2019], “Drivers of change and adaptation pathways of agricultural systems facing increased salinity intrusion in coastal areas of the Mekong and Red River deltas in Vietnam”, *Environmental Science and Policy*, febrero, 92: 331-348, <<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.016>>.
- Noriega Altamirano, G. *et al.* [2014], “Intensificación de la producción en la agricultura orgánica: caso café”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1): 163-169.
- Paré Paré, L. [1990], “¿Adelgazamiento del Inmecafé o de los pequeños productores de café?”, *Sociológica*, México, UAM, 5(13): 9.
- Paudel, B. *et al.* [2019], “Farmers’ perceptions of agricultural land use changes in Nepal and their major drivers”, *Journal of Environmental Management*, 235: 432-441, <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.091>>.
- Pérez Morga, N. [2013], *Hidroclimatología de las cuencas del sureste mexicano con énfasis en los flujos superficiales, precipitación y teleconexiones*, tesis doctoral, Baja California, CICESE.
- Pérez-Grovas G., V. [1999], “La producción y comercialización de café en México. ¿Opción viable para los pequeños productores?”, *Red Mexicana de Acción Frente al Libre Comercio*, 967: 1-13.
- Preiser, R. *et al.* [2018], “Social-ecological systems as complex adaptive systems: organizing principles for advancing research methods and approaches”, *Ecology and Society*, 23(4): 46.
- Ramírez, E. J., y M. Mendoza [2018], “Caracterización del paisaje sumergido de ‘Bahías del Parque Nacional Huatulco y su aporte de gastos máximos de la cuenca río Copalita’”, Oaxaca, tesis, Universidad del Mar Campus Puerto Ángel, 68.
- Ramos Olivera, F. [2015], *Calidad ecológica, fragilidad natural y vulnerabilidad (climática y antropogénica) de la*

- sub-cuenca Río Yuviaga*, tesis de maestría, Oaxaca, Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca, 63.
- Rodríguez-Robayo, K. J. *et al.* [2016], “Indigenous communities’ perception regarding payments for environmental services programme in Oaxaca Mexico”, *Ecosystem Services*, 17: 163-171.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) y Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Pesca y Acuacultura (Sedapa) [2015], “Situación del sector rural en la región de la subcuenca del Río Copalita”, documento interno, México, Sagarpa/Sedapa, 99.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader) [2020], “Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera”, México, Sader, consultado el 25 de mayo de 2021, <<https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>>.
- Secretaría de Turismo (Sectur) [2019], “Compendio estadístico del turismo en México 2019”, México, Sectur, <https://www.datatur.sectur.gob.mx/Documentos%20compartidos/COMPENDIO_2019.pdf>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) [2009], “Plan de Acción de las Cuencas Copalita-Zimatlán-Huatulco”, documento interno, Oaxaca, Semarnat: 31.
- Speelman, E. N. *et al.* [2014], “From coping to adaptation to economic and institutional change. Trajectories of change in land-use management and social organization in a Biosphere Reserve community, Mexico”, *Land Use Policy*, 41: 31-44, <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.04.014>>.
- StormCatcher [2019], “Huracán Paulina 1997”, 20 de agosto, consultado el 10 de julio de 2023, <<https://stormcatcher.com.mx/blog/2019/08/20/huracan-paulina-1997/>>.
- Talledos Sánchez, É. [2012], “La imposición de un espacio: de La Crucecita a Bahías de Huatulco”, *Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales*, 57(216): 119-142, <<https://doi.org/10.22201/fcpys.2448492xe.2012.216.34842>>.

- Valencia, V. *et al.* [2018], “Smallholder response to environmental change: Impacts of coffee leaf rust in a forest frontier in Mexico”, *Land Use Policy*, 79: 463-474, <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.020>>.
- Walker, B. H. *et al.* [2012], “Drivers, ‘slow’ variables, ‘fast’ variables, shocks, and resilience”, *Ecology and Society*, 17(3):30, <<https://doi.org/10.5751/ES-05063-170330>>.
- Walker, B. *et al.* [2002], “Resilience management in social-ecological systems: A working hypothesis for a participatory approach”, *Conservation Ecology*, 6(1): 14, <<https://doi.org/10.5751/ES-00356-060114>>.
- World Wildlife Fund (WWF) [2009], “Memoria del taller: Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco, 2009. Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México”, I. D. González Mora, G. De la Lanza Espino y R. Sánchez Navarro (coordinadores del taller), Oaxaca, WWF, <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/03/Memoria_CE-CZH-2009.pdf>.

2. ESTADO ACTUAL DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN DENTRO DE LAS FINCAS CAFETALERAS DE LA CUENCA DEL RÍO COPALITA

Pierre Mokondoko Delgadillo
José Mauricio Galeana-Pizaña

RESUMEN

Los sistemas agroforestales (SAF) poseen una alta capacidad de proveer múltiples servicios ecosistémicos (SE), incluidos los sistemas bajo sombra de *Coffea arabica* L. Por su estructura arbórea, se asemejan a los bosques y las selvas, ya que brindan funciones ecológicas que, además de mantener la producción, contribuyen a regular los gases de efecto invernadero, la cantidad de agua y la erosión del suelo. Sin embargo, la crisis del café y la epidemia de roya, aunadas a la intensificación de manejo de los sistemas agroforestales, han contribuido a la eliminación de la cobertura arbórea (sombra) y la transición a otros cultivos o usos del suelo; en conjunto con la variabilidad climática, estos disturbios generan la pérdida de SE clave.

A pesar de su importancia, es escaso el conocimiento científico sobre las repercusiones de la intensificación en el manejo de los sistemas agroforestales y de los factores biofísicos locales en los servicios ecosistémicos. En este sentido, el presente capítulo se orienta a mapear la provisión superficial del agua, la retención de sedimentos y el almacenamiento de carbono, en la región cafetalera de Copalita, en Oaxaca.

Para ello, se usaron herramientas de análisis espacial y modelación espacialmente explícita (INVEST), encaminadas a cuantificar los SE en tres tipos de manejo (comercial, de transición y tradicional) y entender la magnitud en la cual los SAF brindan servicios, con respecto a otros usos del suelo. Los resultados evidencian un efecto positivo de los árboles de sombra en la provisión de servicios ecosistémicos. La retención de sedimentos y el almacenamiento de carbono se observan más en los sistemas con porcentajes de sombra superiores a 50 %, lo que indica pérdidas bajo los sistemas comerciales. Al comparar esos niveles de provisión con los de otros usos del suelo, se encontraron similitudes con los correspondientes a los bosques y las selvas. Estos resultados proporcionan conocimiento valioso para el diseño de SAF óptimos para la provisión de SE en áreas críticas y para ubicar fincas con mayor probabilidad de contar con incentivos económicos que aseguren su conservación.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas naturales y transformados en estado de equilibrio son capaces de regular las condiciones ambientales y adecuarlas a las actividades económicas, además de proveer servicios ecosistémicos indispensables para el bienestar humano [Kuyah *et al.*, 2019; Cerda *et al.*, 2020]. Los SE son funciones ecosistémicas resultantes de las combinaciones de procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales contribuyen a la autorregulación de los ecosistemas [Daily, 1997; Bhagabati *et al.*, 2014]. Las distintas combinaciones de estos procesos dan lugar a múltiples beneficios directos e indirectos que satisfacen necesidades de la sociedad, ya que sus efectos se experimentan dentro y fuera del sitio donde ocurren [Groot *et al.*, 2010]. Tales beneficios se pueden clasificar en cuatro categorías [Millennium Ecosystem Assessment (MEA), 2005; Sukhdev *et al.*, 2014]: 1) *provisión* de alimentos, materias primas, medicinas, agua,

entre otros; 2) *regulación* del clima, la calidad del aire y la erosión, así como captura y almacenamiento de carbono, conservación de la fertilidad del suelo, polinización y control de plagas y de enfermedades; 3) *culturales* o relacionados con actividades físicas, espirituales, religiosas, turísticas y de apreciación estética; y 4) de *soporte*, que implica generación de suelos, hábitat de especies, entre otros indispensables para la producción de los demás servicios ecosistémicos.

No obstante lo anterior, la acelerada expansión de las actividades productivas y la intensificación en el manejo de los sistemas agrícolas y pecuarios han ocasionado cambios significativos en el clima y aumentos drásticos en las tasas de deforestación en las últimas tres décadas [Metzger *et al.*, 2006; Lawler *et al.*, 2014]. En consecuencia, diversos estudios han reportado altos niveles de degradación de los ecosistemas boscosos y pérdidas en la biodiversidad, que amenazan cada vez más la provisión de servicios ecosistémicos clave [Donatti *et al.*, 2019] y que se relacionan con el crecimiento poblacional, el aumento en la demanda de SE y el desarrollo de modelos económicos, con un consecuente manejo menos sustentable de los recursos naturales [Locatelli *et al.*, 2014]. Ante este escenario, la provisión de SE depende cada vez más de los sistemas capaces de combinar las prácticas de manejo de árboles y otras plantas asociadas con un cultivo principal, para aprovechar la biodiversidad y los procesos ecológicos a nivel de parcela o de paisaje, con el fin de soportar la producción [Jackson *et al.*, 2010; Villarreyna *et al.*, 2020]. Por consiguiente, los sistemas agroforestales han ganado gran interés científico en los últimos años como estrategias para la conservación de múltiples SE y de adaptación ante el efecto adverso de la variabilidad climática [Jha *et al.*, 2014].

Si bien la existencia de los SAF se debe a la transformación de los ecosistemas, en la actualidad se reconoce su alta capacidad de proveer SE, lo mismo que los sistemas bajo sombra de *Coffea arabica* L. [Meylan *et al.*, 2017]. Los cafetales bajo

sombra, que por su estructura arbórea se asemejan a los bosques y las selvas, pueden replicar muchas de las funciones ecológicas que, además de mantener la producción, contribuyen a regular los gases de efecto invernadero, la cantidad de agua y la erosión de los suelos [Sarmiento-Soler *et al.*, 2020]. En comparación con los monocultivos y los cafetales a pleno sol, la cobertura arbórea aporta hojarasca y materia orgánica (producto de las podas), las cuales influyen directamente en el ciclo hidrológico, al aminorar los impactos de las gotas de lluvia y escorrentía superficial; estos procesos ayudan a reducir la evapotranspiración, protegen los suelos de la erosión hídrica y de los movimientos de masa (deslizamientos o deslizaves), favorecen la infiltración del agua, mantienen la humedad del suelo y controlan el flujo de los ríos [Beenhouwer *et al.*, 2013; Barral *et al.*, 2015; Torralba *et al.*, 2016]. El microclima que generan los árboles de sombra crea condiciones favorables para una producción sostenible y menor dependencia de insumos externos, al mismo tiempo que contribuye a la regulación de la temperatura, humedad del aire, viento y cantidad de luz que entra en las parcelas [López-Bravo *et al.*, 2012; Koutouleas *et al.*, 2022]. Por último, los árboles de sombra y sus raíces tienen un efecto directo en la diversificación, el reciclaje de nutrientes, el control de plagas y la acumulación de dióxido de carbono (CO_2) a lo largo de años de fotosíntesis y generación de biomasa [Cerdán *et al.*, 2012; Valencia *et al.*, 2018; Avelino *et al.*, 2020].

La disponibilidad de información científica acerca del impacto del manejo intensificado de la sombra sobre la provisión de SE aún es limitada [Byrd *et al.*, 2015]. También son pocos los resultados de investigaciones que explican en qué magnitud y forma la cobertura arbórea y los patrones espaciales de las características locales que condicionan a los SE (factores biofísicos climáticos, biogeográficos y topográficos) ejercen un efecto combinado en los cafetales de sombra [Freire Santos *et al.*, 2019]. Por otro lado, a pesar de que la cuantificación

de los SE representa una de las áreas de mayor crecimiento en la investigación ecológica, en gran parte de las evaluaciones de los SAF se ha ignorado el uso de modelos espacialmente explícitos para el mapeo de servicios, en especial debido a la dificultad y a los costos elevados de medir de forma directa los niveles de provisión de SE, además de la necesidad de una gran cantidad de datos específicos por parte de algunos modelos computacionales [Vigerstol y Aukema, 2011]. De este modo, se han reportado limitaciones importantes en las aproximaciones que asumen relaciones directas entre la presencia de la cobertura arbórea y la provisión de servicios ecosistémicos [Martínez-Harms y Balvanera, 2012; Sharps *et al.*, 2017].

Lo anterior resalta la necesidad de efectuar más estudios espacialmente explícitos, con el fin de identificar las prácticas de manejo que favorecen la adaptación de los cafetales a cambios climáticos y reducir los riesgos que enfrentarán los productores en el futuro. Desde 2015, el café es uno de los cultivos de mayor importancia económica, social y ambiental en México, y su producción abarca en conjunto más de 806 000 hectáreas, en 12 estados [Barral *et al.*, 2015]. De esta superficie, 83 % se cultiva con un manejo tradicional (caracterizado por parcelas con menos de cinco hectáreas), mientras que el resto corresponde a policultivos comerciales y a pleno sol [Fernández y Méndez, 2019]. Oaxaca se ubicó en 2020 entre los principales estados productores de café [Torres Castillo *et al.*, 2020], con más de 90 % de su producción bajo sombra diversificada; para el mismo año, datos oficiales reportaron que cerca de 60 % de sus productores presentaban índices de baja a mediana marginación y 40 % de alta a muy alta marginación [Consejo Nacional de Población (Conapo), 2012].

A pesar de la importancia del café bajo sombra y sus SE, la crisis del café (expresada en la disminución de ingresos y aumento de costos) y la epidemia de roya (*Hemileia vastatrix*) entre 2012 y 2013 han promovido la intensificación del manejo bajo sombra y la adopción de variedades más resistentes, para

incrementar la producción y combatir la roya [Hausermann, 2012]. Algunas consecuencias de estas estrategias han sido la eliminación de árboles de sombra y, en casos extremos, el abandono de cafetales y la transición a otros cultivos o usos del suelo [Torres Castillo *et al.*, 2020; Harvey *et al.*, 2021]. Todo ello, aunado a la variabilidad climática, ha desencadenado la degradación de la vegetación en los cafetales y los ecosistemas circundantes, con la consiguiente pérdida de SE clave [Anderzén *et al.*, 2020]. Considerando estas circunstancias, para asegurar la sostenibilidad de los productores de café es importante entender cómo los árboles de sombra proveen SE en diferentes tipos de manejo.

La capacidad de los cafetales bajo sombra para ofrecer servicios se modifica según su manejo. Así cobra sentido el objetivo del presente capítulo, que se enfoca en mapear la provisión de tres servicios ecosistémicos de regulación, incluidos la provisión superficial del agua, la retención de sedimentos y el almacenamiento de carbono en tres tipos de manejo (comercial, de transición y tradicional), para la región cafetalera de Copalita, en Oaxaca. De ninguna manera se pretende promover los cafetales como un mecanismo de conservación que reemplace bosques y selvas, sino alentar su preservación para mantener la cobertura arbórea, de modo que sirva como mecanismo de conectividad entre los fragmentos de vegetación remanentes y se asegure la continua provisión de múltiples servicios ecosistémicos.

MÉTODO

Descripción del área de estudio

El área de estudio comprende la región cafetalera de las cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco, en Oaxaca, de aquí en adelante nombrada la región cafetalera de Copalita. Esta región ocupa una superficie de 13 909 hectáreas y se

ubica en un intervalo altitudinal de 230-1970 metros sobre el nivel del mar, en las laderas de la Sierra Sur de Oaxaca, entre 15°50'26.63" y 16°09'09.92" de latitud Norte, y entre 95°54'09.20" y 96°37'02.38" de longitud Oeste (mapa 2.1). El clima es semicálido húmedo, con abundantes lluvias en verano (según el Atlas Climático de México y Áreas Adyacentes), con una precipitación anual entre los 1216 y 2500 milímetros, mientras que la temperatura media anual oscila entre 18 °C y 27 °C; la precipitación y la temperatura se obtuvieron al extrapolar los datos de estaciones meteorológicas aledañas. De acuerdo con mapas de usos del suelo y vegetación generados para la región, predominan los bosques templados (pino y encino), la selva baja caducifolia, las selvas medianas (subcaducifolia y perennifolia) y los manglares. Además del café, la ganadería extensiva y los cultivos agrícolas (sobre todo el maíz) redujeron de forma importante la distribución de los distintos tipos de vegetación en el periodo 1989-2018. Las zonas urbanas aún no representan un porcentaje importante de la superficie (2 324 hectáreas, correspondiente a 0.82 %); sin embargo, los asentamientos humanos aumentaron 164 %, para el mismo periodo (1989-2018). Por tanto, el potencial de provisión de SE en la región se ha visto afectado por la pérdida de la vegetación, los procesos de erosión y la disminución en la disponibilidad de agua, que tienen como causas principales los cambios de uso del suelo, la intensificación de los cafetales y el cambio climático.

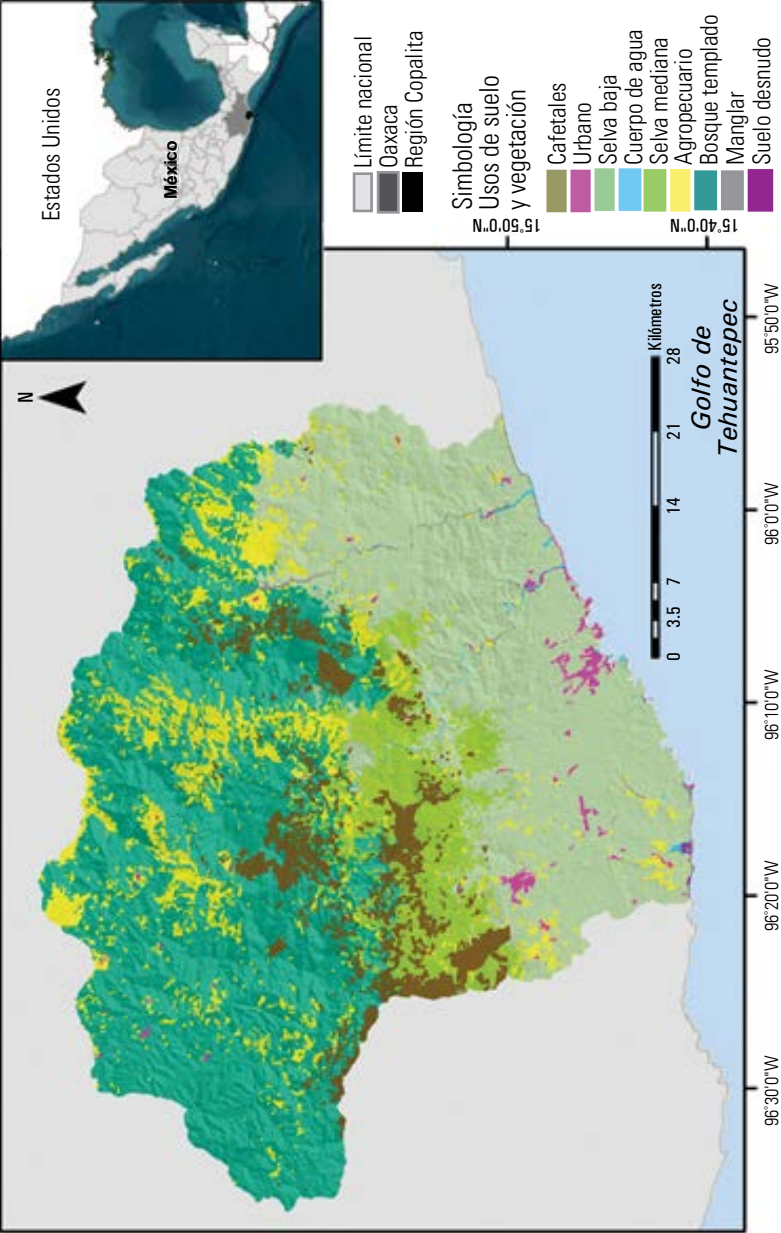
La región se caracteriza por una producción de café bajo sombra, con una tipología de manejo reconocida en forma cuantitativa, ya sea como sistema comercial (16 %), de transición (44 %) o tradicional (40 %). La mayoría de estos sistemas se desarrollan en terrenos con pendientes fuertes (15-35 grados), con riesgo de erosión hídrica o con degradación de suelos; ubicados en 600-1700 metros sobre el nivel del mar y en niveles de medio a alto en la sombra [García Alvarado *et al.*, 2017]. Según los datos obtenidos, los sistemas comerciales registran niveles

de sombra inferiores a 45 %; los de transición, entre 45 % y 60 %; y los tradicionales, más de 61 por ciento. Las parcelas se encuentran en regiones montañosas y muy accidentadas, donde el clima, el relieve, la altitud y los árboles de sombra influyen en la cantidad y la variabilidad espacial de los patrones de provisión de los diferentes servicios ecosistémicos.

Generalidades de la modelación espacialmente explícita de los SE

Es importante contar con herramientas que permitan incorporar las características y procesos ecológicos que dan sustento a los servicios ecosistémicos; y entender cómo varía a través del tiempo el efecto de los cambios en el uso del suelo, la intensificación de los cafetales y el clima. Para ello, se han desarrollado diversas herramientas de análisis espacial, basadas en algoritmos computacionales robustos y en sistemas de información geográfica (SIG), para la modelación de los SE [Maes *et al.*, 2012]. Uno de los métodos más usados consiste en cuantificar la provisión de SE por medio de funciones de producción que relacionan el flujo del SE y sus variables biofísicas regionales [Vigerstol y Aukema, 2011]. El *software* INVEST (del inglés, *Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs*), de código abierto, desarrollado por el Natural Capital Project de la Universidad de Stanford, proporciona un conjunto de submodelos para el análisis espaciotemporal, al combinar datos cartográficos (climáticos, edafológicos y topográficos) en distintas escalas espaciales con mapas de los diferentes tipos de uso del suelo y vegetación para los años disponibles [Tallis y Polasky, 2011; Sharps *et al.*, 2017]. Dada su sensibilidad ante los mapas de uso de suelo y vegetación, es posible evaluar cómo la deforestación, la reducción de la sombra, el crecimiento urbano o la frontera agrícola y otros cambios de manejo afectan la dinámica de los parámetros biofísicos, como los suelos, la temperatura y la evapotranspiración, entre otros [Mokondoko *et al.*, 2018].

Mapa 2.1. Ubicación del área de estudio, en las cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco (Oaxaca, México), y la distribución de los diferentes tipos de uso del suelo y vegetación



Fuente: elaboración propia.

El mapeo se centra en tres SE que proveen los cafetales y los ecosistemas de la región, y cuya selección obedece a dos razones: en primer lugar, son servicios esenciales con un considerable impacto en la producción de café y resultan estrechamente afectados por las prácticas de manejo; en segundo lugar, cuentan con mayor probabilidad de ser aceptados en los programas de Pago por Servicios Ambientales (PSA). Los servicios de provisión superficial del agua y retención de sedimentos son clave, ya que su disminución limita los rendimientos [Villarino *et al.*, 2019]; asimismo, el carbono almacenado, como una proporción de la biomasa, contribuye con la nutrición del suelo y la regulación de los gases de efecto invernadero [Cerdeña *et al.*, 2020]. Por ello, se parametrizaron los modelos de *water yield* y *sediment delivery ratio* de INVEST y un modelo de producción, a fin de estimar el contenido de carbono en la vegetación aérea. A continuación, se detallan los requisitos de información, así como el funcionamiento de cada uno de los modelos.

MODELACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Provisión superficial del agua

El modelo *water yield* estima la disponibilidad de agua en una cuenca, parcela o pixel, con base en la simulación espacialmente distribuida de los determinantes del balance hidrológico [Redhead *et al.*, 2016]; incluye la precipitación, las propiedades de almacenamiento de agua del suelo y el efecto de la cobertura vegetal en la evapotranspiración y contribución aguas arriba [Tallis y Polasky, 2011]. En concordancia con el modelo, la provisión de agua depende de las aportaciones de la precipitación: mientras que una parte vuelve a la atmósfera por efecto de la evapotranspiración, el resto se

infiltra incorporándose al sistema de aguas subterráneas. Por tanto, se obtiene una visión acerca de cómo los cambios en el manejo de la cobertura vegetal afectan la producción anual de agua. Su aplicación es simple, pero la cuantificación de sus parámetros suele ser complicada, sobre todo por la falta de mediciones directas en campo. Por ese motivo, el proceso de modelación con información cartográfica y en consonancia con el flujo metodológico se describe a continuación.

Primero, se generó un mapa de *precipitación* media anual (milímetros, en formato ráster), sustentado en el análisis de las series de tiempo de las estaciones climatológicas de los últimos 40 años, las cuales se extrajeron de la base de datos del Extractor Rápido de Información Climatológica versión III (ERIC III) y de la base de datos climatológica nacional (sistema Clicom, del inglés *CLimate COMputing project*). La precipitación promedio anual (milímetros por año⁻¹) fue extrapolada mediante el método de interpolación IDW del *Spatial Analysis* versión 10.6.0 de ArcMap (mapa 2.2). Posteriormente, se generó un mapa del *contenido volumétrico del agua* en el suelo (milímetros, en formato ráster), tomando en cuenta la información de las propiedades físicas del suelo (porcentaje de arenas, limos y arcillas), los porcentajes de materia orgánica y la humedad del suelo, obtenidos del conjunto nacional de datos vectoriales edafológicos y alfanuméricos serie II. Para el cálculo de la fracción de agua acumulada en cada perfil de suelo (PAWC, del inglés *plant available water capacity*), se utilizó el *software Soil Water Characteristics* [Saxton *et al.*, 1986]. Los resultados se extrapolaron con el método de interpolación Kriging, en una resolución espacial de 30 metros. El cálculo de la *evapotranspiración potencial* (milímetros por año⁻¹, en formato ráster) se llevó a cabo mediante la paquetería Metric™ (del inglés *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution using Internalized Calibration*), en el lenguaje estadístico R versión 4.1.2; esta metodología se apoya en las diferencias

entre los siguientes datos: temperatura del aire anual de las estaciones; valores de flujo de calor derivado de las imágenes de satélite Sentinel 2A, en particular las bandas de infrarrojos de onda corta; flujos de radiación espectral; índices de vegetación, como índice de área foliar (IAF), y el índice diferencial de agua normalizado (NDWI, del inglés *normalized difference water index*); y coeficientes de evapotranspiración para cada uno de los usos de suelo [Mokondoko *et al.*, 2018].

Posteriormente, se llevó a cabo el cálculo de la *profundidad del suelo* o profundidad a la que el suelo permite el crecimiento de raíces (milímetros, en formato ráster). En este caso, se consideraron los datos de profundidad promedio del suelo, obtenidos del ISRIC (*World Soil Information: Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean*, Soterlac), los cuales se sometieron a un proceso de reducción de escala (SDS, del inglés *Statistical Downscaling Model*) basado en regresiones lineales, mediante una interpolación de la profundidad de perfiles (Kriging) y la paquetería *machispline* del software R. También se utilizó el mapa de uso de suelo y vegetación del año 2018, generado para el proyecto en una resolución espacial de 30 metros, con imágenes Landsat8 ETM+ (instrumento *Enhanced Thematic Mapper Plus*, del Satélite Landsat 8). Por último, para la delimitación de cuencas, se empleó el modelo digital del terreno (metros, en formato ráster), con resolución espacial de 15 metros, y la paquetería *Hydrology* del *Spatial Analysis* en ArcMap; así fue posible derivar las capas de dirección de flujo, acumulación de flujo, red de drenaje y microcuencas.

Retención de sedimentos

El modelo SDR (del inglés *sediment delivery ratio*) permite estimar la capacidad de una parcela, cuenca o pixel para exportar

sedimentos, con base en la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, del inglés *universal soil loss equation*), a la vez que determina la capacidad del paisaje para retener los sedimentos [Hamel *et al.*, 2015]. En función de las propiedades del suelo y la precipitación, las partículas de agua liberadas quedan sujetas a la acción del escurrimiento; la probabilidad de que lleguen al cauce de un río depende de las interacciones entre la forma de la cuenca, la pendiente y la capacidad de la vegetación para retener los sedimentos cuenca arriba y exportar los sedimentos cuenca abajo [Terrado *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015]. Dicha modelación se diseñó conforme al flujo metodológico que se explica a continuación.

En primer lugar, se generó un mapa de *erosividad de la lluvia* ($\text{Mj mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en formato ráster) que representa la intensidad de lluvia o la fuerza cinética de las gotas de lluvia para desprender partículas de suelo. La erosividad se estimó con los datos de precipitación media mensual de las estaciones y el método de Renard (1993), en función del cálculo de la ecuación modificada de Fourier. El factor de *erodabilidad del suelo* ($\text{Mg h Mj}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por acción del agua de lluvia, se calculó con los datos de textura del suelo y el método de Albers [Flanagan y Nearing, 1995]. En este caso, se recurrió al *modelo digital del terreno* (MDT), ajustado por el método de relleno de espacios de error de sumideros (valores muy bajos) y puntas (valores altos), para eliminar las discontinuidades de la red de drenajes o aquellas zonas donde no era posible que el agua drenara en alguna dirección, con el fin de asegurar la dirección y acumulación de flujo del agua. Con base en estos valores, el modelo especificó *la longitud y el largo de la pendiente*. Finalmente, se requirió hallar datos bibliográficos para los factores de prácticas de apoyo a la conservación de los suelos (P) y manejo de cultivos (C).

Almacenamiento de carbono

El modelo se fundamenta en la importancia de la vegetación arbórea y arbustiva para la captura de dióxido de carbono (C), mediante la generación de biomasa. Por ello, se estimó la *biomasa aérea* (BA) mediante la información dasométrica (diámetro de los árboles a la altura del pecho) registrada en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (2009-2014), de la Comisión Nacional Forestal (Conafor), para 60 conglomerados monitoreados. Los conglomerados están basados en el monitoreo de cuatro unidades de muestreo secundarias circulares, dispuestas en forma equidistante de una Y invertida, cada una con una superficie de 400 metros cuadrados y a una distancia de 45.15 metros. La información levantada en estas unidades consta del nombre científico y común de la especie, el diámetro normalizado (DN) y la altura total (A) por árbol.

Las estimaciones del contenido de carbono en la biomasa se extrajeron de la aplicación de modelos de regresión que relacionan el contenido de carbono con el volumen de la biomasa, de acuerdo con las especies propuestas en el Inventario Estatal. Las estimaciones de biomasa por hectárea se realizaron con la metodología de Šmelko y Merganič [2008], la cual incluye un estimador de media de razones, donde el numerador corresponde al total de C considerando cada una de las unidades de muestreo, y el denominador se refiere a la superficie total muestreada, como se indica a continuación:

$$\hat{R} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_i} = \quad (1)$$

Una vez obtenidas las estimaciones de C en la biomasa, a nivel de conglomerado, se recurrió al modelo de regresión Kriging para generar un continuo y conocer la distribución espacial de ambos almacenes en las microcuencas. El método Kriging es un modelo de interpolación híbrida que combina

métodos de regresión lineal en los residuales de la regresión [Galeana-Pizaña *et al.*, 2021]. En este caso, las predicciones de la deriva y de los residuos se generan por separado, para luego integrarlas [Galeana-Pizaña *et al.*, 2014] como se muestra a continuación:

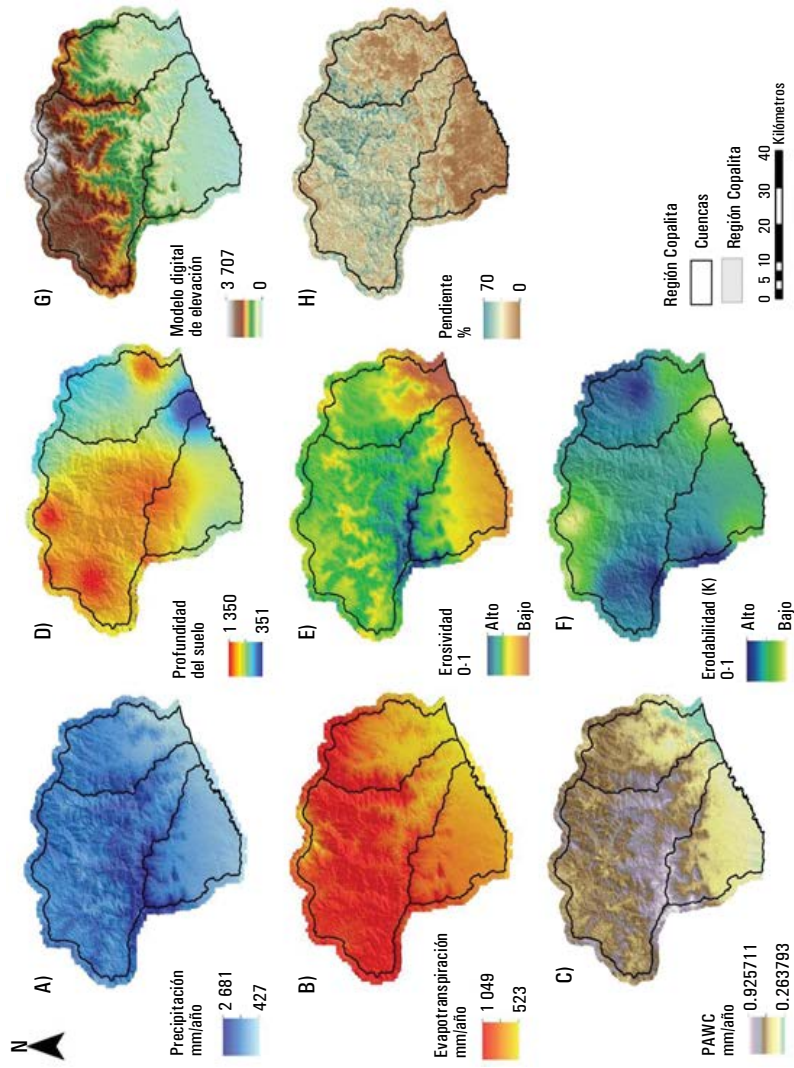
$$\begin{aligned} \hat{z}RK(S_0) = & \sum_{k=0}^p \hat{\beta}_k * q_k(S_0) + (\sum_{i=1}^n \omega_i \varepsilon(S_0)) \\ & + \sum_{j=1}^n \omega_{2j} Z_2(S_i) \end{aligned} \quad (2)$$

En la segunda ecuación, $\hat{z}RK(S_0)$ es la estimación puntual de la variable en una ubicación espacial desconocida; $\hat{\beta}_k$, los coeficientes del modelo; q_k , el número de variables auxiliares; $\omega_i(S_0)$, los pesos determinados por el semivariograma; y ε , los residuales de la regresión [Galeana-Pizaña *et al.*, 2014]. Para modelar la biomasa aérea se empleó como variable secundaria el *Enhanced Vegetation Index* (EVI; $r = 0.68$), con imágenes Landsat 8. Después, se seleccionó aleatoriamente 50 % de los conglomerados y los perfiles del suelo para calibrar la RK. El porcentaje restante permitió validar los modelos [Arámbula, 2008], y esta verificación se realizó por medio del error cuadrático medio (ECM).

Información base y análisis estadísticos

Las capas se proyectaron en el sistema de coordenadas universal de Mercator (UTM14), Datum y elipsoide de referencia WGS-84. Asimismo, se analizaron y transformaron con el *software* ArcMap, en una resolución espacial de 30 metros y una estructura de pixel de 16 *bits*, en el caso de las capas ráster; los conjuntos vectoriales se trabajaron en una escala de 1:250 000. El mapa 2.2 muestra la distribución espacial de las principales capas cartográficas de los modelos.

Mapa 2.2. Distribución espacial de las variables usadas en la modelación superficial del agua (A-D) y la retención de sedimentos (E-H), región Copalita (Oaxaca, México)

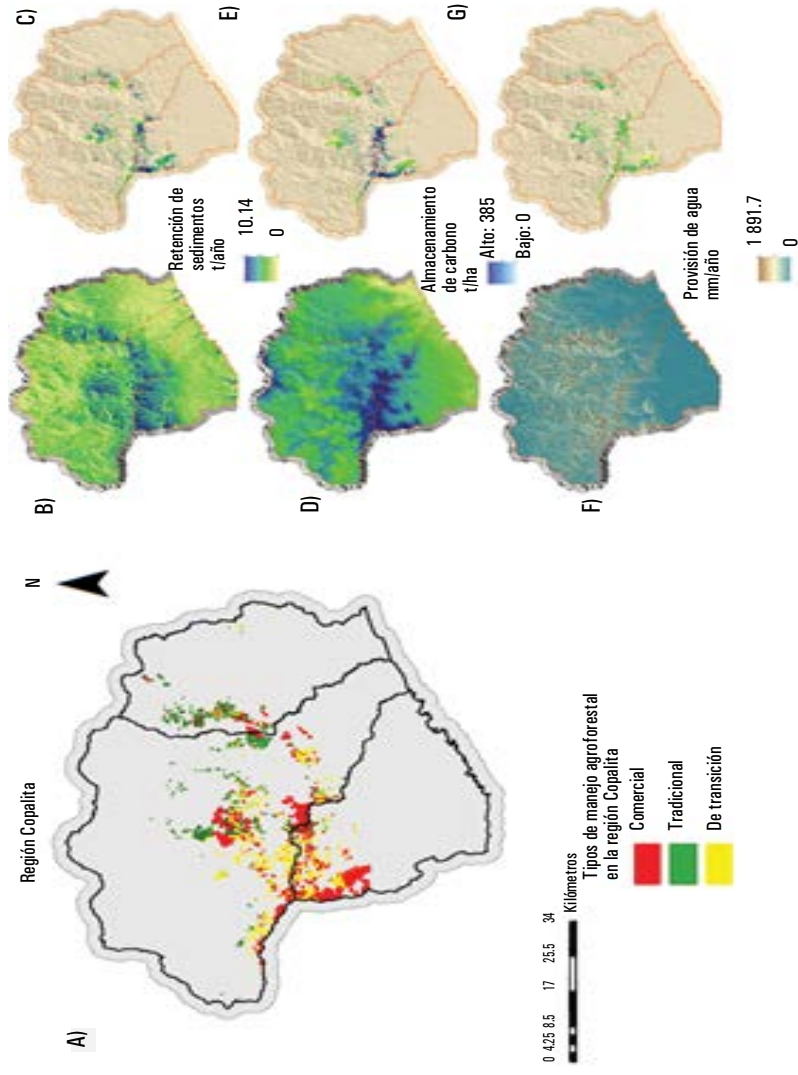


Fuente: elaboración propia. PAWC: contenido de agua disponible para las plantas (del inglés, *plant available water content*).

RESULTADOS

Los modelos brindan información relevante acerca de la distribución espacial de los servicios ecosistémicos a lo largo de la región cafetalera (a nivel de parcela) y en las tres cuencas (a nivel de pixel). Con el propósito de analizar los patrones de distribución espacial de los niveles de provisión de cada servicio ecosistémico (en unidades biofísicas), se describen primero los patrones generales asociados a la distribución de las variables consideradas en los modelos, y después el nivel de provisión de SE dentro de los tres tipos de manejo de los cafetales; finalmente, se comparan los niveles de provisión de SE dentro de los sistemas agroforestales, con respecto a los otros usos del suelo y vegetación de la región Copalita. El mapa 2.3 muestra los mapas de distribución espacial de los servicios ecosistémicos. La provisión superficial del agua osciló entre 40 y 1 891 milímetros por año⁻¹ (promedio de $1\,007 \pm 280$ milímetros por año⁻¹). Las zonas con mayor producción de agua se ubicaron en la parte media de las cuencas, donde la selva media y los cafetales bajo sombra coinciden espacialmente con las áreas de mayor precipitación. Los valores medios a bajos correspondieron a las partes bajas y altas de las cuencas, donde la evapotranspiración es más alta, debido a la alta temperatura y radiación solar. En cuanto a la retención de sedimento, los bosques y las selvas jugaron un papel importante como barrera frente al desplazamiento de suelos en las cercanías de los cauces de los ríos y, en particular, en las zonas montañosas, donde la lluvia y la pendiente de las laderas incrementa la erosión de los suelos y el escurrimiento. La retención de sedimentos osciló entre 0 y 98.50 t ha⁻¹ año⁻¹. El análisis de C en la biomasa aérea señaló un valor promedio de 34.56 t de C ha⁻¹ y el modelo espacial indicó un total de 297 964 803 t de C ha⁻¹ almacenado en la vegetación para 2018. El error cuadrático medio del modelado espacial para la biomasa aérea fue de 22.26 t de C ha⁻¹, mientras que para el carbono orgánico en el suelo (COS) se obtuvo un valor de 48.33 t de C ha⁻¹.

Mapa 2.3. Distribución espacial de tipos de manejo y de provisión de los servicios ecosistémicos, a nivel de paisaje y en las parcelas cafetaleras, región Copalita (Oaxaca, México)



Fuente: elaboración propia.

Efectos de la intensificación sobre la provisión de SE

Para el mejor diseño de los cafetales, es preciso que el conocimiento de los efectos del manejo de la sombra sobre los servicios ecosistémicos se refuerce con un análisis dirigido a identificar los sistemas más exitosos, es decir, aquellos capaces de alcanzar valores altos de provisión y, por tanto, con posibilidades de transformarse en zonas elegibles para los Pagos por Servicios Ambientales (PSA).

La figura 2.3 muestra la distribución de los niveles de provisión de servicios ecosistémicos dentro de los cafetales y la distribución espacial de los manejos identificados. Los análisis demostraron que los sistemas tradicionales y los de transición pueden proveer por lo menos dos SE simultáneamente, mientras que los sistemas comerciales ofrecen valores altos en la provisión superficial del agua. Los sistemas con manejo comercial y de transición (sombra especializada) mostraron niveles significativamente más altos (1113 y 1119 milímetros por año⁻¹, en ese orden), en comparación con los sistemas tradicionales, que proveen un promedio de 854 ± 294 milímetros por año⁻¹.

Tales resultados indican que los sistemas comerciales y de transición coinciden con las mayores precipitaciones y que los sistemas con mayor porcentaje de sombra juegan un papel importante al incrementar los niveles de evapotranspiración. Los sistemas con mayor porcentaje de sombra (de transición y tradicionales) alcanzaron niveles más altos de retención de sedimentos y almacenamiento de carbono ($13.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $52.6 \text{ t de C ha}^{-1}$ y $12.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $45.3 \text{ t de C ha}^{-1}$, respectivamente); y se ubicaron en las laderas con mayor cobertura vegetal. Cabe mencionar que no se encontraron diferencias importantes entre los tres tipos de manejo para estos servicios ecosistémicos.

Provisión de SE en los SAF, con respecto a otros usos del suelo

De acuerdo con el cuadro 2.1, al comparar los niveles de provisión de servicios ecosistémicos en diversos usos del suelo, se encontró una provisión similar entre los sistemas agroforestales, los bosques templados y las selvas. El valor más alto en la provisión superficial del agua recayó espacialmente en la selva mediana, seguida por los sistemas agroforestales y los bosques templados. Los niveles de menor producción de agua correspondieron a las áreas urbanas, el suelo desnudo y los sistemas agropecuarios. En cuanto a la retención de sedimento, los bosques templados, las selvas medianas, los SAF y las selvas bajas registraron los niveles más altos, en ese orden. El nivel de almacenamiento de carbono en los SAF quedó en 16.1 t de C ha⁻¹, superior al de los sistemas agropecuarios, pero ligeramente inferior al de las selvas.

Cuadro 2.1. Resumen de estadísticos descriptivos de la provisión de servicios ecosistémicos en los diferentes usos de suelo y vegetación, y en los tipos de manejo (región Copalita, Oaxaca, México)

Usos de suelo	Provisión de agua		Retención de sedimentos		Almacenamiento de carbono	
	Media	± DS	Media	± DS	Media	± DS
Urbano	472.44	171.6	3.13	0.02	17.84	5.3
Selva baja	711.20	214.7	13.51	0.84	34.94	5.9
Cuerpo de agua	265.60	251.1	9.61	0.98	5.64	7.8
Selva mediana	1 169.36	198.3	17.99	3.05	51.51	7.9
Sistema agropecuario	592.55	214.9	12.33	2.94	29.73	5.5
Bosque templado	711.20	208.1	22.12	2.94	91.30	7.5
Manglar	414.03	213.9	11.31	3.77	52.07	7.2
Suelo desnudo	672.62	6.17	0.44	0.08	15.17	3.2
SAF	999.6	280.2	14.58	2.7	45.8	9.8
Comercial	1 113	265.1	12.88	2.1	43.6	5.6
De transición	1 191	241.3	12.7	2.6	45.34	4.5
Tradicional	851.7	259.9	13.85	2.9	52.64	3.9

Fuente: elaboración propia. DS: desviación estándar; SAF: sistema agroforestal.

En este capítulo, se presentaron los resultados de un ejercicio de modelación espacialmente explícito, diseñado en respuesta a los procesos de intensificación y transición a otros usos del suelo que enfrentan los sistemas agroforestales de café bajo sombra, con un enfoque centrado en la cuantificación de los beneficios derivados de la provisión de servicios ecosistémicos por parte de los cafetales de la región de Copalita. El éxito de la cafeticultura en lo que respecta a la conservación de la cobertura vegetal y sus servicios se acredita con la integración de estos sistemas productivos en los esquemas de PSA, al funcionar como herramientas dirigidas a diversificar el ingreso de los productores y sentar las bases generales para el uso de prácticas de manejo sustentables que puedan soportar la producción.

Ante la escasez de datos primarios o de campo en la región, la modelación basada en información cartográfica disponible y herramientas de análisis rápidas permitió estimar los niveles de provisión de algunos servicios ecosistémicos que realmente brindan los cafetales.

Los resultados indican tres tendencias clave de análisis. La modelación sugiere que existen diferencias medibles en los efectos del tipo de manejo seleccionado por parte de los productores. Los sistemas con manejo más sustentable, como los tradicionales (con porcentajes de sombra ≥ 60 %) y los de transición (con sombra entre 40 % y 50 %, comúnmente bajo sombra especializada), poseen características importantes para proveer servicios ecosistémicos de regulación, en contraste con los sistemas comerciales. En esos sistemas son mayores los efectos positivos de la cobertura arbórea en el almacenamiento de carbono y la retención de sedimentos. Los niveles de provisión de agua se asocian sobre todo con la ubicación de las fincas: los sistemas comerciales se ubican en zonas de alta precipitación (a mayor altura), mientras que los tradicionales

se sitúan en zonas con mayor temperatura (mayor evapotranspiración). Al respecto, la literatura indica que la capacidad de almacenamiento de carbono es directamente proporcional a la cantidad de biomasa presente en los árboles de sombra [Cerdeira *et al.*, 2017] y a la densidad de arbustos de café [Cerdán *et al.*, 2012]. Por otro lado, estudios indican que la pérdida de la capacidad de retención de sedimentos se agrava cuando la deforestación o las podas se producen en zonas con fuertes pendientes [Villarreyana *et al.*, 2020]. En cuanto a la lluvia, el dosel de los árboles la intercepta disminuyendo su intensidad y el escurrimiento superficial, así que protege al suelo de la erosión [Barral *et al.*, 2015]. El sistema bajo sombra o un manejo sostenible implicarían un ahorro en los costos de las prácticas de manejo. Por ejemplo, las reducciones en la capacidad de retención de sedimentos suponen gastos adicionales relacionados con el aumento de la fertilidad de los suelos, para quienes en principio cuentan con menos recursos, como los propietarios de los sistemas tradicionales.

Otra interpretación de los resultados apunta a que es posible disponer de sistemas productivos transformando el paisaje y reteniendo una parte del paisaje con vegetación, sin llegar a la pérdida neta de la cobertura vegetal. La comparación de los niveles de usos de suelo revela que los sistemas agroforestales ofrecen una mayor capacidad de provisión de servicios ecosistémicos, en comparación con los sistemas agropecuarios o urbanos. Estos resultados llevan a la mejor comprensión de las consecuencias ecológicas o los beneficios perdidos por la transición de cafetales a otros usos del suelo; también posibilitan medir el impacto de la población o demanda de recursos sobre el ambiente y la contribución de los sistemas agroforestales al bienestar humano. La combinación de datos de provisión de los servicios ecosistémicos evaluados identifica áreas críticas para la conservación de SE o el uso restringido de prácticas de manejo poco sustentables. De acuerdo con los hallazgos, 20 % de las parcelas brindan por

lo menos dos de los tres SE evaluados, en altos niveles, por lo que cuentan con un gran potencial para formar parte del programa de Pago por Servicios Ambientales (mapa 2.4).

La cuantificación y modelación de servicios ecosistémicos como la que se describe aquí es solo el primer paso en el camino hacia la implementación de los esquemas de Pagos por Servicios Ambientales; quedan por resolver los aspectos técnicos y políticos para evaluar y seleccionar a los principales beneficiarios. En consecuencia, se necesitan más estudios sobre el flujo y consumo de los servicios ecosistémicos, y los datos de campo podrían mejorar la calidad de los resultados.

CONCLUSIÓN

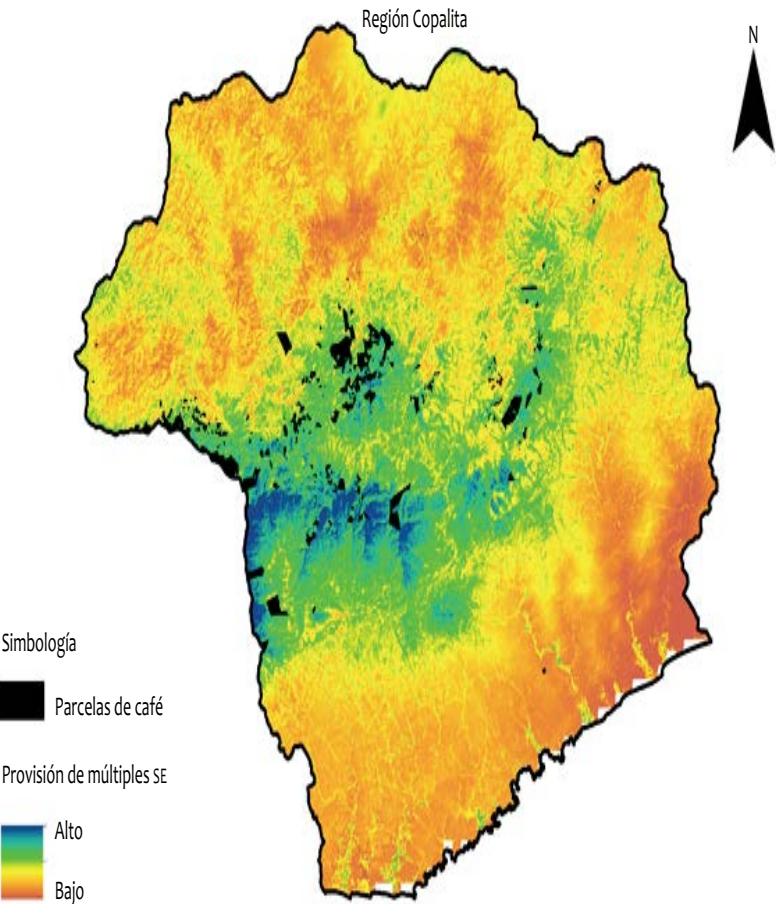
El conocimiento sobre los patrones espaciales en la provisión de servicios ecosistémicos contribuye a la toma de decisiones para el manejo de los SAF y el desarrollo de políticas de conservación. Este capítulo resalta la importancia de que los productores de café consideren el tipo de uso de suelo de sus cultivos, además de un manejo más favorable para la provisión de servicios ecosistémicos.

Los resultados de la presente investigación revelan que los sistemas menos intensificados y fragmentos de bosque remanentes pueden brindar más servicios ecosistémicos que los sistemas más intensificados. También presentan información base sobre las áreas críticas de conservación y resaltan que el establecimiento de sistemas productivos más intensificados (como los agropecuarios o café al sol) puede generar alteraciones en el paisaje, con efectos negativos en los SE y la producción, así como en la economía y el bienestar de los productores.

No se cuantifican las variaciones en los niveles de provisión de SE a través del tiempo, pero los resultados esbozan las consecuencias de la transformación o transición de los

cafetales bajo sombra a otros usos del suelo. Por ello, se requiere una cuantificación de servicios ecosistémicos a escala de paisaje y a lo largo del tiempo, con el propósito de

Mapa 2.4. Distribución espacial de las áreas con mayor potencial de proveer múltiples servicios ecosistémicos (SE) y las fincas cafetaleras con mayor de probabilidad de ingresar al Pago por Servicios Ambientales (PSA), región Copalita (Oaxaca, México)



Fuente: elaboración propia.

detectar degradación o ganancia de SE, evitar los impactos irreversibles, aumentar la comprensión de los factores que influyen en la distribución espacial de SE y diseñar paisajes de sistemas productivos eficientes. Este capítulo revela de igual modo ciertos umbrales de cambio con respecto a la variabilidad de uso del suelo, el cambio climático y el manejo de la sombra, aspectos importantes para definir la resiliencia de los sistemas. Por otro lado, se muestran las relaciones naturales con la producción y el manejo de manera espacial, mostrando la complejidad de los socioecosistemas que conforman la región Copalita en Oaxaca, México.

REFERENCIAS

- Anderzén, J. *et al.* [2020], “Effects of on-farm diversification strategies on smallholder coffee farmer food security and income sufficiency in Chiapas, Mexico”, *Journal of Rural Studies*, 77: 33-46.
- Arámbula, F. [2008], *Introducción al análisis de imágenes médicas y cirugía asistida por computadora. Análisis de imágenes médicas*, México, UNAM.
- Avelino, J. *et al.* [2020], “Shade tree *Chloroleucon eurycyclum* promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain”, *Crop Protection*, 129: 105038.
- Barral, M. P. *et al.* [2015], “Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: A global meta-analysis”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202: 223-231, <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.009>>.
- Beenhouwer, M. de *et al.* [2013], “A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry”, *Agriculture, Eco-systems & Environment*, 175: 1-7, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880913001424>>.

- Bhagabati, N. K. *et al.* [2014], “Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans”, *Biological Conservation*, 169: 147-156.
- Byrd, K. B. *et al.* [2015], “Integrated climate and land use change scenarios for California rangeland ecosystem services: wildlife habitat, soil carbon, and water supply”, *Landscape Ecology*, 30: 729-750.
- Cerda, R. *et al.* [2020], “Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services”, *Crop Protection*, 134: 105149.
- Cerda, R. *et al.* [2017], “Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems”, *European Journal of Agronomy*, 82: 308-319, <<https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>>.
- Cerdán, C. R. *et al.* [2012], “Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems”, *Agricultural Systems*, 110: 119-130.
- Consejo Nacional de Población (Conapo) [2023], *Índices de marginación 2020*, México, Conapo, <<https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>>.
- Consejo Nacional de Población (Conapo) [2012], *Índice de marginación por localidad 2010*, México, Conapo, <<https://cutt.ly/ZwiH4ey2>>.
- Daily, G. C. (ed.) [1997], *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington-California, Island Press.
- Donatti, C. I. *et al.* [2019], “Vulnerability of smallholder farmers to climate change in Central America and Mexico: current knowledge and research gaps”, *Climate and Development*, 11(3): 264-286.
- Fernández, M., y V. E. Méndez [2019], “Subsistence under the canopy: Agrobiodiversity's contributions to food and nutrition security amongst coffee communities in Chiapas,

- Mexico”, *Agroecology Sustainable Food Systems*, 43(5): 579-601, <<https://doi.org/10.1080/21683565.2018.1530326>>.
- Flanagan, D. C., y M. A. Nearing [1995], “USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation”, *NSERL Report*, 10: 1-123.
- Freire Santos, P. Z. *et al.* [2019], “Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural lands-capes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest”, *Forest Ecology and Management*, 433: 140-145.
- Galeana-Pizaña, J. M. *et al.* [2021], “Is rural food security primarily associated with smallholder agriculture or with commercial agriculture?: An approach to the case of Mexico using structural equation modeling”, *Agricultural Systems*, 190: 103091.
- Galeana-Pizaña, J. M. *et al.* [2014], “Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30: 179-189.
- García Alvarado, M. E. *et al.* [2017], “Caracterización del agroecosistema de café bajo sombra en la cuenca del río Copalita”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, 40: 635-648.
- Groot, R. S. de *et al.* [2010], “Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making”, *Ecological Complexity*, 7(3): 260-272.
- Hamel, P. *et al.* [2015], “A new approach to modeling the sediment retention service (INVEST 3.0): Case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA”, *Science of The Total Environment*, 524-525: 166-177.
- Harvey, C. A. *et al.* [2021], “Transformation of coffee-growing landscapes across Latin America. A review”, *Agronomy for Sustainable Development*, 41: 62, <<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00712-0>>.

- Hausermann, H. [2012], “From polygons to politics: Everyday practice and environmental governance in Veracruz, Mexico”, *Geoforum*, 43(5): 1002-1013, <<https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2012.06.002>>.
- Jackson, L. *et al.* [2010], “Biodiversity and agricultural sustainability: from assessment to adaptive management”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2(1-2): 80-87.
- Jha, S. *et al.* [2014], “Shade Coffee: Update on a disappearing refuge for biodiversity”, *BioScience*, 64(5): 416-428.
- Koutouleas, A. *et al.* [2022], “Shaded-Coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review”, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6: 877476, <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>>.
- Kuyah, S. *et al.* [2019], “Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis”, *Agronomy for Sustainable Development*, 39(47): 1-18, <<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>>.
- Lawler, J. J. *et al.* [2014], “Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(20): 7492-7497.
- Locatelli, B. *et al.* [2014], “Synergies and trade-offs between ecosystem services in Costa Rica”, *Environmental Conservation*, 41(1): 27-36.
- López-Bravo, D. F. *et al.* [2012], “Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions”, *Crop Protection*, 38: 21-29, <<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.011>>.
- Maes, J. *et al.* [2012], “Synergies and trade-offs between ecosystem service supply, biodiversity, and habitat conservation status in Europe”, *Biological Conservation*, 155: 1-12.
- Martínez-Harms, M. J., y P. Balvanera [2012], “Methods for mapping ecosystem service supply: a review”, *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8(1-2): 17-25.

- Metzger, M. J. *et al.* [2006], “The vulnerability of ecosystem services to land use change”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(1): 69-85.
- Meylan, L. *et al.* [2017], “Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 245: 32-42.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA) [2005], *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Washington, Island Press.
- Mokondoko, P. *et al.* [2018], “Spatial analysis of ecosystem service relationships to improve targeting of payments for hydrological services”, *PLoS ONE*, 13(2): e0192560.
- Redhead, J. W. *et al.* [2016], “Empirical validation of the INVEST water yield ecosystem service model at a national scale”, *Science of The Total Environment*, 569-570: 1418-1426.
- Sarmiento-Soler, A. *et al.* [2020], “Effect of cropping system, shade cover and altitudinal gradient on coffee yield components at Mt. Elgon, Uganda”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295: 106887.
- Saxton, K. E. *et al.* [1986], “Estimating generalized soil-water characteristics from texture”, *Soil Science Society of America Journal*, 50(4): 1031-1036.
- Sharps, K. *et al.* [2017], “Comparing strengths and weaknesses of three ecosystem services modelling tools in a diverse UK river catchment”, *Science of The Total Environment*, 584-585: 118-130.
- Šmelko, Š., y J. Merganič [2008], “Some methodological aspects of the National Forest Inventory and Monitoring in Slovakia”, *Journal of Forest Science*, 54(10): 476-483.
- Sukhdev, P. *et al.* [2014], “La economía de los ecosistemas y la biodiversidad (TEEB): desafíos y respuestas”, D. Helm y C. Hepburn (eds.), *Nature in the balance: The economics of biodiversity [La naturaleza en equilibrio: la economía de la biodiversidad]*, Oxford, Oxford University Press,

consultado el 11 de agosto de 2023, <https://www.teebweb.org/wp-content/uploads/2015/02/Teeb-espanol-2015-final_3.pdf>.

- Tallis, H., y S. Polasky [2011], “3. Assessing multiple ecosystem services: an integrated tool for the real world”, P. Kareiva *et al.* (eds.), *Natural capital theory and practice of mapping ecosystem services*, Oxford, Oxford University Press: 34-50.
- Terrado, M. *et al.* [2014], “Impact of climate extremes on hydrological ecosystem services in a heavily humanized Mediterranean basin”, *Ecological Indicators*, 37: 199-209.
- Torralba, M. *et al.* [2016], “Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230: 150-161.
- Torres Castillo, N. E. *et al.* [2020], “Impact of climate change and early development of coffee rust. An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico”, *Science of the Total Environment*, 738: 140-225.
- Valencia, V. *et al.* [2018], “Smallholder response to environmental change: Impacts of coffee leaf rust in a forest frontier in Mexico”, *Land Use Policy*, 79: 463-474, <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.08.020>>.
- Vigerstol, K. L., y J. E. Aukema [2011], “A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services”, *Journal of Environmental Management*, 92(10): 2403-2409.
- Villarino, S. H. *et al.* [2019], “How does soil organic carbon mediate trade-offs between ecosystem services and agricultural production?”, *Ecological Indicators*, 103: 280-288, <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.027>>.
- Villarreyna, R. A. *et al.* [2020], “Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales”, *Agronomía Mesoamericana*, 3(2): 499-516.

Zhang, Y. *et al.* [2015], “The impact of land cover change on ecosystem service values in urban agglomerations along the coast of the Bohai Rim, China”, *Sustainability*, 7(8): 10365-10387.

3. LA MIGRACIÓN COMO UN MEDIO DE VIDA EN LOS HOGARES DEL COMPLEJO COZIHUA EN OAXACA. UN ENFOQUE MICROECONOMÉTRICO

Uberto Salgado Nieto
Ulises Sánchez Guerrero

RESUMEN

Oaxaca es considerado un nuevo estado expulsor de migrantes hacia Estados Unidos, y el fenómeno ha crecido a tal grado que ahora se ha posicionado como la quinta entidad que más remesas recibe a nivel nacional. En esta región, desde hace varias décadas, persisten la pobreza y la marginación estructurales, en buena medida por los altos niveles de informalidad laboral entre su clase trabajadora; y a causa de esto, la población se ha visto forzada a buscar mejores oportunidades laborales fuera de México. En este capítulo, mediante un modelo econométrico y bajo el enfoque de los medios de vida, se analizan cuáles son los factores que impulsan la migración internacional en Oaxaca, específicamente desde los hogares que pertenecen al complejo Cozihua, un sistema de cuencas representado por 23 municipios, ubicado en la parte central de la región costa de Oaxaca y conformado por las cuencas Copalita, Zimatán y Huatulco. Los principales hallazgos de esta investigación señalan que la migración se explica en gran medida por el financiamiento obtenido de los apoyos de gobierno (programas sociales) y las remesas, ya que los integrantes

de un hogar en situación de pobreza extrema no emigran a menos que dispongan de algún tipo de financiamiento para cubrir los costos de la movilidad hacia el exterior. Por otro lado, un factor que reduce la probabilidad de emigrar se asocia con el hecho de trabajar en el sector de los servicios, que en el complejo Cozihua básicamente se orienta hacia la oferta de actividades turísticas en las playas de Huatulco; esto denota que el desarrollo y la promoción de las actividades turísticas en la región poseen relevancia y alto potencial para impulsar la economía regional, y reducir así la migración de oaxaqueños en busca de oportunidades laborales fuera del país.

INTRODUCCIÓN

Desde la década de 1990, en México “la emigración internacional se extendió como fuego incontrollable por el centro y el sur de México” [Binford, 2002], pues se observó un incremento de la migración internacional hacia Estados Unidos proveniente de las entidades del sur sureste de México, entre las que destacan Guerrero y Oaxaca, también llamados nuevos estados expulsores [Consejo Nacional de Población (Conapo), 2012].

La pobreza y la marginación representan algunos de los problemas estructurales en las economías del sur de México. En el caso particular de Oaxaca, que se caracteriza por altos niveles de informalidad laboral, entre 2008 y 2020 los niveles de pobreza se han mantenido con pocas variaciones, pues la población en esta circunstancia pasó de 64.3 % a 61.7 %, respectivamente [Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), 2021], lo cual la incorpora a las entidades con los mayores niveles de pobreza en el país y con un alto índice de marginación [Conapo, 2023].

Bajo esas precarias condiciones, la población de Oaxaca ha optado por buscar mejores oportunidades laborales en otros países, provocando que dicho estado pase de ser una región que no figuraba en los circuitos migratorios internacionales

a volverse la quinta entidad que más remesas recibe en México y a reflejar la mayor dependencia de estos recursos, que representan 13 % de su producto interno bruto (PIB) [Fundación BBVA Bancomer y Conapo, 2020].

En este capítulo, se analizan cuáles son los factores que impulsan la emigración internacional en Oaxaca, específicamente de los integrantes de hogares que pertenecen al complejo Cozihua, un sistema de cuencas ubicado en la parte central de la región costa de Oaxaca y conformado por las cuencas Copalita, Zimatán y Huatulco [World Wildlife Fund (WWF), 2019]. La delimitación del área de estudio se vincula con los proyectos TRASSE-ANR-Conacyt 290832 y UNAM-PAPIIT IN302720, cuyo objetivo es examinar las perspectivas del desarrollo resiliente en el complejo Cozihua. Por tanto, se analizan las trayectorias de las cuencas y se enfatizan sus principales estresores, actores y cambios en la región. Uno de los factores que impulsan los cambios es la migración, ya que las familias recurren al desplazamiento como estrategia de medio de vida para afrontar diversos contextos de vulnerabilidad [Ellis, 2008] y conseguir recursos no asequibles a través del mercado laboral local o los programas gubernamentales [Haan, 2000], a fin de contribuir con el desarrollo resiliente de sus hogares.

El presente capítulo se divide en cuatro apartados. El primer apartado ofrece una breve revisión teórica del fenómeno migratorio y su concepto, con base en un enfoque clásico y en su consideración como una estrategia de medio de vida. El segundo apartado contiene un análisis de los hechos estilizados sobre los flujos migratorios desde Oaxaca hacia Estados Unidos y la caracterización de los flujos que emergen del complejo Cozihua. El tercer apartado expone un modelo econométrico que toma como base el enfoque de los capitales que conforman los medios de vida, con la finalidad de esclarecer cuáles son los factores que influyen en que los integrantes de hogares del complejo Cozihua adopten la estrategia de la emigración para allegarse los recursos necesarios en su vida cotidiana. Por último, el cuarto apartado presenta las conclusiones.

La teoría clásica de la migración asume que el desplazamiento de personas es el resultado combinado de fuerzas de atracción y de expulsión que inciden sobre los costos y beneficios de emigrar. Los costos se refieren a las erogaciones monetarias vinculadas con el viaje (como transporte, alojamiento y comida) y con el tiempo que toma conseguir un empleo en el lugar de destino; los beneficios se relacionan con la obtención de un empleo mejor remunerado que el de la oferta laboral disponible en su región de origen. Conforme a este enfoque, los individuos son agentes racionales que intentan maximizar su utilidad y que, por tanto, asumen decisiones de manera individual [Harris y Todaro, 1970].

El marco teórico seleccionado para esta investigación se basa en una concepción de crecimiento económico balanceado, debido a que la búsqueda de mayores beneficios por parte de los individuos en otras regiones produce un intercambio regional indirecto entre los factores de la producción, una especie de modelo Heckscher-Ohlin. Conforme a este modelo, las regiones con abundante mano de obra experimentan grandes desplazamientos de contingentes de trabajadores hacia las regiones con escasez y, a largo plazo, se genera una disminución importante de trabajadores en las regiones de origen, lo cual a su vez incrementa la productividad marginal del trabajo en dicha región e impulsa el alza de los salarios; por otra parte, las regiones con abundante capital atraen mano de obra de regiones donde los costos marginales del factor trabajo son inferiores, y se espera que los flujos de capital avancen en dirección opuesta a la migración. Al final, se logra un punto de equilibrio en el que los niveles salariales se igualan entre las regiones de origen y destino, momento en el cual los flujos de migración se detienen [Lewis, 1954].

De acuerdo con este marco analítico, las remesas promueven un manejo administrativo de la migración, ya que

tienden a aumentar los niveles de desarrollo en los países expulsores de los migrantes; y, en la medida en que propicien el mejoramiento de las condiciones de vida de las familias, el flujo migratorio se enfilará hacia la reducción [Canterbury, 2010]. En realidad, lo que se garantiza es el avance del modelo de acumulación neoliberal respaldado por las organizaciones internacionales, con el propósito de perpetuar la concentración de capitales en los países ricos, profundizar la explotación de los trabajadores migrantes y preservar el *statu quo* de la asimétrica división internacional del trabajo que favorece a los Estados con éxito económico [Canterbury, 2010], pues no puede soslayarse que las necesidades y exigencias de los mercados laborales internacionales explican en buena medida la migración de trabajadores [Aragonés Castañer, 2000].

Haas [2010: 14] señala que para obtener una mejor perspectiva sobre el estudio del fenómeno migratorio no solo es necesario reparar en el papel que juega la “estructura”, término con el que se refiere a las restricciones políticas, institucionales, económicas, internacionales, sociales y culturales bajo las cuales se presenta la migración; también se requiere abarcar las capacidades de “agencia”, es decir, las capacidades reales (limitadas por la estructura) de los individuos para superar esas restricciones.

El presente marco analítico se aleja de las corrientes teóricas clásicas sobre los estudios migratorios y se orienta hacia enfoques híbridos que abarcan las capacidades de “agencia”, así como la “estructura”; la mayor parte de las innovaciones para este debate surgieron de la teoría conocida como la nueva economía de la migración laboral (NEML), que mantiene algunos vínculos conceptuales con el enfoque de los medios de vida (*livelihood*) [Haas, 2010: 15].

Tales teorías surgen como una respuesta crítica a la teoría clásica de la migración que no incluye el componente estructural específico de las regiones e ignora así las restricciones a las que se enfrentan los individuos. Por tanto, posibilitan

estudiar el fenómeno migratorio acotadas a un contexto regional o acorde a las condiciones de vida de los miembros de los hogares de una región [Haas, 2010: 16]. A continuación, se abordan brevemente estos enfoques.

La nueva economía de la migración laboral

El enfoque de la NEML [Stark y Bloom, 1985] favorece el análisis dinámico del fenómeno migratorio, al tomar en cuenta las interacciones entre los diversos factores sociales y económicos que lo explican, pues sitúa el comportamiento individual en un contexto social más amplio, en el que las personas establecen comparaciones de sus ingresos con los de sus grupos de referencia y ello les genera costos o beneficios psicológicos que se reflejan en sentimientos de privación relativa o satisfacción relativa. Por tanto, un individuo puede migrar de una región a otra para superar su posición relativa respecto del mismo grupo de referencia; en este sentido, los individuos con mayor privación relativa disponen de mayores incentivos para migrar. Significa que cuanto más grande es la desigualdad de los ingresos en una comunidad, mayor será la privación relativa que los miembros de un hogar experimentan en relación con otros hogares de referencia y, por tanto, los incentivos para migrar serán superiores [Arango, 2003]. Se trata de un elemento desechado por el enfoque clásico, pero que forma parte de las características estructurales de una región.

Conforme a este marco teórico, el migrante y la familia adoptan de forma conjunta la decisión de migrar y comparten los costos y los rendimientos bajo un acuerdo contractual implícito. Las remesas constituyen el componente central que aporta beneficios directos a los familiares del migrante, como resultado de un contrato informal entre las dos partes, más que originado de sentimientos puramente altruistas por parte del migrante [Stark y Bloom, 1985]. Ese acuerdo concede a

la migración el carácter de mecanismo que promueve la diversificación del riesgo en torno a la pérdida de los ingresos del hogar, ya que refleja que los individuos, los hogares y las familias actúan no solo para maximizar los ingresos, sino que además pretenden dispersar y reducir los riesgos, convirtiendo las remesas en una especie de seguro ante las dificultades económicas, tales como el incremento en los niveles de desempleo o los factores ambientales que ocasionan pérdidas de ingresos agrícolas [Stark y Lucas, 1988]. Por tanto, esta visión sustituye el enfoque de la teoría de la migración basada en la independencia individual (optimización contra la naturaleza humana bajo el enfoque neoclásico) por otro relacionado con la dependencia mutua (optimización de uno con el otro); es decir, la migración se reconoce como una “estrategia calculada” [Stark, 1991].

Por lo anterior, el planteamiento central del enfoque de la NEML se relaciona con el de los medios de vida, ya que en este último se asume de igual manera que la migración representa una estrategia de los hogares para asegurar un sustento cuando se afronten riesgos por estresores climáticos, de mercado laboral, sociales, etcétera.

La migración como una estrategia de medios de vida

Los integrantes de un hogar adoptan distintas estrategias para allegarse los recursos que requieren en su vida cotidiana. En algunos casos, esas estrategias se pueden asociar con la diversificación productiva, la intensificación (especialización) o la migración, con la finalidad de mejorar los ingresos que percibe el hogar; sin embargo, dichas estrategias dependen de los contextos estructurales y los activos tangibles e intangibles disponibles en el hogar, que reflejan las capacidades y habilidades necesarias para implementar alguna de ellas [Ellis, 2008].

El enfoque de los medios de vida hace posible analizar cuáles son los factores que inciden de manera significativa en las actividades que los integrantes de un hogar pueden llevar a cabo para mantener o asegurar un sustento ante los probables estresores del flujo de ingresos en el hogar [Serrat, 2017]. Sin embargo, las decisiones sobre el tipo de actividades por desarrollar dependen de las condiciones “estructurales”, pues estas condiciones obligan a los integrantes del hogar a cubrir los costos de transacción derivados de elegir entre una u otra, según los activos o capacidades con los que cuentan para desempeñar alguna actividad que aporte un ingreso al hogar [Carney, 2003].

Los integrantes de un hogar pueden desarrollar un medio de vida si poseen las capacidades o activos para implementarlo, y por ello dan prioridad a la ejecución de una actividad específica según su dotación de activos, los cuales se convierten en capitales cuando se aprovechan para generar un ingreso; a través de este enfoque, es viable conocer cuáles son los capitales de un hogar capaces de impulsar o frenar la migración en una región particular.

Los capitales de un hogar se pueden clasificar en cinco categorías [Ellis, 2008]:

1. *Capital financiero*. Comprende las actividades dirigidas a obtener recursos monetarios que permiten a los integrantes de los hogares materializar sus proyectos de vida, como el acceso a un empleo, un negocio, un crédito o el ahorro [Sánchez-Zamora *et al.*, 2014]. Se espera que el mayor acceso al capital financiero en los hogares lleve a sus integrantes a descartar la estrategia de la migración.
2. *Capital humano*. Se centra en cuantificar las habilidades y la fuerza laboral saludable y capacitada en un hogar, considerando los factores educativos, demográficos y de salud de sus integrantes [Frankenberger *et al.*,

2013]. Respecto del fenómeno migratorio, es posible esperar que los mayores niveles educativos de los individuos correspondan con el acceso a una mayor diversidad de empleos y mejor remunerados, con el consecuente declive de la migración.

3. *Capital físico*. Incluye la infraestructura básica en la provisión de servicios en los hogares (comunicación, transporte, etcétera) y la que emplean los hogares para desarrollar alguna actividad productiva. La literatura sobre el fenómeno migratorio menciona que los medios de transporte y de comunicación adquieren relevancia al momento de conceptualizar la migración como una estrategia de medios de vida [Ulrich *et al.*, 2012], porque ambos elementos abaratan los costos de migrar.
4. *Capital social*. Indica el nivel de cooperación y estabilidad social que existe en una región, a manera de elemento central para la organización comunitaria y el apoyo solidario basados en el respeto de acuerdos y reglas que fortalecen las relaciones sociales entre los miembros de una comunidad [Barbieri y Mahoney, 2009]. Respecto de la migración, es importante destacar que en los hogares con un familiar migrante que les envía remesas se dispone de una red social de apoyo que puede prestar ayuda ante alguna contingencia en el hogar.
5. *Capital natural*. Este activo considera la reserva de recursos naturales en el hogar y que pueden destinarse para llevar a cabo una actividad que genere algún sustento; para representar este capital se han manejado variables como acceso a tierras o animales para fines comerciales [Fierros y Ávila-Foucat, 2017].

En resumen, la migración constituye una estrategia de medio de vida encaminada a diversificar los riesgos y asegurar un ingreso en el hogar; se trata de una estrategia que los integrantes de los hogares despliegan para conseguir recursos

no asequibles a través del mercado laboral local o los programas gubernamentales [Haan, 2000].

En el siguiente apartado se ofrece una revisión contextual de las condiciones de pobreza, mercado laboral y migración en el estado de Oaxaca, particularmente en la región del complejo Cozihua, con la finalidad de conocer cuáles son las condiciones económicas estructurales presentes en la región.

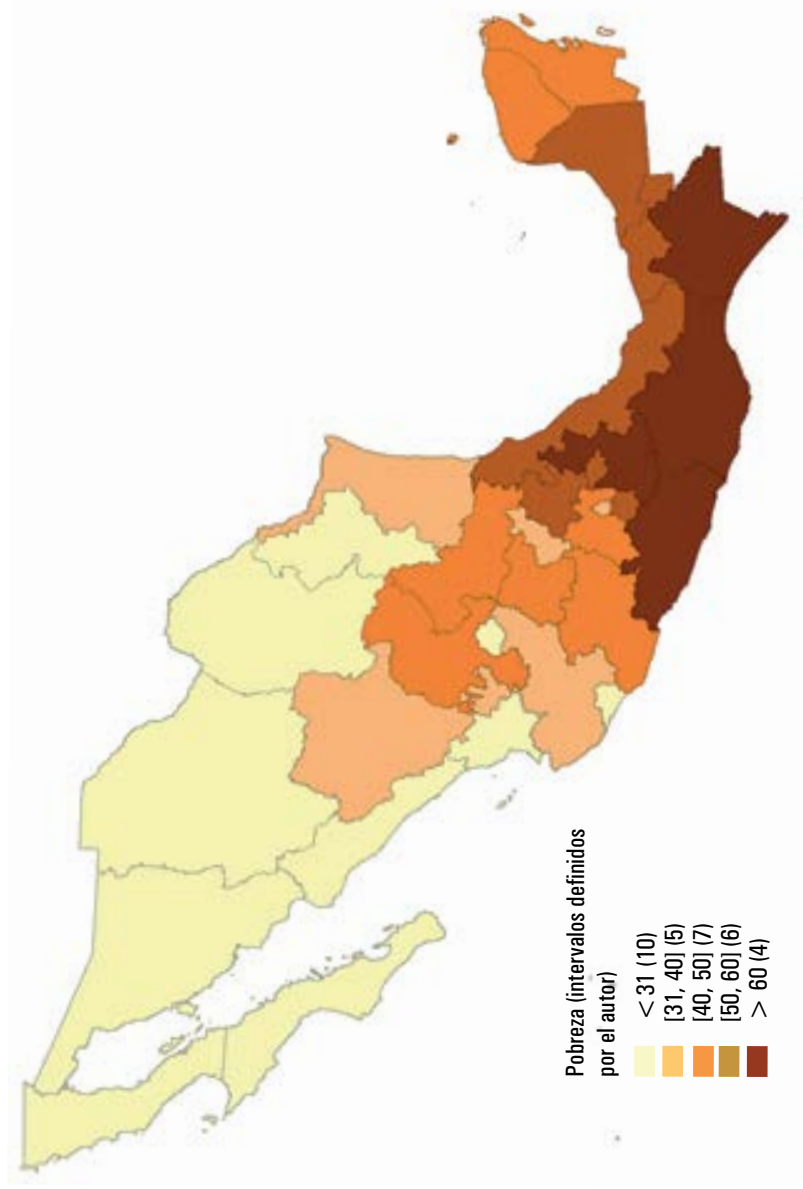
EL FENÓMENO MIGRATORIO EN OAXACA Y SU CONTEXTO ECONÓMICO

La migración desde Oaxaca en el contexto nacional

Como ya se mencionó, de acuerdo con cifras del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval), los niveles de pobreza en la entidad de Oaxaca han permanecido casi invariables en la segunda década del siglo XXI, pues la población en condición de pobreza pasó de 64.3 % a 61.7 % entre 2008 y 2020. La entidad registra uno de los mayores niveles de pobreza en México (mapa 3.1).

El estado de Oaxaca no solo muestra elevados niveles de pobreza a nivel nacional, sino que desde hace décadas ha mostrado niveles muy altos de marginación (cuadro 3.1), y cabe señalar que tanto la pobreza como la marginación representan uno de los problemas estructurales de las economías del sur de México.

Mapa 3.1. Población que en 2020 vive en condiciones de pobreza, por conjuntos de entidades federativas en México



Fuente: elaboración propia con base en datos del Coneval.

Cuadro 3.1. Grado de marginación por entidad federativa en México, 1990-2020

Entidad federativa	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Aguascalientes	Bajo	Muy bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Muy bajo
Baja California	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Bajo
Baja California Sur	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Campeche	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Coahuila	Bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Colima	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Chiapas	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Chihuahua	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Medio
Ciudad de México (Distrito Federal antes de 2016)	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Durango	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Alto
Guanajuato	Alto	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio
Guerrero	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Hidalgo	Muy alto	Alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Jalisco	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Estado de México	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Michoacán	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

continúa...

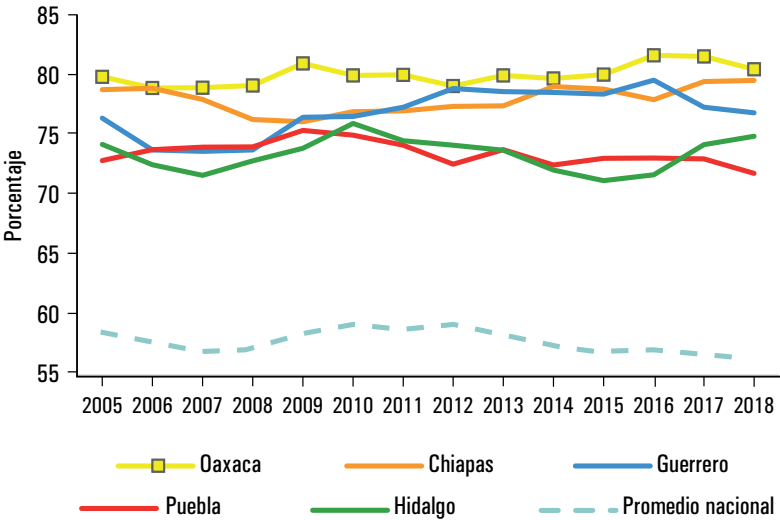
...continuación del cuadro 3.1.

Entidad federativa	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Morelos	Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio
Nayarit	Medio	Medio	Alto	Medio	Medio	Medio	Alto
Nuevo León	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo	Muy bajo
Oaxaca	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Puebla	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Querétaro	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Quintana Roo	Medio	Medio	Medio	Bajo	Medio	Medio	Medio
San Luis Potosí	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio
Sinaloa	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Sonora	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Tabasco	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto
Tamaulipas	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo
Tlaxcala	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio	Medio
Veracruz	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Yucatán	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Zacatecas	Alto	Alto	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio

Fuente: elaboración propia con base en datos del Consejo Nacional de Población [Conapo, 2012 y 2023].

La condición de pobreza puede explicarse por los bajos niveles salariales que se ofrecen en el mercado laboral de dicha entidad. En la gráfica 3.1, se observa que Oaxaca muestra los mayores niveles de informalidad laboral, por encima de Chiapas, Guerrero, Hidalgo y Puebla.

Gráfica 3.1. Las cinco entidades con los mayores valores en la tasa de informalidad laboral a nivel nacional, 2005-2018 (porcentajes)

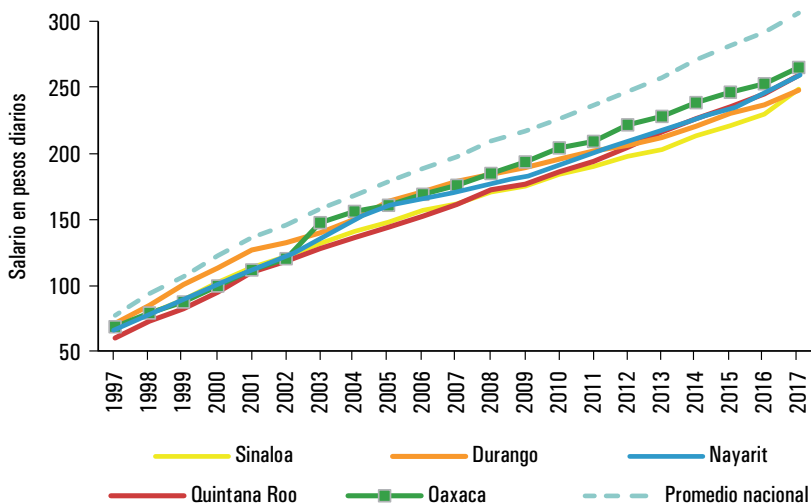


Fuente: elaboración propia con base en datos del Banco de Información Económica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (BIE-Inegi).

La población que labora en el sector formal de la economía oaxaqueña percibe ingresos correspondientes a los menores niveles salariales en el país. De acuerdo con cifras del Banco de Información Económica (BIE) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), el salario base de cotización de los trabajadores afiliados al Instituto Mexicano del Seguro

Social (IMSS) se ubica por debajo del nacional, y Oaxaca es una de las entidades con los menores niveles salariales (gráfica 3.2).

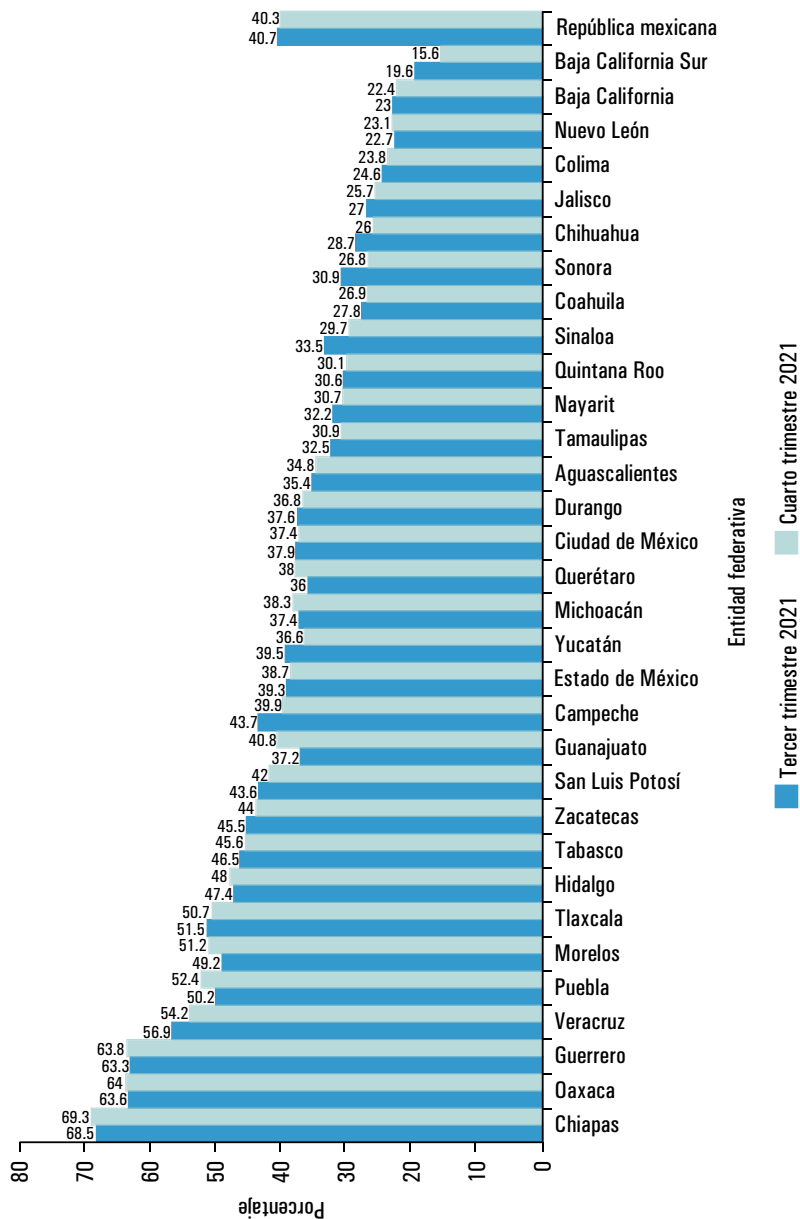
Gráfica 3.2. Cinco entidades de México con los valores más bajos del salario base de cotización (pesos diarios) para los trabajadores afiliados al IMSS a nivel nacional, 1997-2017



Fuente: elaboración propia con base en datos del Banco de Información Económica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (BIE-Inegi).

En Oaxaca, la alta tasa de ocupación en el sector informal de la economía y las bajas percepciones económicas de la población ocupada en el empleo formal se tradujeron en que para los trimestres tercero y cuarto de 2021 cerca de 64 % de la población registrara un ingreso laboral inferior al costo de la canasta básica alimentaria, es decir, este porcentaje de población en Oaxaca no obtuvo suficientes ingresos para satisfacer las necesidades más básicas como fruto de su trabajo (gráfica 3.3).

Gráfica 3.3. Evolución del porcentaje de población con ingreso laboral inferior al costo de la canasta básica alimentaria; trimestres tercero y cuarto de 2021, por entidad federativa de México



Fuente: Coneval [2021].

Bajo esas precarias condiciones del mercado laboral en Oaxaca, su población opta por buscar mejores oportunidades laborales en otras regiones, sobre todo en Estados Unidos. En el cuadro 3.2, se muestran los valores del índice de intensidad migratoria que registraron las entidades federativas en los años 2000, 2010 y 2020; y se observa que la entidad de Oaxaca pasó de la posición 15 a la 7 en el ámbito nacional, para distinguirse como una de las entidades que más lugares escaló respecto de este indicador, ubicándose solo por debajo de Chiapas.

Cuadro 3.2. Posición de cada entidad federativa a nivel nacional, según el índice de intensidad migratoria (IIM); años 2000, 2010 y 2020

Entidad federativa	Posición IIM 2000	Posición IIM 2010	Posición IIM 2020	Diferencia entre 2000 y 2020
Chiapas	31	26	21	10
Oaxaca	15	9	7	8
Sonora	22	20	16	6
Baja California	17	17	13	4
Aguascalientes	8	11	6	2
Chihuahua	14	16	12	2
Hidalgo	12	8	10	2
Nayarit	5	4	3	2
San Luis Potosí	6	6	5	1
Baja California Sur	27	25	27	0
Campeche	29	31	29	0
Guerrero	9	5	9	0
Michoacán	2	2	2	0
Tabasco	32	32	32	0

continúa...

...continuación del cuadro 3.2.

Entidad federativa	Posición IIM 2000	Posición IIM 2010	Posición IIM 2020	Diferencia entre 2000 y 2020
Tamaulipas	19	19	19	0
Tlaxcala	23	18	23	0
Yucatán	28	27	28	0
Zacatecas	1	1	1	0
Colima	10	12	11	-1
Guanajuato	3	3	4	-1
Estado de México	25	24	26	-1
Nuevo León	24	28	25	-1
Quintana Roo	30	29	31	-1
Veracruz	21	21	22	-1
Puebla	18	15	20	-2
Querétaro	13	14	15	-2
Sinaloa	16	22	18	-2
Coahuila	20	23	24	-4
Ciudad de México	26	30	30	-4
Durango	4	7	8	-4
Morelos	11	10	17	-6
Jalisco	7	13	14	-7

Fuente: elaboración propia con base en datos del Consejo Nacional de Población [Conapo, 2012 y 2023].

Como resultado del incremento de la población oaxaqueña en los circuitos internacionales de migración a Estados Unidos, el monto de remesas hacia Oaxaca se ha incrementado de manera considerable (cuadro 3.3); incluso la entidad ocupó el quinto lugar entre las entidades que más remesas concentraron a nivel nacional.

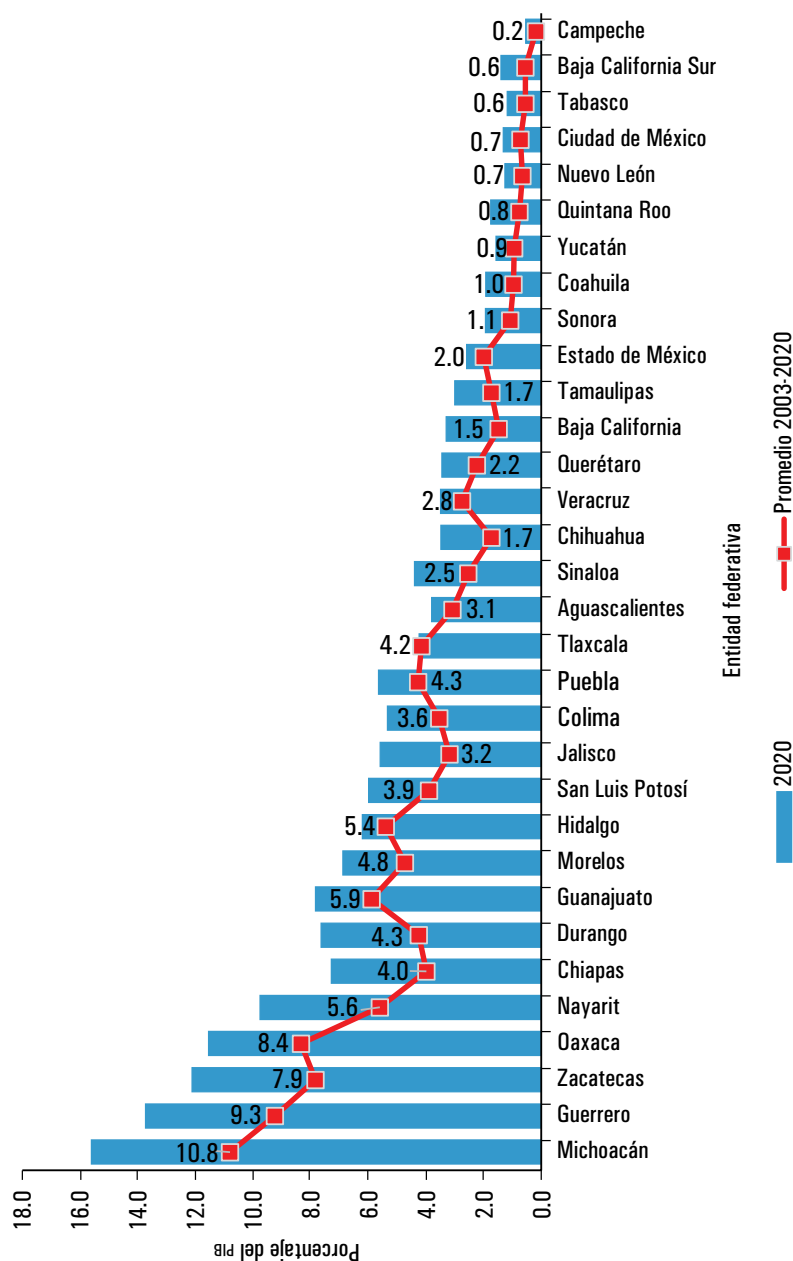
Cuadro 3.3. Remesas por entidad federativa en México, 2019
(millones de dólares y porcentajes)

Entidad	Millones de dólares	Porcentaje	Entidad	Millones de dólares	Porcentaje
Michoacán	3 584.4	9.9	Sinaloa	913.1	2.5
Jalisco	3 499.1	9.7	Durango	870.1	2.4
Guanajuato	3 286.4	9.1	Tamaulipas	863.7	2.4
Estado de México	2 032.8	5.6	Querétaro	703.0	2.0
Oaxaca	1 803.9	5.0	Morelos	702.6	1.9
Puebla	1 763.0	4.9	Coahuila	633.4	1.8
Guerrero	1 737.8	4.8	Sonora	586.6	1.6
Estado de México	1 705.2	4.7	Nayarit	578.1	1.6
Veracruz	1 495.4	4.1	Aguascalientes	500.3	1.4
San Luis Potosí	1 331.1	3.7	Colima	300.7	0.8
Chihuahua	1 122.4	3.1	Tlaxcala	253.9	0.7
Zacatecas	1 116.9	3.1	Tabasco	249.0	0.7
Chiapas	996.3	2.8	Yucatán	219.1	0.6
Hidalgo	952.0	2.6	Quintana Roo	184.8	0.5
Nuevo León	949.9	2.6	Campeche	87.8	0.2
Baja California	938.6	2.6	Baja California Sur	87.4	0.2

Fuente: Fundación BBVA Bancomer y Conapo [2020].

La alta participación de Oaxaca en el flujo de remesas que ingresan a México refleja su alta dependencia de las remesas respecto del PIB, ya que ellas representaron cerca de 13 % del PIB de la entidad durante 2021 (gráfica 3.4).

Gráfica 3.4. Dependencia de las remesas por entidad federativa, México, 2020 (como porcentaje del PIB)



Fuente: Fundación BBVA Bancomer y Conapo [2021].

En el siguiente apartado se analizan las condiciones económicas de la población oaxaqueña del complejo Cozihua y los flujos de migración internacional en la región.

El fenómeno migratorio en el complejo Cozihua

Durante la investigación, se encontraron altos niveles de marginación en 22 de los 23 municipios que conforman el complejo Cozihua. Solo el municipio de Santa María Huatulco, ubicado en la costa de Oaxaca y cuyo dinamismo económico destaca por las actividades turísticas en sus playas, presentaba en la década de 1990 un índice de marginación alto, pero en 2020 pasó a un grado de marginación bajo (cuadro 3.4).

Vale la pena destacar que los municipios ubicados en las costas de Oaxaca mostraron una disminución en el índice de intensidad migratoria entre 2000 y 2020. Al comparar los mayores niveles de intensidad migratoria en el complejo Cozihua, se observó que municipios como San Pedro Pochutla, Santa María Huatulco y San Pedro Huamelula cayeron varias posiciones entre los años 2000 y 2020, mientras que el municipio costero de San Miguel del Puerto no mostró cambio durante ese periodo.

Por otro lado, los municipios de la región de la sierra, al norte y centro del complejo Cozihua, incrementaron su índice de intensidad migratoria, pues escalaron varias posiciones a diferencia del resto de los municipios en la región, como en el caso de San Francisco Ozolotepec que ocupaba la posición 20 en el año 2000 y se movió 19 lugares hasta ubicarse en 2020 como el municipio con el mayor nivel del índice de intensidad migratoria (cuadro 3.5).

Cuadro 3.4. Índice de marginación en los municipios del complejo Cozihua (Oaxaca, México), años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020

Municipio	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Candelaria Loxicha	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Pluma Hidalgo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
San Agustín Loxicha	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
San Andrés Paxtlán	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
San Carlos Yautepec	Alto	Muy alto	Alto	Alto	Muy alto	Alto	Alto
San Cristóbal Amatlán	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
San Francisco Ozolotepec	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
San Juan Mixtepec	Alto	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
San Juan Ozolotepec	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
San Marcial Ozolotepec	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
San Mateo Piñas	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
San Mateo Río Hondo	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto
San Miguel del Puerto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto

continúa...

...continuación del cuadro 3.4.

Municipio	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
San Miguel Suchixtepec	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Medio
San Pedro el Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
San Pedro Huamelula	Alto	Alto	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto
San Pedro Mixtepec	Alto	Alto	Alto	Alto	Muy alto	Alto	Alto
San Pedro Pochutla	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
San Sebastián Río Hondo	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Alto	Medio
Santa María Huatulco	Alto	Medio	Medio	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Santa María Ozolotepec	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto
Santiago Xanica	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
Santo Domingo Ozolotepec	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto

Fuente: elaboración propia con base en datos del Consejo Nacional de Población [Conapo, 2012 y 2023].

Cuadro 3.5. Índice absoluto de intensidad migratoria hacia Estados Unidos en los municipios del complejo Cozihua (Oaxaca, México); años 2000, 2010 y 2020

Municipio	Posición IIM 2000	Posición IIM 2010	Posición IIM 2020	Diferencia IIM 2000-2020
San Francisco Ozolotepec	20	10	1	19
San Pedro el Alto	17	3	2	15
San Agustín Loxicha	22	11	10	12
San Sebastián Río Hondo	16	15	5	11
San Juan Ozolotepec	19	22	9	10
San Miguel Suchixtepec	9	6	3	6
San Marcial Ozolotepec	12	19	6	6
Santa María Ozolotepec	18	18	13	5
Santiago Xanica	21	23	17	4
Candelaria Loxicha	7	7	4	3
San Pedro Mixtepec Distrito 26	23	20	22	1
Santo Domingo Ozolotepec	14	1	14	0
San Miguel del Puerto	8	8	8	0
San Juan Mixtepec Distrito 26	13	4	16	-3
San Carlos Yautepec	15	17	18	-3
San Pedro Pochutla	1	5	7	-6
San Cristóbal Amatlán	4	2	11	-7
San Andrés Paxtlán	11	12	21	-10
Pluma Hidalgo	10	13	20	-10
Santa María Huatulco	5	14	15	-10
San Mateo Piñas	2	21	12	-10
San Mateo Río Hondo	6	9	19	-13
San Pedro Huamelula	3	16	21	-18

Fuente: elaboración propia con base en datos del Consejo Nacional de Población [Conapo, 2012 y 2023].

El siguiente apartado aborda el análisis del modelo económico relacionado con los medios de vida y los capitales asociados con el fenómeno de la migración internacional en el complejo Cozihua.

EVIDENCIA EMPÍRICA SOBRE LA MIGRACIÓN COMO UN MEDIO DE VIDA
EN LOS HOGARES DEL COMPLEJO COZIHUA

Con el objetivo de analizar los factores que impulsan la migración internacional de integrantes de los hogares situados en el complejo Cozihua, se aplicó un modelo econométrico para conocer cuáles son las probabilidades de migrar de los habitantes de un hogar, según las diversas características asociadas con los capitales disponibles en cada hogar.

La base de datos se construyó con información del Censo de Población y Vivienda 2020, de modo que se contabilizaron datos de un total de 28 377 hogares del complejo Cozihua. Con esta fuente de información, se adoptaron diversas variables vinculadas con cada uno de los cinco capitales disponibles en los hogares: variables dicotómicas que indican si el hogar cuenta con telefonía fija o móvil (*capital físico*); variables dicotómicas, como la de si en el hogar se recibe alguna transferencia de gobierno o por jubilación y el número de miembros del hogar que trabajan en el sector de los servicios, a fin de capturar los efectos del posible financiamiento en el hogar por parte de diversas fuentes (*capital financiero*); una variable dicotómica que señala si un familiar migrante (*capital social*) envía remesas al hogar desde Estados Unidos; variables dicotómicas como la “falta de comida”, la cual toma el valor 1 si en los últimos tres meses antes de la encuesta el hogar se quedó sin alimentos por falta de recursos económicos, junto con otra variable relativa a la edad del jefe de familia, el número de habitantes indígenas y el promedio de escolaridad de los miembros del hogar (*capital humano*); y finalmente una

variable sobre el número de habitantes del hogar con acceso a tierras para fines comerciales (*capital natural*). Además de estas variables, se incluyó la variable dependiente de la migración como una dicotómica que toma el valor 1 si ese hogar cuenta con un familiar migrante en Estados Unidos (cuadro 3.6).

Con esas variables se estableció un modelo sobre la probabilidad de que un hogar tuviera un familiar migrante según los activos con los que cuenta. Inicialmente se propuso un modelo logit con la siguiente función de distribución acumulada:

$$\Pr[migrar = 1] = \frac{\exp^{F[z]}}{1 + \exp^{F[z]}} \quad (1)$$

Donde $z = \alpha + \beta_1 \text{Teléfono fijo} + \beta_2 \text{Teléfono móvil} + \beta_3 \text{Transferencias del gobierno} + \beta_4 \text{Transferencias por jubilación} + \beta_5 \text{Sector servicios} + \beta_6 \text{Recibe remesas del extranjero} + \beta_7 \text{Falta de comida} + \beta_8 \text{Edad del jefe de familia} + \beta_9 \text{Número de habitantes indígenas} + \beta_{10} \text{Promedio de escolaridad} + \beta_{11} \text{Acceso a tierras para la agricultura}$.

De esa manera, se pudo observar que la distribución de los datos en la variable dependiente sobre los hogares con un familiar migrante (cuando la dicotómica tomaba el valor 1) correspondía a 1 % del total de los hogares. Por tanto, las respuestas entre los valores 0 y 1 mostraban un alto grado de asimetría, con un sesgo en el estimador.

Una prueba formal para analizar si el modelo logit permite modelar correctamente este comportamiento de los datos se realiza a través del estadístico de Stukel, que se orienta a comparar el modelo de regresión logística con una distribución más general y así propone un modelo logístico generalizado que considera dos parámetros adicionales asociados con la simetría de las colas de la distribución [Stukel, 1988].

Cuadro 3.6. Estadísticas descriptivas de las variables consideradas en el modelo econométrico de la migración internacional en el complejo Cozihua (Oaxaca, México), 2020

Variable	Observaciones	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Migrar	28 377	0.0359094	0.1860675	0	1
CAPITAL FÍSICO					
Teléfono fijo	28 377	0.0827783	0.2755517	0	1
Teléfono móvil	28 377	0.585298	0.4926792	0	1
CAPITAL FINANCIERO					
Transferencias por parte del gobierno	28 377	0.6150403	0.4865944	0	1
Transferencias por jubilación	28 377	0.0195581	0.1384783	0	1
Sector servicios	28 377	0.445854	0.7724886	0	7
CAPITAL SOCIAL					
Recibe remesas del extranjero	28 377	0.0617049	0.240623	0	1
CAPITAL HUMANO					
Falta de comida	28 377	0.1840928	0.3875666	0	1
Edad del jefe de familia	28 377	49.39891	19.37504	14	104
Número de habitantes indígenas	28 377	1.874793	2.29132	0	30
Promedio de escolaridad	28 377	5.612966	3.926649	0	20
CAPITAL NATURAL					
Acceso a tierras para la agricultura	28 377	0.211897	0.5148918	0	6

Fuente: elaboración propia, con base en datos del Censo de Población y Vivienda 2020 [Inegi, 2020].

El modelo propuesto por Stukel adquiere la siguiente forma:

$$\log\text{-}\log\left(\frac{P_j}{1-P_j}\right) = h_\alpha(\beta_0 + \beta_1 x_j) = g(x_j)$$

Donde $h_\alpha(\beta_0 + \beta_1 x_j)$ es una función que depende de los parámetros α_1 y α_2 .

Ahora bien, si $\beta_0 + \beta_1 x_j \leq 0$, o su equivalente, $P_j \leq \frac{1}{2}$, se obtiene la siguiente expresión para h_α :

$$h_\alpha = \begin{cases} \alpha_1^{-1} \exp[(\alpha_1 |\beta_0 + \beta_1 x_j|) - 1] & \text{si } \alpha_1 > 0 \\ \beta_0 + \beta_1 x_j & \text{si } \alpha_1 = 0 \\ -\alpha_1^{-1} \log[1 - \alpha_1 |\beta_0 + \beta_1 x_j|] & \text{si } \alpha_1 < 0 \end{cases}$$

En caso contrario, si $\beta_0 + \beta_1 x_j \geq 0$, es decir, si $P_j \geq \frac{1}{2}$, se obtiene:

$$h_\alpha = \begin{cases} -\alpha_2^{-1} \exp[(\alpha_2 |\beta_0 + \beta_1 x_j|) - 1] & \text{si } \alpha_2 > 0 \\ \beta_0 + \beta_1 x_j & \text{si } \alpha_2 = 0 \\ \alpha_2^{-1} \log(1 - \alpha_2 |\beta_0 + \beta_1 x_j|) & \text{si } \alpha_2 < 0 \end{cases}$$

De lo anterior, se infiere que el modelo de regresión logística solo es válido si $H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = 0$, lo que garantiza la simetría en las colas de la distribución de los datos asociados al comportamiento de la variable dependiente.

En el caso de los datos de la presente investigación, el estadístico de Stukel impide aceptar la hipótesis nula H_0 , por lo que en su lugar se eligió un modelo de regresión binaria asimétrica, es decir, su variante, el modelo log-log complementario, en el que la función de distribución acumulada que se utiliza como función de enlace corresponde a una distribución de Gumbel para valores extremos. La función del logaritmo

de verosimilitud para el modelo log-log complementario permite estimar de manera consistente los parámetros que explican el comportamiento relativo a la probabilidad de que un hogar cuente con un familiar migrante, según las características asociadas con los capitales que posee.

En el cuadro 3.7, se exponen los resultados del modelo log-log complementario. A manera de pruebas estadísticas adicionales para analizar la validez del modelo, se incorporó el valor del factor de inflación de la varianza, correspondiente a 1.13, lo cual implica que la estimación carece de problemas de multicolinealidad; asimismo, se aplicó la prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow, que a un nivel de significación estadística de 5 % admite la hipótesis nula de que el modelo presenta un buen ajuste.

Cuadro 3.7. Resultados del modelo log-log complementario sobre la probabilidad de que un hogar en el complejo Cozihua cuente con un familiar migrante (Oaxaca, México), año 2020

Variables	Coeeficientes	Valor probabilístico
CAPITAL FÍSICO		
Teléfono fijo	0.505	0.000
	0.084	
Teléfono móvil	0.388	0.000
	0.078	
CAPITAL FINANCIERO		
Transferencias del gobierno	0.241	0.002
	0.077	
Transferencias por jubilación	−0.651	0.020
	0.281	
Número de miembros del hogar que trabajan en el sector servicios	−0.097	0.043
	0.048	

continúa...

...continuación del cuadro 3.7.

Variables	Coeficientes	Valor probabilístico
CAPITAL SOCIAL		
Recibe remesas del extranjero	3.130 0.066	0.000
CAPITAL HUMANO		
Falta de comida	-0.323 0.093	0.001
Edad del jefe de familia	-0.019 0.002	0.000
Número de habitantes indígenas	0.099 0.013	0.000
Promedio de escolaridad	-0.023 0.011	0.042
CAPITAL NATURAL		
Acceso a tierras para agricultura	0.065 0.062	0.294
Constante	-3.633 0.158	0.000
Número de observaciones =	28 377	
LR Chi2(11)=	2 345.63	0.000
Logaritmo de verosimilitud	-3 217.630	
Factor de inflación de la varianza	1.13	
Hosmer-Lemeshow Ji2(8)	14.28	0.075
Stukel Ji2(2)	45.43	0.000

Fuente: elaboración propia con base en datos del Censo de Población y Vivienda 2020 [Inegi, 2020].

Los principales resultados del modelo sobre la probabilidad de que un hogar adopte la estrategia de la migración como un medio de vida se detallan a continuación. Respecto del *capital físico*, se halló que el hecho de que en los hogares se disponga de comunicación como teléfonos fijos y móvil incrementa las probabilidades de migrar, debido a que esos medios facilitan sostener un vínculo estrecho con el familiar migrante en el extranjero; esto también repercute en el abaratamiento de los costos de la migración, ya que la información de las vacantes laborales proveniente de contactos en Estados Unidos conduce al ahorro de los gastos de manutención asociados con el tiempo de espera que lleva conseguir un empleo [Márquez Covarrubias, 2010].

En relación con el *capital financiero*, se observó que los recursos obtenidos por las transferencias del gobierno tienden a incrementar la probabilidad de migrar. Los programas de apoyos sociales pueden servir como una fuente de financiamiento para cubrir los costos del proceso migratorio; pero las transferencias de los jubilados reducen esa probabilidad, debido a que la población en edad avanzada no acostumbra migrar. El coeficiente asociado con la variable del número de miembros del hogar que laboran en el sector de los servicios indica que las probabilidades de que ese hogar adopte la estrategia de la migración se reducen en la medida en que más miembros del hogar se incorporan al sector servicios, que en la zona se orienta principalmente a las actividades turísticas.

Los hallazgos sobre el *capital social* revelan que las probabilidades de que en un hogar se adopte la estrategia de la migración se incrementan si se cuenta con un familiar migrante que envía remesas desde Estados Unidos, ya que el familiar migrante funciona como una red de apoyo que permite a sus parientes en México abaratar los costos de la migración, porque puede ofrecerles el financiamiento del viaje y, en ocasiones, brindar alojamiento o manutención a los familiares que

recibe en Estados Unidos. La literatura sobre el fenómeno migratorio ha estudiado esa situación y se considera que este acto solidario fomenta la migración de generaciones futuras en los hogares receptores de remesas. A este comportamiento se le denomina el “síndrome del migrante”, pues las familias en tales circunstancias se vuelven completamente dependientes de las remesas y de los flujos de migración para sobrevivir [Grande-Martín y Rey-Poveda, 2012].

En cuanto al *capital humano*, se evidenció que la “falta de comida” incide de manera negativa en la probabilidad de migrar, porque la población en condiciones de pobreza extrema carece de recursos para cubrir los costos del desplazamiento hacia otros países [McKenzie, 2017]. En términos de la variable asociada con los niveles de escolaridad de los miembros del hogar, se observó que su incremento reduce la probabilidad de migrar a Estados Unidos. También se identificó que la existencia de integrantes indígenas en el hogar aumenta las probabilidades de que en ese hogar se adopte la estrategia de la migración.

Tal como señala Binford [2002], desde la década de 1990, la emigración desde el sur sureste del país ha experimentado un aumento considerable, por lo que en la actualidad son numerosas las redes de migrantes indígenas en Estados Unidos —concentradas sobre todo en California, Arizona y Texas—, de modo que grupos de indígenas oaxaqueños han conformado asociaciones de tipo comunal que sirven de apoyo al proceso migratorio internacional, pues mantienen fuertes vínculos con sus comunidades de origen y así contribuyen con su movilidad social [Barabas, 2016].

Por último, el *capital natural* representado por la variable del acceso a tierras para agricultura no resultó estadísticamente significativo, así que no se le atribuyó una incidencia sobre la decisión de migrar.

Los principales hallazgos de esta investigación muestran que el incremento en el flujo migratorio internacional desde el estado de Oaxaca nace como una respuesta de la población para afrontar los problemas estructurales en la economía de dicha entidad, ya que los bajos salarios y el alto nivel de informalidad laboral se traducen en mayores niveles de pobreza y marginación en la región.

Desde el enfoque de medios de vida que valora el peso de los activos o capitales disponibles en los hogares y con base en el análisis de un modelo econométrico, se verificó que, en el caso específico de los hogares del complejo Cozihua, la migración se sustenta en gran medida en el financiamiento proveniente de los apoyos de gobierno (programas sociales) y las remesas. Esta situación sugiere que los integrantes de los hogares en pobreza extrema no suelen migrar, a menos que dispongan de algún tipo de financiamiento, pues por sí mismos no poseen la capacidad de financiar los costos del desplazamiento [Manzanedo, 2019]. Además, el capital social relacionado con el envío de las remesas refleja una red de apoyo vinculada con un familiar o conocido migrante [Martínez Cuero y Peláez Herrero, 2014; Palma Martínez y Ángeles Jiménez, 2009] que podría contribuir con las capacidades de resiliencia de los hogares receptores del complejo Cozihua.

Si se agrega el factor del capital físico referente a contar con medios de comunicación (disponibilidad de teléfono), aumenta la probabilidad de que los integrantes de un hogar adopten la migración como estrategia de medio de vida. Por tanto, estos factores juegan un papel importante en la superación de las condiciones de vulnerabilidad y pobreza [Canales Cerón, 2008] y, en consecuencia, la migración se convierte en un mecanismo para diversificar riesgos y asegurar un ingreso económico para el hogar.

Otro resultado relevante del modelo econométrico se asocia con la disminución de la migración dependiendo de la cantidad de miembros del hogar que laboran en el sector de los servicios, que en el complejo Cozihua básicamente se orienta hacia la oferta de actividades turísticas en las playas de Huatulco. Esto hace patente la relevancia del desarrollo y promoción de las actividades turísticas en la región, las cuales muestran un alto potencial para impulsar la economía regional y reducir así la migración de oaxaqueños en busca de oportunidades laborales fuera del país.

Un ejemplo de políticas públicas relacionadas con el tema se promueve en Cancún, Quintana Roo, pues las actividades turísticas representan casi la mitad del PIB estatal, y este sector genera una gran derrama económica que impulsa la creación de empleos suficientes para mantener a la entidad con bajos niveles de intensidad migratoria y baja recepción y dependencia de las remesas a nivel nacional. Así, en este capítulo, se observa la interacción de los capitales con los medios de vida y los determinantes para un desarrollo resiliente de los hogares.

REFERENCIAS

- Aragón Castañer, A. M. [2000], *Migración internacional de trabajadores: una perspectiva histórica*, México, UNAM/Plaza y Valdés.
- Arango, J. [2003], “La explicación teórica de las migraciones: luz y sombra”, *Migración y Desarrollo*, (1), consultado el 10 de julio de 2023, <<https://www.redalyc.org/pdf/660/66000102.pdf>>.
- Barabas, A. M. [2016], “La migración de los indígenas de Oaxaca, México, a Estados Unidos y su movilización social”, *Comparative Cultural Studies: European and Latin America Perspectives*, 1(1): 77-86.

- Barbieri, C., y E. Mahoney [2009]. “Why is diversification an attractive farm adjustment strategy? Insights from Texas farmers and ranchers”, *Journal of Rural Studies*, 25(1): 58-66, <<https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2008.06.001>>.
- Binford, L. [2002], “Remesas y subdesarrollo en México”, *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, XXIII(90): 149, El Colegio de Michoacán, <<https://www.redalyc.org/pdf/137/13709005.pdf>>.
- Canales Cerón, A. I. [2008], “Remesas y desarrollo en América Latina. Una relación en busca de teoría”, *Migración y Desarrollo*, Red Internacional de Migración y Desarrollo, (11): 5-30, <<https://www.redalyc.org/pdf/660/66011754001.pdf>>.
- Canterbury, D. C. [2010], “Repensando el debate sobre migración y desarrollo bajo el capitalismo neoliberal”, *Migración y Desarrollo*, 7(15): 5-47, <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66019856001>>.
- Carney, D. [2003], *Sustainable livelihoods approaches: Progress and possibilities for change*, Londres, UK Department for International Development.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) [2021], “Coneval presenta las estimaciones de pobreza multidimensional 2018 y 2020”, comunicado de prensa, 5 de agosto, consultado el 10 de julio de 2023, <<https://cutt.ly/owiJ1u4V>>.
- Consejo Nacional de Población (Conapo) [2023], “Índice de marginación por entidad federativa y municipio”, *Índices de marginación 2020*, México, Conapo, <<https://www.gob.mx/conapo/documentos/indices-de-marginacion-2020-284372>>.
- Consejo Nacional de Población (Conapo) [2012], “Regiones de origen y destino de la migración México-Estados Unidos”, *Índices de intensidad migratoria México-Estados Unidos 2010*, México, Conapo: 17-21, consultado el 10 de julio de 2023, <<https://cutt.ly/8wiJXN2l>>.
- Ellis, F. [2008], “The determinants of rural livelihood diversification in developing countries”, *Journal of Agricultural*

- Economics*, 51(2):289-302, <<https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2000.tb01229.x>>.
- Fierros, I., y V. S. Ávila-Foucat [2017], “Medios de vida sustentables y contexto de vulnerabilidad de los hogares rurales de México”, *Problemas del Desarrollo*, 48(191), 107-131, <<https://www.probdes.ieec.unam.mx/index.php/pde/article/view/58747>>.
- Frankenberger, T. et al. [2013], *Community resilience: Conceptual framework and measurement feed the future learning agenda*, Maryland, Estados Unidos, USAID, <<https://cutt.ly/LwiKjHO3>>.
- Fundación BBVA Bancomer y Consejo Nacional de Población (Conapo) [2021], *Anuario de Migración y Remesas México 2021*, México, BBVA-Conapo, consultado el 25 de enero de 2023, <<https://cutt.ly/ywoqq4HH>>.
- Fundación BBVA Bancomer y Consejo Nacional de Población (Conapo) [2020], *Anuario de Migración y Remesas México 2020*, México, BBVA-Conapo, consultado el 25 de enero de 2023, <<https://cutt.ly/twoqwlFj>>.
- Grande-Martín, R., y A. del Rey-Poveda [2012], “Remesas, proyectos migratorios y relaciones familiares. El caso de los latinoamericanos y los caribeños en España”, Estado de México, UAEM, *Papeles de Población*, 18(74): 237-272.
- Haan, A. de [2000], “Migrants, livelihoods and rights: The relevance of migration in development policies”, *Social Development Working Paper*, Londres, Department for International Development, (4), <<https://cutt.ly/xwiKpVAX>>.
- Haas, H. de [2010], “Migration transitions: A theoretical and empirical inquiry into the developmental drivers of international migration”, Working Papers, Londres, University of Oxford-International Migration Institute, (24), <<https://www.migrationinstitute.org/publications/wp-24-10>>.
- Harris, J. R., y M. P. Todaro [1970], “Migration, unemployment and development. A two-sector analysis”, *The American Economic Review*, 60(1), 126-142.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) [2020], “Censo de Población y Vivienda 2020”, <<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Microdatos>>.
- Lewis, W. A. [1954], “Economic development with unlimited supplies of labour”, *The Manchester School*, 22(2): 139-191, <<https://doi.org/10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x>>.
- Manzanedo, C. [2019], “Diversas perspectivas de la relación entre pobreza y migraciones”, La Coordinadora de Organizaciones para el Desarrollo, 15 de octubre, <<https://coordinadoraongd.org/2019/10/diversas-perspectivas-de-la-relacion-entre-pobreza-y-migraciones/>>.
- Márquez Covarrubias, H. [2010], “Desarrollo y migración: una lectura desde la economía política crítica”, *Migración y Desarrollo*, 8(14): 59-87.
- Martínez Cuero, J., y O. Peláez Herrero [2014], “Políticas asistenciales para rezagos estructurales: el caso de Chiapas”, *Estudios Críticos del Desarrollo*, IV(6): 121-147, <<https://cutt.ly/ZwiVYkck>>.
- McKenzie, D. [2017], “Poverty, inequality, and international migration: Insights from 10 years of migration and development conferences”, *Revue d'économie du développement*, 25(3-4): 13-28, <<https://doi.org/10.3917/edd.313.0013>>.
- Palma Martínez, E. D., y A. Ángeles Jiménez [2009], “Migración y políticas públicas. Una aproximación al Estado de México”, N. Baca Tavira, F. Herrera Tapia y R. González Orihuela (coords.), *Migración democracia y desarrollo: la experiencia mexicana*, México, IEEM: 103-121, <<https://www.corteidh.or.cr/tablas/r29114.pdf>>.
- Sánchez Zamora, P. *et al.* [2014], “El medio rural andaluz frente a la crisis económica: un análisis de los factores de resiliencia territorial”, *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 14(1): 27-56.
- Serrat, O. [2017], “The sustainable livelihoods approach”, *Knowledge Solutions*, Nueva York, Springer, Singapore: 21-26, <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0983-9_5>.

- Stark, O. [1991], *The migration of labor*, Padstow, Cornwall (Gran Bretaña), Basil Blackwell, <<http://class.povertylectures.com/Stark1991MigrationofLaborChapts1-3.pdf>>.
- Stark, O., y D. E. Bloom [1985], “The new economics of labor migration”, *The American Economic Review*: 75(2): 173-178, <<http://www.jstor.org/stable/1805591>>.
- Stark, O., y R. E. B. Lucas [1988], “Migration, remittances, and the family”, *Economic Development and Cultural Change*, 36(3): 465-481, <<https://doi.org/10.1086/451670>>.
- Stukel, T. A. [1988], “Generalized logistic models”, *Journal of the American Statistical Association*, 83(402): 426-431.
- Ulrich, A. *et al.* [2012], “Small-scale farming in semi-arid areas: Livelihood dynamics between 1997 and 2010 in Laikipia, Kenya”, *Journal of Rural Studies*, 28(3): 241-251, <<https://doi.org/10.1016/J.JRURSTUD.2012.02.003>>.
- World Wildlife Fund (WWF) [2019], “Memoria del Taller: Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco. Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México”, I. D. González Mora, G. de la Lanza Espino y R. Sánchez Navarro (coordinadores del taller), Oaxaca, WWF, <http://awsassets.panda.org/downloads/4_memoria_taller_ce_czh.pdf>.

II. TRAYECTORIAS FUTURAS DE LA CUENCA COPALITA

4. MODELACIÓN DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y COBERTURA EN EL COMPLEJO COPALITA-ZIMATÁN-HUATULCO (COZIHUA)

Julieta Blancas-Zamora

Juan Manuel Núñez

José Mauricio Galeana-Pizaña

RESUMEN

Los escenarios prospectivos generados mediante la modelación de cambios de uso de suelo y cobertura son herramientas útiles para obtener información, conocimiento y alternativas relacionadas con la toma de decisiones. Estos modelos permiten evaluar, identificar y predecir cambios en el paisaje mediante el estudio de variables pertenecientes a diversos ámbitos, tales como la comunicación, la política, la biofísica y el medio ambiente. En este trabajo se construyen mapas de uso de suelo y cobertura para los años 1989, 1999, 2011 y 2019, derivados de datos satelitales clasificados por medio de métodos supervisados que se basan en máquinas de vectores de soporte (MVS) y redes neuronales artificiales (RNA) en ArcGIS y ENVI. Se utilizaron cadenas de Markov de primer orden para detectar transiciones de cambio de coberturas y uso del suelo anteriores, con el propósito de evaluar un conjunto de variables y así diseñar modelos prospectivos hasta el año 2039, en el módulo *Land Change Modeler* (LCM) de TerrSet versión 18.2.1, con fundamento en los mapas de probabilidad del periodo 1989-2019. El objetivo de estos modelos consiste en analizar con anticipación algunas de las implicaciones socioambientales futuras

dentro del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Cozihua). La modelación de cambios de uso de suelo y cobertura posibilita identificar patrones y estimar efectos del cambio de uso de suelo y cobertura con la ayuda de variables predictivas de naturaleza socioambiental. Los resultados condujeron a diseñar dos modelos de escenarios: uno de ellos refleja las tendencias actuales de cambio de uso de suelo y cobertura, y el segundo privilegia la conservación de bosques y sistemas agroforestales que se extienden como consecuencia de las actividades productivas sustentables dentro del complejo Cozihua.

INTRODUCCIÓN

Los cambios en los sistemas terrestres son un efecto directo de la toma de decisiones humanas a múltiples escalas, con implicaciones de largo alcance para el sistema terrestre que retroalimentan los servicios ecosistémicos, el bienestar humano y la toma de decisiones [Verburg *et al.*, 2013; Crossman *et al.*, 2013]. Por ello, las alteraciones causadas por el ser humano en la cobertura y el uso del suelo tienen gran importancia para la estructura y función de los ecosistemas del sistema terrestre, con repercusiones de igual alcance para el bienestar humano. En fechas recientes, la ciencia del cambio de cobertura y uso de suelo (CCCUS) se ha convertido en un componente fundamental dentro del cambio ambiental global y la sustentabilidad de los ecosistemas [Turner II *et al.*, 2007]. Se trata de un campo de investigación orientado a comprender la dinámica de la cobertura del suelo como un sistema acoplado humano-ambiental para abordar la teoría, los conceptos, los modelos y las aplicaciones relevantes en los problemas ambientales y sociales [Turner II *et al.*, 2021].

Al estudiar la interacción mutua entre los sistemas sociales y ambientales que dan forma a la cobertura y uso del

suelo, la CCCUS opera en la interfaz de las ciencias sociales y ambientales, lo que requiere un alto nivel de colaboración entre diversas disciplinas académicas, como se refleja en las múltiples contribuciones al tema [Kinnebrew *et al.*, 2021; Verburg *et al.*, 2015; Turner II y Robbins, 2008]. Se trata de un marco que se dirige a comprender la variedad de procesos que afectan la gestión de la tierra, al igual que los factores de distancia y proximidad o aquellos vinculados inmediata e indirectamente con los resultados de la cobertura y el uso del suelo. Dichos procesos y factores explorados reflejan los resultados de la observación, según los datos procedentes de una amplia gama de teorías y conceptos de las ciencias sociales y ambientales, incluidos los que abordan la economía doméstica, la gobernanza, las instituciones, los ecosistemas y el paisaje [Turner II *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2013; Mayer *et al.*, 2016]. Actualmente, la CCCUS puede verse como una reformulación contemporánea de los estudios de cambio de cobertura y uso de suelo, que se dedica a entender la dinámica humano-ambiental en la superficie terrestre, con el afán de descubrir atributos sobre la cobertura y los usos del suelo, así como respecto de sus procesos de cambio mediante la amplia utilización de tecnologías de la información geoespacial, sobre todo la percepción remota [Turner II *et al.*, 2021; Rindfuss *et al.*, 2004].

La cantidad y las mejoras en los sensores aéreos y espaciales en las últimas dos décadas han revolucionado la capacidad de observar y monitorear los cambios en los sistemas terrestres. Los datos cuasiglobales continuos de la cobertura terrestre o de sus atributos facilitan las evaluaciones globales de los cambios en la productividad primaria neta, la flora, las fuentes y los sumideros de carbono y la biodiversidad, entre otras categorías de estudio, cuyos resultados se aprovechan para el clima y otros aspectos ambientales globales [National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM), 2019; Gutman *et al.*, 2004]. Esta vasta información sobre observación y monitoreo revela una superficie terrestre cada vez más dominada por

la humanidad y sirve como base empírica para la mayoría de las afirmaciones acerca de las trayectorias de la cobertura y el uso del suelo, reemplazando las observaciones derivadas de estudios terrestres, y abre paso a nuevos enfoques y líneas de investigación y modelado más inclusivas y complejas que intentan incorporar más dimensiones del sistema acoplado. Lo anterior implica grandes desafíos para la investigación de las consecuencias y retroalimentaciones, que incluyen, entre otros temas, la identificación de vínculos causales entre los procesos y servicios de los ecosistemas y su dependencia de la biodiversidad, así como la identificación de puntos de inflexión más allá de los cuales se pierde la resiliencia de diferentes sistemas socioambientales [Verburg, 2006].

Los desafíos planteados requieren mejores respuestas, que ayuden en el manejo de la complejidad del sistema acoplado humano-ambiental [Verburg *et al.*, 2013]. Una de las respuestas a la complejidad son los modelos de cambio de cobertura y uso del suelo, debido a su combinación de dinámicas humanas y ambientales y a su necesidad de ser espacialmente explícitos en términos geográficos, en donde la configuración espacial de las coberturas y los usos del suelo afecta y es afectada por dichos procesos [Turner II *et al.*, 2007]. A pesar de estas complejidades, se ha explorado una variedad de modelos para satisfacer las necesidades de gestión de la tierra, a fin de evaluar y proyectar mejor el papel futuro del cambio de cobertura y uso del suelo en el funcionamiento del sistema terrestre, o simplemente para conseguir información sobre un sistema terrestre desde varias perspectivas [Turner II *et al.*, 2021]. Sin embargo, el uso predominante en la CCCUS de datos derivados de imágenes satelitales hace que la escala del pixel, que varía en tamaño desde menos de un metro hasta varios kilómetros, sea el grano más fino de especificidad espacial en el modelo [Turner II *et al.*, 2007].

Los modelos de cambio de cobertura y uso del suelo se emplean para probar la estabilidad de los sistemas humanos

y ambientales vinculados a través de la construcción de escenarios. Asimismo, tienden a aplicar herramientas avanzadas de modelado estadístico a conjuntos de datos espacialmente explícitos o a simular sistemas humano-ambientales basados en un conjunto de reglas de comportamiento idealizadas, aunque también existen combinaciones de estos enfoques [Verburg *et al.*, 2015].

Los modelos estadísticos se basan en la suposición de que los procesos de cambio de uso de la tierra son estacionarios, mientras que los modelos sustentados en procesos representan las transformaciones en los procesos a lo largo del tiempo y relacionadas con un cambio en las propiedades del sistema. Dichos cambios en el comportamiento del sistema pueden suceder una vez que se traspasa algún umbral o pueden desencadenarse por eventos únicos, ya sean biofísicos (sequía, huracanes, degradación del suelo u otros) o socioeconómicos (por ejemplo, innovación tecnológica, guerra o crisis económica) [Turner II *et al.*, 2007].

Diversos modelos de cambio de cobertura y uso del suelo se han diseñado a escala de los sistemas humano-ambientales en su conjunto o a la escala de agentes que expresan unidades individuales de toma de decisiones, interactuando entre sí y con su entorno. En ese sentido, el modelado estadístico ha dado lugar a un creciente cuerpo de investigación que vincula a las personas con los píxeles, así como las actividades de las personas se relacionan con la cobertura del suelo derivada mediante recursos satelitales de alta resolución [Sohl y Sleeter, 2012]. Los modelos de simulación a nivel de agentes también están ganando terreno. El cambio ambiental se simula como una propiedad emergente de las interacciones entre agentes [Milne *et al.*, 2009].

El modelado de cambio de cobertura y uso del suelo encara numerosos retos [Turner II *et al.*, 2007]. Las diferencias espaciales y temporales entre las unidades espaciales que determinan los procesos biofísicos y la toma de decisiones por parte

de los actores es una de las mayores dificultades metodológicas que enfrenta el acoplamiento de subsistemas en estos modelos. Un marco sólido para una validación sistemática de las proyecciones de cambios en la tierra plantea otro de los desafíos esenciales de este campo de investigación; y lo mismo ocurre en el caso de las simulaciones de múltiples agentes, dada la necesidad de validar datos sobre los procesos de toma de decisiones y las interacciones entre actores. También es fundamental entender cómo la escala de análisis afecta los resultados del modelo, ya que algunos modelos se centran en predecir las tasas o cantidades de cambio y otros ponen más énfasis en los patrones espaciales.

Por otro lado, los modelos de cambio de uso de la tierra deben reparar en la endogeneidad de las variables, como las tecnologías de gestión de la tierra, las infraestructuras o las políticas de uso de la tierra. El modelado espacial confronta la necesidad de acoplar la dinámica de los subsistemas humanos y biofísicos con los resultados de utilidad para las evaluaciones de cambio de cobertura y uso de suelo. Este acoplamiento se concibe en el contexto de la teoría de la jerarquía, lo que da cabida a interacciones y retroalimentaciones de varios niveles dentro de los sistemas socioecológicos, definiendo así su resiliencia.

La representación de varias retroalimentaciones potenciales produce inestabilidad numérica en los modelos cuyos niveles de incertidumbre impiden su uso para la toma de decisiones [Kaimowitz y Angelsen, 1998]. Con ello, existe una gran diversidad de modelos de cambio de cobertura y uso del suelo que ofrecen ventajas y soluciones específicas al reto de mejorar la explicación y predicción de los cambios dentro de un sistema acoplado humano-ambiental cumpliendo con el requerimiento de un sinnúmero de elementos científicos y combinando aspectos como observaciones, procesos estudiados, experimentación y modelación.

En este capítulo, se presenta el proceso de construcción de escenarios prospectivos, generados con el apoyo de mapas

de coberturas que se obtuvieron mediante procesos de análisis y procesamiento de insumos cartográficos, utilizando una combinación de técnicas de percepción remota. Asimismo, se muestra la evaluación de un conjunto de variables socioeconómicas, seleccionadas para acoplar la dinámica de los subsistemas humanos y biofísico por un periodo de estudio de cuatro décadas. Se construyen diversos escenarios orientados al año 2039 con el propósito de prospectar diferentes trayectorias del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Cozihua).

MÉTODO

Área de estudio

El complejo hidrológico Cozihua forma parte de la región hidrológica costa de Oaxaca (RH21); se ubica en la región sur del estado; cubre una superficie de alrededor de 250 000 hectáreas; inicia en la Sierra Madre del Sur, en lo alto de la montaña Nube Flandes a 3 720 metros sobre el nivel del mar, y desemboca en el desarrollo turístico Bahías de Huatulco en el Océano Pacífico.

La intrincada orografía de la región propicia una diversidad de climas y asociaciones vegetales, que presentan una clara diferenciación espacial por sus condiciones biofísicas y las actividades socioeconómicas relativas a la generación y el uso de múltiples servicios ecosistémicos [Lozano-Trejo *et al.*, 2020]. Como se menciona en el primer capítulo, se registran diversos climas, entre ellos semifrío subhúmedo en la porción más alta, templado húmedo con lluvias en verano en la parte media y cálido subhúmedo en las partes bajas, con una variación de temperatura promedio de 5-26 °C y lluvia promedio anual entre 800 y 2 000 milímetros. Las comunidades vegetales asociadas con estas condiciones climáticas incluyen

bosques templados de pino-encino con áreas importantes de bosque mesófilo de montaña conservado en las partes altas y medias de la cuenca, así como selva mediana subperennifolia y caducifolia en las partes bajas de la cuenca. En la parte marina, la región se caracteriza por la presencia de corrientes débiles, mareas y oleajes mixtos. A lo largo de 26 kilómetros de la línea costera, los arrecifes coralinos forman una de las comunidades con mayor riqueza de especies de coral del Pacífico tropical mexicano, y se han descubierto 17 arrecifes de coral en el sistema de bahías, desde el río Copalita hasta la bahía de San Agustín [Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), 2003].

La actividad principal de aporte económico en el complejo es el turismo, seguido de la actividad forestal, la agricultura y la cafecultura. Dentro del complejo, se localiza el desarrollo turístico Bahías de Huatulco, principal puerto turístico de la región; también los principales asentamientos humanos, denominados Crucecita y Santa María Huatulco, para los cuales el complejo es su principal abastecedor de agua [González-Mora *et al.*, 2009]. A pesar del grado de conservación de la cuenca y su boyante actividad turística, se han identificado múltiples factores de deterioro ambiental. Las amenazas que requieren atención prioritaria en el complejo hidrológico Cozihua incluyen: la deforestación, los incendios, la disminución de la productividad en los cafetales, el avance de la frontera agropecuaria, la disponibilidad limitada de agua, el arrastre de sedimentos a la zona costera, la extracción de material pétreo, las prácticas turísticas desordenadas y la contaminación del agua. Algunas de ellas se mencionan en el primer capítulo para las cuencas Copalita y Huatulco. No obstante, la región guarda un gran potencial para encaminar su desarrollo hacia la sustentabilidad, gracias a su biodiversidad y riqueza cultural, lo que hace viables proyectos vinculados con la conservación, el buen uso del capital natural y la reconstrucción del tejido social de la región.

Modelos de simulación de cambio de cobertura y uso del suelo

Los modelos de simulación permiten evaluar la dinámica de la cobertura del suelo como un sistema acoplado humano-ambiental, para diversos problemas ambientales y sociales. En los últimos años, se ha desarrollado un gran número de modelos para conocer las necesidades de manejo del cambio de cobertura y uso del suelo, los cuales son una importante técnica para generar escenarios futuros, al analizar las conductas de manera computacional, experimentar con distintos *drivers* (impulsores) que contribuyen al cambio y, con ello, comprender la clave de las dinámicas de cambio en un área específica [Pérez-Vega *et al.*, 2012].

El análisis de la relación entre los cambios y sus variables con base en modelos de simulación de cambio de cobertura y uso del suelo posibilita generar varios escenarios tendientes a probar diversas teorías basadas en las causas de cambio [Orozco-Ávila *et al.*, 2022]. Las proyecciones futuras se sustentan en evidencia pasada reciente, lo que facilita ajustar los escenarios futuros con un conocimiento sólido de las fuerzas impulsoras de cambio. Modelar las condiciones que determinan el proceso de cambio conlleva una gran dificultad, por el número de variables impulsoras implicadas y la escala en la que interactúan en la zona de estudio [Chang-Martínez *et al.*, 2015].

Las aproximaciones de modelos de simulación se pueden dividir en modelos basados en actores o agentes y modelos basados en patrones [Orozco-Ávila *et al.*, 2022], que de manera predominante se clasifican en tres grupos: autómatas celulares (AC), modelos basados en agentes (MBA) y sistemas dinámicos (SD) [Degenne y Lo Seen, 2016]. En el presente trabajo, para el diseño de los escenarios prospectivos se toma como guía el enfoque de sistemas dinámicos, dentro del grupo de modelación basado en patrones, en el cual se sigue una línea tendencial del uso de mapas de cobertura, obtenidos de imágenes satelitales,

mapas de variables descriptivas de la zona de estudio, tablas de información y censos. Adicionalmente, en este tipo de modelación, se describe la relación entre cambios en el paisaje y sus características, con base en el análisis de los cambios pasados, para el posterior desarrollo del escenario prospectivo [Chang-Martínez *et al.*, 2015].

Como parte de la investigación, se proyectaron mapas de suelo y cobertura para 1989, 1999, 2011 y 2019, con el propósito de evaluar un conjunto de variables que llevaran a la generación de modelos prospectivos orientados al año 2039. Los resultados sirven para analizar algunas de las implicaciones socioambientales futuras dentro del complejo Cozihua.

El procedimiento de modelación se dividió en cuatro pasos: 1) clasificación de imágenes satelitales para la obtención de insumos de cobertura y uso del suelo; 2) análisis de la intensidad de cambio de cobertura y uso del suelo; 3) predicción del cambio de cobertura y uso del suelo; y 4) proceso de validación de mapas de cobertura. De igual modo, se usó el *software* científico TerrSet, en específico la herramienta *Land Change Modeler* (LCM), un modelo enfocado en sentido primordial a los problemas del cambio de cobertura y uso del suelo, al igual que a las necesidades de análisis de conservación de la biodiversidad [Eastman *et al.*, 2005]. El modelo sirve para elaborar una proyección espacialmente explícita hacia el futuro, como posibles hechos, es decir, futuros inciertos, pero útiles ante todo para la toma de decisiones y su evaluación [Sharp *et al.*, 2016].

Clasificación de imágenes satelitales para la obtención de insumos de cobertura y uso del suelo

La clasificación por medio de máquinas de aprendizaje ha prosperado en el enfoque de los sistemas remotos, en especial porque sus algoritmos están disponibles para modelar coberturas complejas, aceptan gran número de variables de

entrada y no hacen ningún tipo de suposiciones acerca de la distribución de los datos [Maxwell *et al.*, 2018].

La creación del modelo implicó el trabajo con cuatro imágenes satelitales de Landsat (cuadro 4.1). Al comenzar el proceso de selección de imágenes, se trabajó en un estudio con las respuestas espectrales en un conjunto de diferentes coberturas considerando la temporalidad, a fin de entender cuáles eran las temporadas anuales en que se lograba una mejor separabilidad entre coberturas y, con base en dicho estudio, establecer el sistema de clasificación encauzado a la obtención de coberturas mejor definidas en la clasificación.

La imagen de diciembre de 2018 sirvió como insumo del año 2019, por ser la última disponible e idónea considerando las especificaciones del proyecto Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change (TRASSE) y el inicio de la presente investigación.

Cuadro 4.1. Imágenes del programa Landsat empleadas para la elaboración de mapas temáticos de cobertura y uso del suelo del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Oaxaca, México), 1989-2019

Sensor	Fecha de adquisición	Archivo
Landsat 4	04/enero/1989	LT04_L1TP_024049_19890104_20170204_01_T1
Landsat 5	25/febrero/1999	LT05_L1TP_024049_19990225_20161219_01_T1
Landsat 5	25/enero/2011	LT05_L1TP_024049_20110125_20161010_01_T1
Landsat 8	30/diciembre/2018	LC08_L1TP_024049_20181230_20190130_01_T1

Fuente: elaboración propia.

Las máquinas de soporte vectorial constituyen una técnica supervisada y estadística que divide un conjunto de datos en un número de clases predefinidas, con el propósito de ubicar una línea clasificatoria límite para evitar el mayor número

de errores; consideran un margen entre los datos, cuyo margen menor representa una confiabilidad inferior de la clasificación; recurren a un proceso de entrenamiento hasta hallar un clasificador óptimo que separa los datos de entrenamiento y, *a posteriori*, repite los mismos parámetros y configuración para la división del conjunto de datos de entrada [Núñez *et al.*, 2019].

Análisis de la intensidad de cambio de cobertura y uso del suelo

En este estudio se utilizó el marco de análisis de intensidad para evaluar la dinámica de cambio a nivel creciente de detalle: intervalo, categoría y transición [Alvarado-Duran *et al.*, 2022]. Se trata de un marco teórico-matemático que en términos generales compara la intensidad de cambio distribuido de manera uniforme a niveles de intervalo, categoría y transición, y que sirve de referencia para comparar el cambio observado en los mismos niveles jerárquicos [Farfán Gutiérrez *et al.*, 2016]. Para el análisis de intensidad, es necesario tomar como punto de partida una matriz de tabulación cruzada en que las coberturas de dos fechas se relacionan. En las filas de esta matriz, se representan los datos de la primera fecha; y en las columnas, los datos de la segunda fecha. En este trabajo, se construyeron tres matrices conforme a los resultados de los mapas de cobertura y uso de suelo que se elaboraron mediante la clasificación de imágenes Landsat para el área de estudio en los periodos 1989-1999, 1999-2011 y 2011-2019.

La interpretación del análisis de intensidad distingue tres niveles principales. El primer nivel hace referencia a la intensidad de cambio dentro de cada periodo de tiempo, y compara los periodos para definir cómo varía la tasa de cambio anual entre los intervalos analizados [Farfán Gutiérrez *et al.*, 2016]; la línea de intensidad uniforme se emplea para definir el periodo de mayor intensidad.

El segundo nivel corresponde al análisis por categorías, que parte de la superficie de cada categoría al inicio y final del periodo, para entonces comparar la intensidad de su cambio como pérdida y ganancia respecto de la intensidad total de cambio del dominio, es decir, frente a la intensidad uniforme para el nivel de categoría. Si la intensidad de ganancias para la categoría es mayor a la intensidad de cambio global, la categoría en cuestión ganará de forma activa; de lo contrario, su ganancia será inactiva. El análisis funciona de igual forma para las pérdidas: si la intensidad de pérdidas observadas para la categoría es mayor que la intensidad global, la categoría perderá de manera activa; en el caso contrario, lo hará de modo inactivo.

El tercer nivel comprende el análisis de la transición de una categoría arbitraria a una categoría específica de ganancias y a una categoría específica de pérdidas. Los parámetros de intensidad de las transiciones se definen conforme al comportamiento de la intensidad con la que gana una categoría n de una categoría i . Si la intensidad con la que gana n es mayor que la intensidad uniforme de transición de las categorías restantes a la categoría n , esta ganancia tiene como blanco a i ; en cambio, si la intensidad de la transición descrita es menor a la intensidad de transición de las categorías restantes, se dice que n evita a la categoría i .

En cuanto a la transición de una categoría m que pierde hacia una categoría distinta j , se compara la intensidad con que m pierde hacia la categoría j . Si la intensidad de esta transición es mayor a la intensidad uniforme de todas las categorías, excepto m hacia la categoría j , entonces j recibe la pérdida de m ; en el caso contrario, se dice que j evita las pérdidas de m , es decir, evita la transición [Pontius Jr. *et al.*, 2004]. El último nivel permite conocer la intensidad con que se transforman las coberturas, para determinar qué cambios son activos y si su intensidad varía en el periodo de análisis o si por el contrario son inactivas.

Predicción de cambio de cobertura y uso del suelo

Los modelos prospectivos contribuyeron a identificar patrones y estimar efectos del cambio de suelo y cobertura con la ayuda de variables predictivas de naturaleza socioambiental. Mediante un taller de trabajo interno, se examinaron 35 *drivers* (factores determinantes o impulsores de cambio) clasificados en cinco categorías (cuadro 4.2). Las variables para la zona de estudio se tomaron del portal de Geoinformación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio, 2022]; el resto de las capas vectoriales y rásteres fueron aportados por miembros del proyecto TRASSE [Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change, 2018], y derivados mediante diferentes procedimientos de geoprocesamiento.

Posteriormente, todos los *drivers* se testearon para determinar cuál conjunto llevaría a una mejor interpretación de las coberturas; esta herramienta indica un valor por cada *driver* de la fuerza potencial explicativa sobre el periodo de tiempo estudiado para cada una de las categorías. Dicho valor se calcula usando el coeficiente V de Cramer, en donde 0 representa a una variable sin significancia explicativa; el rango de 0.0001-0.1499 indica poca significancia; 0.15-0.3999, señala significancia; y un valor igual o mayor a 0.40 simboliza a una variable con mucha significancia en la explicación de cambios en el periodo [Eastman, 2016].

Cuadro 4.2. Variables consideradas para explicar el cambio de cobertura y uso de suelo del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Oaxaca, México)

Biofísicas	Sociodemográficas	Económicas y productivas	Políticas e institucionales	Comunicaciones y transporte
Temperatura media anual (1910-2009)	Densidad de población por localidad	Unidades económicas del sector turístico, conforme al Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) 2019	Pago por Servicios Ambientales: Programas Nacionales y Fondos Concurrentes (2003-2019)	Red Nacional de Caminos (2018)
Degradación de suelo (2014)	Grado de marginación	Distancia a centroides del padrón cafetalero (2007)	Áreas Naturales Protegidas y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (2019)	Coberturas 3G y 4G (2018)
Red hidrográfica (2014)	Migración	Distancia ponderada (superficie) a centroides del padrón cafetalero		Accesibilidad (2018)
Tipos de climas	Distancia a localidades rurales	Categorías productoras de café (2017)		
Altitud (mmm)	Distancia a localidades urbanas	Porcentaje de producción de café por municipio		
Erosión (2014)	Socioecorregiones Conabio (2014)	Presencia de turismo por municipio		

continúa...

...continuación del cuadro 4.2.

Biofísicas	Sociodemográficas	Económicas y productivas	Políticas e institucionales	Comunicaciones y transporte
Edafología (2008)	Migración neta	Distancia a la frontera agrícola		
Áreas de captación	Propiedad social (2018)			
Evapotranspiración	Tasa de crecimiento poblacional (2000-2010)			
Régimen de humedad				
Índice topográfico de humedad (ITH)				
Pendiente				
Curvatura				
Aspecto				

Fuente: elaboración propia; nmm: nivel medio del mar.

Posteriormente, en el *software* TerrSet, se realizaron pruebas con los submodelos derivados del análisis de intensidad, para lo cual se variaron los parámetros y se combinaron las variables de cambio, con el objetivo de determinar el ajuste óptimo por submodelo, mejorar el resultado general del perceptrón multicapa y, finalmente, conseguir una mejor aproximación y explicación de los cambios de uso de suelo. Esta etapa consistió en modelar las transiciones usando un enfoque de Red Neuronal Artificial basado en el Perceptrón de Múltiples Capas (PMC), una de las arquitecturas de red más utilizadas [Kavzoglu y Mather, 2003]. El PMC es un conjunto de unidades de entrada (capa de entrada), con nodos de cálculo (capas ocultas) y nodos de cálculo/salida (capa de salida) unidos por una red de conexiones que funcionan como un grupo de pesos. La red se entrena por el algoritmo *Backpropagation*, que extiende los errores de la capa de salida a la capa de entrada de forma iterativa, para ajustar los valores de los pesos [Kavzoglu y Mather, 2003].

Los parámetros estándares para el funcionamiento del PMC se basaron en 50 % de sitios de entrenamiento, un factor de movimiento fijo a 0.5 y una tasa de aprendizaje dinámica [Bishop, 1995]. El modelado del cambio de cobertura y uso del suelo hasta el año 2039 se desarrolló por medio de la aplicación de cadenas de Markov, con los mapas de cobertura y uso de suelo proyectados para el periodo 1989-2019 y la probabilidad de transición calculada anteriormente [Pontius Jr. y Malanson, 2005].

El procedimiento previo produce matrices de transición por categoría, una matriz de área de transición, y un conjunto de imágenes de probabilidad condicional mediante el análisis de cobertura y uso del suelo de 1999 a 2011. El resultado llevó a obtener áreas de ganancias y pérdidas por cada categoría hasta 2039, para los escenarios concebidos de la siguiente manera:

- *Escenario tendencial* (E1). Este escenario refleja las tendencias actuales en el cambio de cobertura y uso del suelo, durante un periodo inicial que abarcó desde 1989 hasta 2019 y que se extiende por 20 años desde 2019.
- *Escenario de conservación* (E2). Este escenario extiende la conservación de bosques y sistemas agroforestales, con un cambio de cobertura y uso del suelo reducido, en el periodo 2019-2039.

Proceso de validación

La eficacia del modelo se evaluó mediante la validación de patrones que emplean una métrica para los datos de salida del modelo, con el propósito de saber de qué forma el modelo servirá para una aplicación específica [Orozco-Ávila *et al.*, 2022]. De este modo, el mapa real de cobertura y uso de suelo del año 2018, tomado del Inegi, se contrastó con los mapas de cambio de uso de suelo simulados para el año 2019, contruoidos con base en los insumos originales de cobertura de los periodos 1989-1999, 1989-2011 y 1999-2011.

Las comparaciones se efectuaron mediante el estadístico *kappa*, un coeficiente utilizado para cuantificar el acuerdo de posición espacial entre los valores categóricos de los mapas, ya que mide la frecuencia del acuerdo entre el mapa observado o real y el que se supondría por el azar, es decir, el simulado [Viera y Garret, 2005].

El coeficiente *kappa* arroja valores de 0-1, donde 0 indica un total desacuerdo; 0.40-0.60, un acuerdo moderado; y 0.61 o superiores, un acuerdo casi perfecto [Amato *et al.*, 2018]. Así, el resultado del índice determina la eficacia de los insumos del modelo [Hagen, 2002]. Adicionalmente, el coeficiente *kappa* puede interpretarse como el producto de los factores *klocation* y *khistogram*, que Pontius Jr. [2000] propuso como una forma para precisar las similitudes entre los dos modelos.

De conformidad con Hagen [2002], *klocation* es el componente que establece la distribución espacial de la cantidad de clases, es decir, mide el acuerdo de posición espacial de las categorías en los dos mapas; por su parte, *khistogram* mide el acuerdo cuantitativo entre los dos mapas, es decir, el tamaño de las clases expresado en celdas.

En esta investigación, los modelos se validaron con el *software Map Comparison Kit*, del cual también se extrajeron los datos del coeficiente *kappa* y de sus componentes *klocation* y *khistogram*, que sirvieron para determinar cuál de los modelos obtenidos se aprovecharía para crear los modelos prospectivos.

RESULTADOS

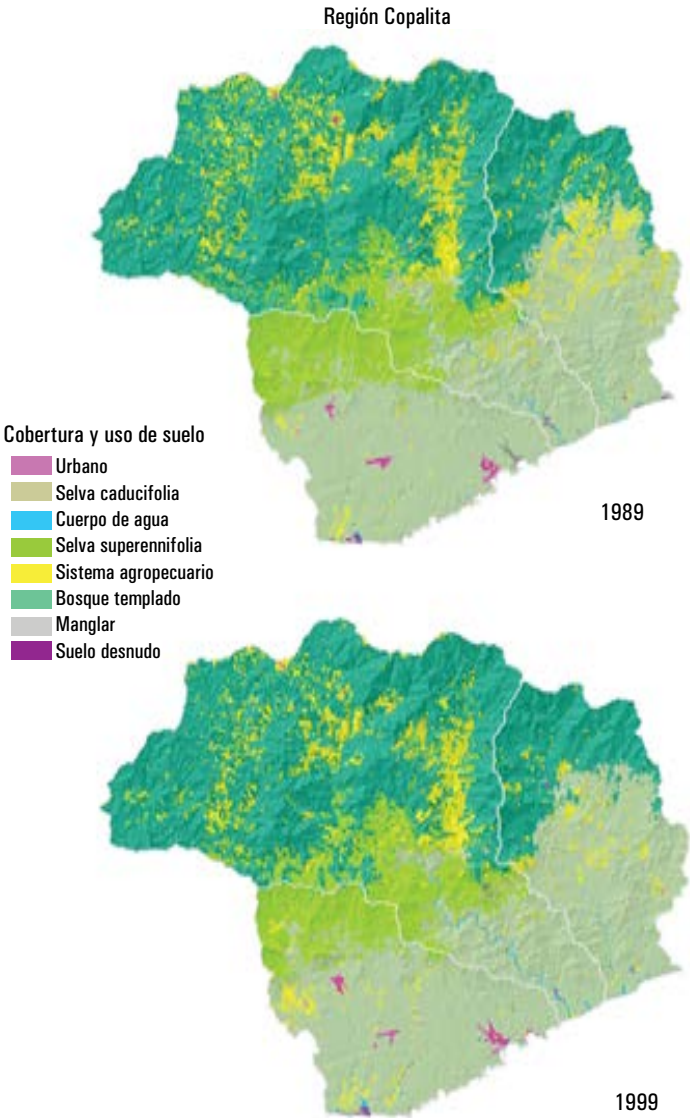
Mapas de cobertura y uso del suelo del complejo hidrológico Cozihua, 1989-2019

Se elaboraron cuatro mapas de cobertura y uso de suelo conforme a las fechas seleccionadas, cada uno con ocho clases de cobertura y uso de suelo.

Análisis de la intensidad de cambio de cobertura y uso de suelo en el complejo Cozihua: 1989-1999, 1999-2011 y 2011-2019

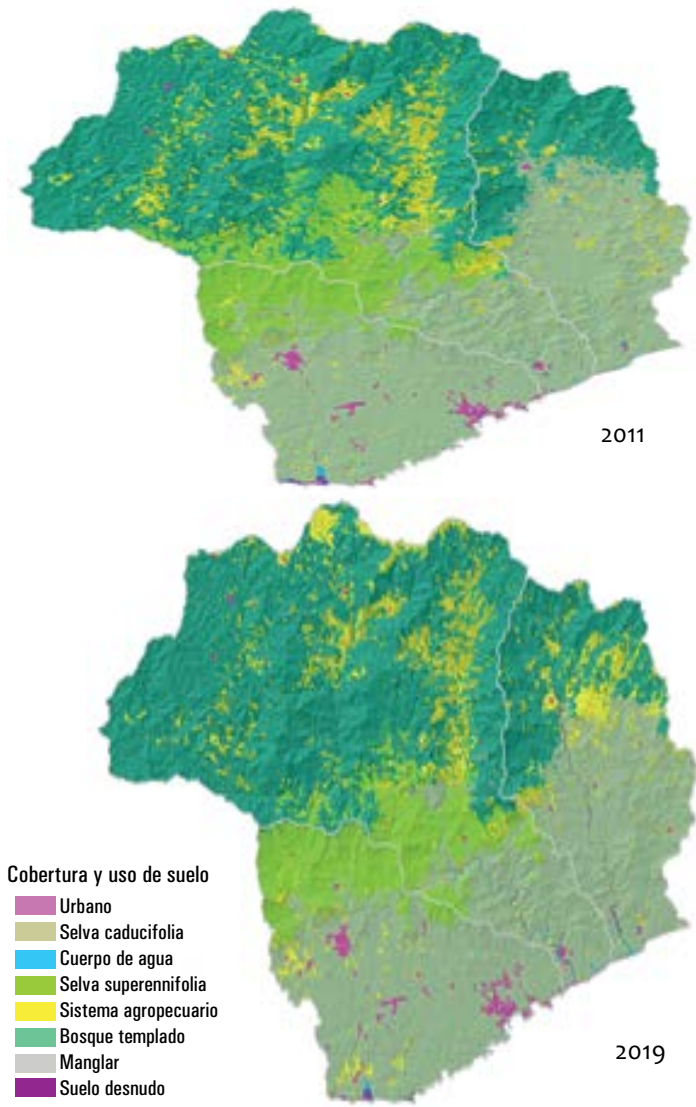
Se evaluaron las categorías de cobertura y uso de suelo definidas para el complejo hidrológico Cozihua: bosque, selva caducifolia, selva subperennifolia, sistema agropecuario, sistema urbano, cuerpo de agua, suelo desnudo y manglar (cuadro 4.3). En general, la región presentó una intensidad de cambio de 1 % para los tres periodos de tiempo evaluados (mapas 4.1 y 4.2).

Mapa 4.1. Análisis de intensidad de cambio de cobertura y uso de suelo en el complejo hidrológico Cozihua (Oaxaca, México), en el periodo 1989-1999



Fuente: elaboración propia.

Mapa 4.2. Análisis de intensidad de cambio de cobertura y uso de suelo en el complejo hidrológico Cozihua (Oaxaca, México), en el periodo 2011-2019



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4.3. Superficies por cobertura y uso de suelo del complejo hidrológico Cozihua (Oaxaca, México), 1989-2019

Clase	Superficie por años (hectáreas)			
	1989	1999	2011	2019
Urbano	766	903	2 092	2 324
Selva caducifolia	98 437	103 509	104 592	96 320
Cuerpo de agua	581	1 342	460	497
Selva subperennifolia	30 408	30 650	31 891	28 592
Sistema agropecuario	30 528	25 435	26 017	30 296
Bosque	121 091	120 397	117 143	123 591
Suelo desnudo	808	399	424	1 035
Manglar	142	127	142	106
Total	282 761	282 761	282 761	282 761

Fuente: elaboración propia.

El periodo 1999-2011 registró el valor más pequeño, con 0.98 %, mientras que el porcentaje mayor, de 1.91 %, se observó en el periodo 2011-2019. La categoría de sistema agropecuario para los tres periodos se desveló como la clase más grande y activa tanto en ganancias como en pérdidas, lo que resultó en especial significativo para el periodo de tiempo más reciente (2011-2019).

Por otro lado, las categorías de bosque y selva caducifolia se mantuvieron inactivas para todos los periodos. Las categorías más pequeñas, suelo desnudo y urbano, fueron las más activas en ganancias, mientras que el cuerpo de agua constituyó la clase más activa en pérdidas. Mención aparte merece la clase de manglar, cuya intensidad de pérdida resultó significativamente intensa para el periodo de tiempo más reciente.

Las ganancias del sistema agropecuario provinieron principalmente del bosque y el suelo desnudos, sobre todo durante los dos últimos periodos de tiempo evaluados. De la

misma manera, la pérdida del sistema agropecuario emanó de la categoría de bosque. En resumen, el intercambio entre categorías de bosque y sistema agropecuario se reflejó en un incremento de la superficie agropecuaria a costa del bosque, mientras que el incremento del bosque se derivó de una ganancia a costa de la selva subperennifolia y el sistema agropecuario. Finalmente, el incremento de las áreas urbanas se encontró directamente relacionado con la pérdida de suelo desnudo y selva caducifolia.

Construcción de escenarios proyectados al año 2039 en el complejo Cozihua

Respecto de las variables explicativas incorporadas, gracias a la utilización del coeficiente V de Cramer, las 35 variables de cambio probadas se redujeron a ocho variables: las más idóneas para explicar las causas de cambio de uso de suelo en la región en estudio (cuadro 4.4). Según sus valores, estas variables muestran en todos los casos un coeficiente V de Cramer con suficiente significancia para representar la relación entre las variables y los cambios en la cobertura del suelo [Eastman, 2016].

Conforme al cuadro anterior, las variables elegidas abarcan cinco categorías que en su mayoría expresan el carácter biofísico y antrópico del complejo hidrológico Cozihua. En concordancia con estas variables explicativas y el resultado del análisis de intensidad de cambio de cobertura y uso de suelo para las fechas disponibles, se probaron varias combinaciones hasta lograr el mejor ajuste entre las variables explicativas y las cinco transiciones seleccionadas entre las más relevantes: permanencia de bosques y selvas, expansión de sistemas agropecuarios, expansión urbana, revegetación e intercambio entre bosques y selvas.

Cuadro 4.4. Coeficientes V de Cramer relativos a las variables explicativas para la construcción de escenarios proyectados al año 2039, del complejo hidrológico Copalita-Zimatán-Huatulco (Oaxaca, México)

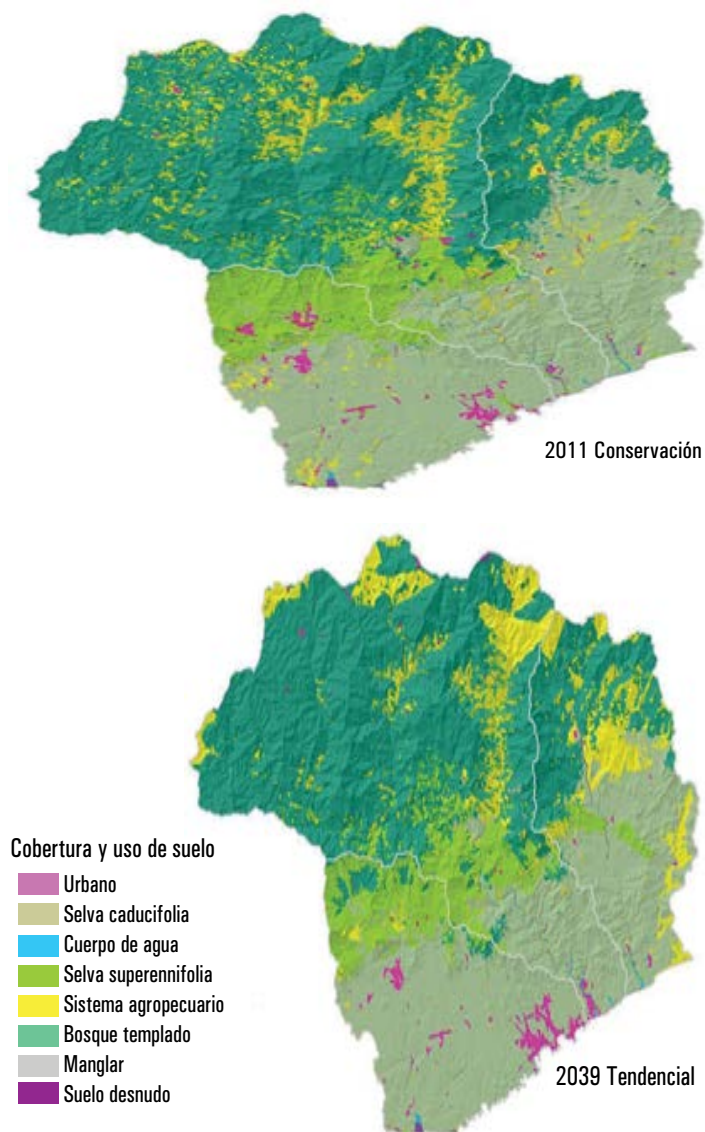
Variable	Categoría	V de Cramer
Probabilidad de evidencia	N/A	0.5550
Altitud	Biofísica	0.3537
Propiedad social	Sociodemográfica	0.3373
Coberturas 3G y 4G	Comunicaciones y transporte	0.3279
Socioecorregiones	Sociodemográfica	0.3199
Porcentaje de producción de café por municipio	Económica-productiva	0.2899
Migración neta	Sociodemográfica	0.2783
Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación o áreas naturales protegidas	Político-institucional	0.2417

Fuente: elaboración propia.

Por último, se modelaron las transiciones usando una red neuronal artificial basada en el perceptrón de múltiples capas, cuya principal ventaja es que puede modelar relaciones no lineales entre variables y es el más robusto de los diferentes procedimientos empleados para el modelado del potencial de transición [Eastman, 2016]. Con el fin de evaluar el modelo potencial de transición, para la red neuronal artificial se calcularon la tasa de precisión, un estadístico que obtiene la raíz cuadrada media (RMS, del inglés *root mean square*) de entrenamiento y la RMS de prueba. Estos valores variaron entre 0.2095 y 0.3013 para el entrenamiento, y 0.2105 y 0.3105 para la prueba, con 72.9-83.5 % de confiabilidad. Estas probabilidades se usaron para generar un modelo prospectivo tendencial y uno restrictivo o de conservación (mapa 4.3).

Mapa 4.3. Escenarios de cambio de uso del suelo

Región Copalita



Fuente: elaboración propia.

Validación de escenarios

En la validación, se comparó el mapa de cobertura y uso de suelo simulado a 2019 con el mapa original de cobertura y uso de suelo del mismo periodo, y pudieron observarse las fracciones iguales y desiguales entre ambos mapas. Las regiones con una predicción correcta sumaron 82.2 %; los usos de suelo que cambiaron y que, por tanto, no correspondieron con la simulación a 2019 representaron una fracción incorrecta de 17.8 % de errores en la predicción.

Con base en la escala creada por Viera y Garret [2005], el estadístico *kappa* estándar que mostró un valor de 0.737 predijo un acuerdo sustancial: el *khistogram* arrojó un valor de 0.927, es decir, un acuerdo casi perfecto; y *klocation*, un resultado de 0.795, que también es un acuerdo sustancial. Estos resultados de carácter positivo dieron paso seguro a la generación de los dos escenarios que se muestran en la figura 4.3.

CONCLUSIONES

La articulación entre la CCCUS y la modelación prospectiva puede jugar un papel importante en la gestión territorial y la valoración integral de servicios ecosistémicos. El análisis prospectivo, a través de modelos espacialmente explícitos, facilita un estudio comprensivo de la dinámica de la cobertura del suelo como un sistema acoplado humano-ambiental para la atención de problemas ambientales y sociales relacionados con la gestión territorial.

En este capítulo, se elaboraron mapas de cobertura y uso de suelo conforme a la clasificación de imágenes Landsat y métodos de clasificación supervisados que se apoyaron en máquinas de soporte vectorial. Posteriormente, se utilizó el método de redes neuronales, basado en aprendizaje, con el fin de identificar la magnitud de los cambios mediante el análisis de

intensidad de cambio en las coberturas y uso de suelo anteriores basadas en un conjunto de *drivers* o impulsores de cambio identificados como significativos.

Finalmente, se construyeron proyecciones hasta 2039, a partir de dos modelos sustentados en los mapas de probabilidad del periodo 1989-2019.

La distribución de las diferentes coberturas y usos de suelo que el escenario tendencial predijo hasta el año 2039, en comparación con los insumos para el periodo previo de estudio, indicó un notable crecimiento de las grandes localidades urbanas costeras, un incremento de los suelos agropecuarios y una disminución de las coberturas de selva subperennifolia asociada al cultivo de café bajo sombra. Por otro lado, el escenario restrictivo o de conservación mostró una contención al crecimiento urbano costero, a cambio de un desarrollo urbano en la zona media, relacionado con el mantenimiento de la zona cafetalera, al mismo tiempo que reflejó una combinación de actividad agropecuaria y forestal en la parte alta del complejo hidrológico.

Los resultados representan así dos posibles trayectorias del sistema socioecológico del complejo hidrológico Cozihua, con base en las interacciones entre la sociedad y la naturaleza, que pueden contribuir a evaluar la vulnerabilidad y las compensaciones entre el rendimiento del café y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, como un modelo acoplado humano-ambiental para abordar la resiliencia de esta región.

REFERENCIAS

Alvarado-Duran, F. U. *et al.* [2022], “Análisis de intensidad de cambio de cobertura de uso de suelo y vegetación del Bosque de Agua de la Megalópolis de México”, V. Ávila Akerberg y T. M. González Martínez (coords.), *Científicos y sociedad en acción por la biodiversidad y la sustentabilidad del*

- bosque de agua de la megalópolis de México*, México, Universidad Autónoma del Estado de México, 70-77.
- Amato, F. *et al.* [2018], “Fuzzy definition of rural urban interface: An application based on land use change scenarios in Portugal”, *Environmental Modelling & Software*, 104: 171-187.
- Bishop, C. M. [1995], *Neural networks for pattern recognition*, Nueva York, Oxford University Press.
- Chang-Martínez, L. A. *et al.* [2015], “Modeling historical land cover and land use: A review from contemporary modeling”, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(4): 1791-1812.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) [2003], *Programa de Manejo Parque Nacional Huatulco*. México, México, Conanp, <https://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/huatulco.pdf>.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) [2022], “Portal de Geoinformación 2022”, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/region/biotic/sap_gw>.
- Crossman, N. D. *et al.* [2013], “Land science contributions to ecosystem services”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5): 509-514, <<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.003>>.
- Degenne, P., y D. Lo Seen [2016], “Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs”, *SoftwareX*, 5: 89-95.
- Eastman, J. R. [2016], *TerrSet. Geospatial Monitoring and Modeling System*, Worcester, Massachusetts, Clark University, <<https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/Terrset-Manual.pdf>>.
- Eastman, J. R. *et al.* [2005], “Transition potential modeling for land cover change”, D. J. Maguire *et al.* (eds.), *GIS, spatial analysis and modeling*, California, ESRI Press, 357-386.

- Farfán Gutiérrez, M. *et al.* [2016], “Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008), en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México”, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (90): 89-104, <<https://doi.org/10.14350/rig.48600>>.
- González-Mora, I. *et al.* [2009], “Memoria del Taller: propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco”, consultado el 12 de agosto de 2023, <<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2173.9041>>.
- Gutman, G. *et al.* (eds.) [2004], *Land Change Science. Observing, monitoring and understanding trajectories of change on the Earth's surface*, 6, Dordrecht-Heidelberg-Londres-Nueva York, Springer.
- Hagen, A. [2002], “Multi-method assessment of map similarity”, M. Ruiz, M. Gould y J. Ramón (eds.), *Proceedings of the 5th AGILE Conference on Geographic Information Science*, Palma de Maiorca, España, Universitat de les Illes Balears, 171-182.
- Kaimowitz, D., y A. Angelsen [1998], *Economic models of tropical deforestation. A review*, Bogor, Indonesia, Centre for International Forestry Research.
- Kavzoglu, T., y P. M. Mather [2003], “The use of backpropagating artificial neural networks in land cover classification”, *International Journal of Remote Sensing*, 24(23): 4907-4938.
- Kinnebrew, E. *et al.* [2021], “Approaches to interdisciplinary mixed methods research in land-change science and environmental management”, *Conservation Biology*, 35(1): 130-141.
- Liu, J. *et al.* [2013], “Framing sustainability in a telecoupled world”, *Ecology and Society*, 18(2): 26, <<https://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art26/>>.
- Lozano-Trejo, S. *et al.* [2020], “Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México”, *Terra*

- Latinoamericana*, 38(1): 57-66, <<https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>>.
- Maxwell, A. E. *et al.* [2018], "Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review", *International Journal of Remote Sensing*, 39(9): 2784-2817.
- Mayer, A. L. *et al.* [2016], "How landscape ecology informs global land-change science and policy", *BioScience*, 66(6): 458-469.
- Milne, E. *et al.* [2009], "Integrated modelling of natural and social systems in land change science", *Landscape Ecology*, 24: 1145-1147, <<https://doi.org/10.1007/s10980-009-9392-2>>.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) [2019], *Thriving on our changing planet. A decadal strategy for Earth observation from space: an overview for decision makers and the public*, Washington, The National Academies Press.
- Núñez, J. M. *et al.* [2019], "High-resolution satellite imagery classification for urban form detection", R. B. Rustamov (ed.), *Satellite information classification and interpretation*, Londres, IntechOpen.
- Orozco-Ávila, A. A. *et al.* [2022], "Modelos prospectivos compartidos de uso de suelo y vegetación para la región transfronteriza México-Guatemala", *Revista Geográfica de América Central*, 2(69): 389-414, <<https://doi.org/10.15359/rgac.69-2.14>>.
- Pérez-Vega, A. *et al.* [2012], "Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest", *Environmental Modelling & Software*, 29(1): 11-23, <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.09.011>>.
- Pontius Jr., R. G. [2000], "Quantification error versus location error in comparison of categorical maps", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8): 1011-1016.

- Pontius Jr., R. G., y J. Malanson [2005], "Comparison of the structure and accuracy of two land change models", *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2): 243-265.
- Pontius Jr., R. G. *et al.* [2004], "Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models", *Ecological Modelling*, 179(4): 445-461.
- Rindfuss, R. R. *et al.* [2004], "Developing a science of land change: Challenges and methodological issues", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(39): 13976-13981.
- Sharp, R. *et al.* (eds.) [2016], *INVEST + VERSION + User's Guide*, The Natural Capital Project/Stanford University/University of Minnesota/The Nature Conservancy/World Wildlife Fund.
- Sohl, T., y B. Sleeter [2012], "15 role of remote sensing for land-use and land-cover change modeling", C. P. Girl (ed.), *Remote sensing of land use and land cover. Principles and applications*, Boca Ratón, Florida, CRC Press, 225-239.
- TRASSE [2018], "Trajectories of Social-Ecological Systems in Latin American Watersheds: Facing Complexity and Vulnerability in the context of Climate Change", consultado el 13 de agosto de 2023, <<https://www.pp-al.org/es/proyectos2/trasse>>.
- Turner II, B. L., y P. Robbins [2008], "Land-change science and political ecology: Similarities, differences, and implications for sustainability science", *Annual Review of Environment and Resources*, 33: 295-316.
- Turner II, B. L. *et al.* [2021], "From land-use/land-cover to land system science", *Ambio*, 50(7): 1291-1294.
- Turner II, B. L. *et al.* [2007], "The emergence of land change science for global environmental change and sustainability", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52): 20666-20671.
- Verburg, P. H. [2006], "Simulating feedbacks in land use and land cover change models", *Landscape Ecology*, 21(8): 1171-1183.

- Verburg, P. H. *et al.* [2015], “Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective”, *Anthropocene*, 12: 29-41.
- Verburg, P. H. *et al.* [2013], “Land system science: between global challenges and local realities”, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(5): 433-437.
- Viera, A. J., y J. M. Garrett [2005], “Understanding interobserver agreement: The Kappa Statistic”, *Family Medicine*, 37(5): 360-363.
- World Wildlife Fund (WWF) [2009], “Memoria del taller: Propuesta de caudal ecológico en la cuenca Copalita-Zimatán-Huatulco, 2009. Manejo del agua en cuencas hidrográficas: desarrollo de nuevos modelos en México”, I. D. González Mora *et al.* (coordinadores del taller), Oaxaca, WWF, <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2013/03/Memoria_CE-CZH-2009.pdf>.

5. MODELACIÓN BASADA EN AGENTES PARA SIMULAR CAMBIOS EN SOCIOECOSISTEMAS: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE CAFÉ

Pierre Mokondoko Delgadillo

V. Sophie Ávila-Foucat

Driss Ezzine de Blas

José Mauricio Galeana-Pizaña

Juan Manuel Núñez

RESUMEN

Los sistemas agroforestales (SAF) de café bajo sombra son una estrategia prometedora del uso sustentable del territorio, pero el debate continúa centrado en cómo mantener la cobertura arbórea sin disminuir la productividad, ya que se reconoce que los SAF bajo sombra brindan múltiples beneficios y al mismo tiempo se ha documentado que sus rendimientos pueden ser inferiores a los de los sistemas de pleno sol. En consecuencia, el desarrollo de modelos espacialmente explícitos ha recibido especial atención en la investigación dirigida a esclarecer cómo el manejo influye en los factores biofísicos y, posteriormente, en el rendimiento. Por tanto, el objetivo de este capítulo es desarrollar un modelo basado en agentes para predecir el rendimiento de las fincas de la región Copalita, bajo tres tipos de manejo y en función de sus determinantes biofísicos. Los resultados indican que la sombra de los sistemas de transición entre el comercial y el tradicional (nivel intermedio)

no reduce el rendimiento, que permanece tan alto o similar al de los sistemas comerciales. Sin embargo, como efecto negativo, la sombra incrementa la incidencia de roya. Los cambios en el clima generan pérdidas en el rendimiento y aumentan la infestación de roya, lo que afectaría en mayor proporción a los sistemas más intensificados. La sombra en los sistemas tradicionales mitiga esos efectos; los productores también pueden contrarrestarlos mediante la reducción de la sombra y el aumento de la densidad de plantas de café, porque los beneficios de la cobertura arbórea son mayores que los posibles efectos negativos. Estos hallazgos inducen a optar por prácticas más amigables con el ambiente y un uso sostenible de los SAF, para atenuar los efectos del cambio climático.

INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los principales productos de exportación mundial, al igual que uno de los cultivos con mayor importancia en México [Do *et al.*, 2020; López Morgado y Díaz Padilla, 2020]. En particular, desde 2017, los sistemas agroforestales de café bajo sombra contribuyen con 0.66 % al producto interno bruto (PIB) y representan 1.36 % de la producción de bienes agroindustriales del país [Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa), 2017; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2020]. Por un lado, impulsan la creación de empleo para cerca de 23 millones de familias, en 806 000 hectáreas cultivadas por pequeños productores de un total de 4 557 comunidades en 12 estados [Tucker *et al.*, 2010; Toledo y Moguel, 2012; Barral *et al.*, 2015]. Por otro lado, suelen considerar variedades arábica y bajo sombra diversificada [Torres Castillo *et al.*, 2020]. Debido a su cobertura de árboles nativos y exóticos (para uso comercial y de consumo), son capaces de sostener una producción diversificada, mantener los

rendimientos, coadyuvar a la seguridad alimentaria, mitigar los efectos del cambio climático (CC) y, por tanto, favorecer el bienestar de las comunidades rurales [Cerdea *et al.*, 2017; Meylan *et al.*, 2017].

La comunidad científica sugiere que los SAF tradicionales constituyen una estrategia prometedora de uso sustentable del territorio, dado que conservan un porcentaje significativo de la biodiversidad y a la vez proporcionan servicios ecosistémicos importantes [Oijen *et al.*, 2018; Kuyah *et al.*, 2019]. El mercado actual exige condiciones de protección ambiental dentro de cada finca, de modo que los productores disfruten de un valor agregado por el café. Sin embargo, la viabilidad económica de los SAF es incierta, dada la fluctuación de los precios internacionales del café y crecientes costos de mano de obra y agroquímicos [Bateman *et al.*, 2013]. Estos sistemas a menudo dan lugar a pérdidas en los rendimientos, por el efecto combinado del incremento de la temperatura y la incidencia de la roya [Cerdán *et al.*, 2012; Vezy *et al.*, 2020; Durand-Bessart *et al.*, 2020]. Ante el efecto de la variabilidad climática, la roya (*Hemileia vastatrix*) plantea un reto importante a los productores, al reducir hasta 18 % el rendimiento [Freire Santos *et al.*, 2019]. Para afrontar esta crisis, se ha promovido el uso de variedades resistentes, que requieren de la poda o eliminación de árboles de sombra [Koutouleas *et al.*, 2022; Avelino *et al.*, 2022]. La adopción de esas prácticas intensificadas ha motivado la sustitución de cafetales de sombra por plantaciones de café robusta a pleno sol (*C. canephora*), la disminución de porcentajes de sombra, el abandono de las fincas y, por tanto, la pérdida de múltiples servicios ecosistémicos [Golden *et al.*, 2021].

El debate sigue versando sobre cómo mantener la cobertura arbórea o sombra sin disminuir la productividad [Foley *et al.*, 2011; Avelino *et al.*, 2018]. Se ha documentado que los sistemas diversificados brindan múltiples beneficios, lo mismo que su rendimiento suele ser inferior al de los sistemas

convencionales [López-Bravo *et al.*, 2012]. Un nivel excesivo de sombra (manejo inadecuado) redundaría en una mayor competencia por la luz, el agua y los nutrientes, entre árboles y arbustos de café [Kouadio y Newlands, 2021]. Por ello, en la investigación ecológica y agrícola se otorga especial atención a la generación de conocimiento para esclarecer cómo el manejo puede influir en la productividad [Piato *et al.*, 2020]. La estimación de rendimientos es un paso importante para reconocer los niveles de sombra o tipos de manejo eficientes. Los rendimientos dependen de los factores biofísicos (propiedades del suelo, lluvia, humedad del aire, flora y fauna), que están sujetos a patrones espaciales y características locales (climáticas, biogeográficas y topográficas); también se relacionan con las medidas de adaptación para minimizar el daño de la variabilidad climática [Filatova *et al.*, 2013; McGinnis y Ostrom, 2014]. Sin embargo, comprender los efectos netos de la variabilidad espacial de estos factores es un desafío que exige desarrollar nuevos enfoques para el diseño de los sistemas diversificados [Beenhouwer *et al.*, 2013].

El cultivo de café ha mostrado ser sensible ante cambios en los factores climáticos o variabilidad climática que afectan su desarrollo fenológico, provocan condiciones poco óptimas para su crecimiento y generan estrés hídrico [Villarreyna *et al.*, 2020]. Los sistemas diversificados pueden ser una alternativa para enfrentar ese problema, pero su efecto ha sido poco reportado. La predicción del rendimiento se ha hecho a través de modelos matemáticos, basados en procesos fisiológicos [Simonetti *et al.*, 2012], pero estudios previos han encontrado obstáculos en medir directamente cómo los SAF responden a cambios potenciales en el clima [Freire Santos *et al.*, 2019]. Los análisis estadísticos (como la regresión múltiple) para simular procesos subyacentes al rendimiento, a nivel de planta o parcela experimental, son difíciles de replicar [Rodríguez *et al.*, 2011]. Los modelos bioclimáticos y econométricos con patrones espaciales a escalas amplias no representan

la complejidad de las fincas y el efecto de los factores de cambio [Martin *et al.*, 2017]. Por consiguiente, se ha puesto mucho énfasis en las herramientas de modelación enfocadas en lograr la comprensión cuantitativa de la respuesta del café a cambios en los factores biofísicos y de manejo contextuales, a fin de anticipar la respuesta de los productores [Degenne *et al.*, 2010; Degenne y Lo Seen, 2016; Läderach *et al.*, 2017].

Desde el enfoque de “sistemas socioecológicos”, las técnicas de modelación ofrecen una herramienta de análisis de los efectos y relaciones entre las partes de un sistema, las cuales juegan un papel crucial en su evolución [Bennett y Gosnell, 2015; Leslie *et al.*, 2015; Trisurat *et al.*, 2016]. Un método para estudiar los sistemas socioecológicos es la modelación basada en agentes (MBA), donde las fincas se ven como un conjunto de agentes que interactúan con el ambiente y cuyos productores toman decisiones motivados por las interacciones entre los mismos, teniendo en cuenta los cambios en los factores locales y externos del sistema agroforestal [Tenza *et al.*, 2019]. Una primera utilidad de la MBA estriba en que plantea la simulación de distintas respuestas de los cafetales y productores, bajo escenarios de cambio climático [Lestrelín *et al.*, 2017]. Con las mejoras en las capacidades computacionales de los últimos años (*software* y *hardware*), se han desarrollado diversos modelos de sistemas socioecológicos [Torrens, 2010; Tenza *et al.*, 2019]. A pesar de los avances, el uso de modelos espacialmente explícitos ha sido ignorado, debido a la necesidad de una gran cantidad de datos específicos [Vigerstol y Aukema, 2011], cuya ausencia dificulta la parametrización y la exactitud de estas modelaciones basadas en agentes [Jahel *et al.*, 2018].

Por lo anterior, el objetivo del presente capítulo es desarrollar una MBA espacialmente explícita, a fin de predecir los rendimientos de las fincas de café de la región cafetalera de Copalita en Oaxaca, en función de sus determinantes biofísicos (topográficos, biológicos y de manejo) y bajo tres tipos

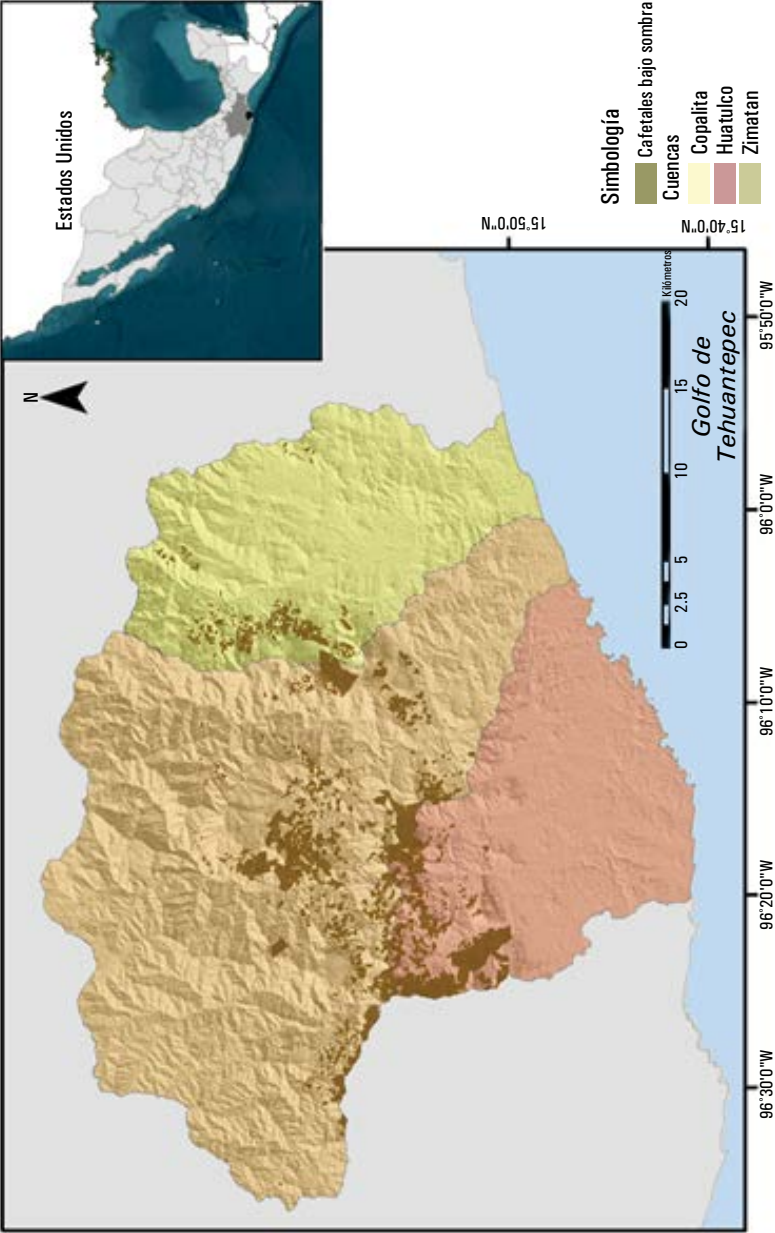
de manejo. Aunado a lo anterior, se simulan los efectos de la variabilidad climática y la adopción de diferentes prácticas de mitigación sobre los rendimientos o la respuesta ante los cambios. Desde el punto de vista metodológico, se utilizó lenguaje de programación Ocelet (OMP, del inglés *Ocelet Modelling Platform*), para la modelación dinámica y espacial [Degenne *et al.*, 2010]. Se pretende comparar tres tipos de manejo (comercial, tradicional y de transición), tomando en cuenta los factores que determinan y alteran la producción de café arábica. Los resultados servirán para construir teorías sobre el futuro que impone el cambio climático y diseño de políticas.

MÉTODO

Descripción de la región cafetalera de Copalita

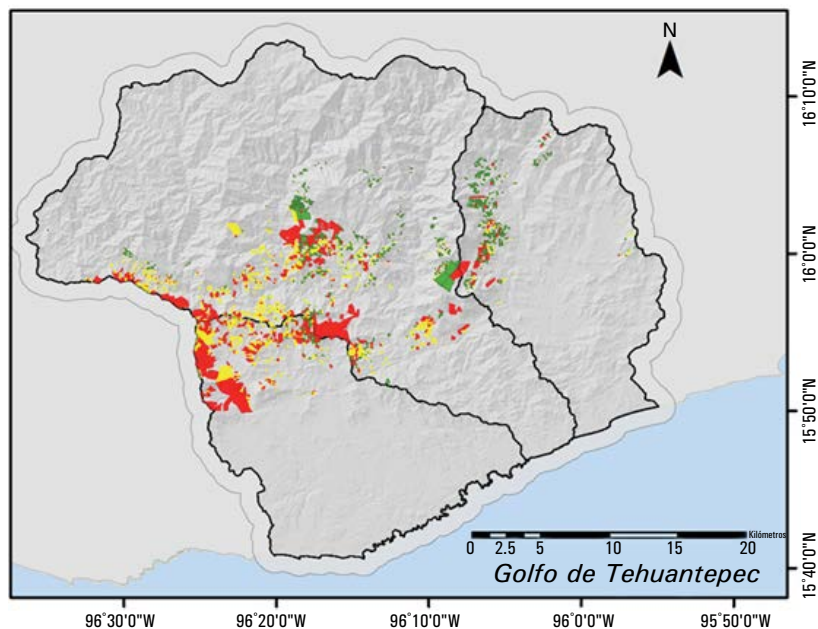
El modelo fue parametrizado con información biofísica para 3 849 fincas de la región cafetalera de Copalita, que comprende las cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco (mapa 5.1). La región presenta una diversidad de climas, como cálido, semicálido, templado y semifrío subhúmedo; una precipitación media anual de 1 693 milímetros, y una temperatura promedio de 19 °C [García Alvarado *et al.*, 2017]. Se trata de una de las zonas de mayor diversidad ecológica del estado, donde los ecosistemas naturales se han transformado en sistemas agrícolas, que abarcan desde monocultivos (como el maíz) hasta sistemas agroforestales diversificados, en el periodo 1989-2018 (las transiciones en las coberturas de uso del suelo y vegetación se detallan en el capítulo 4). Estos SAF se caracterizan por una producción de café bajo sombra, donde predominan las variedades arábica, Mundo Novo y Caturra. De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), estas variantes se cultivan en altitudes que van desde 230 hasta 1 970 metros sobre el nivel del mar, en alrededor de 13 909

Mapa 5.1. Ubicación de la región cafetalera de Copalita (Oaxaca, México) y distribución de las fincas de café bajo sombra en la región



Fuente: elaboración propia.

Mapa 5.2. Distribución espacial de tipos de manejo en la región cafetalera de Copalita, en Oaxaca



Tipos de manejo
agroforestal en la
región Copalita

- Comercial
- Tradicional
- De transición

Fuente: elaboración propia.

hectáreas. La producción está en manos de pequeños productores, y más de 90 % de ellos posee fincas con una superficie inferior a las cinco hectáreas [Torres Castillo *et al.*, 2020]; por tanto, el café bajo sombra coincide espacialmente con los *hotspots* o puntos críticos de biodiversidad (designados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Conabio) y crean un paisaje que brinda servicios ecosistémicos clave, como el almacenamiento de carbono, la polinización, la retención de sedimentos y la regulación de la cantidad de agua, entre otros.

A pesar de la amplia experiencia y conocimiento por parte de los productores de sistemas tradicionales, el creciente interés por aumentar la productividad los ha obligado a intensificar el manejo o sustituir el café de manera definitiva, lo cual altera drásticamente la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Tipificación de los sistemas agroforestales en la región cafetalera de Copalita

Dada la alta diversidad de tipos de manejo, se realizó un análisis de clústeres mediante sistemas de información geográfica (SIG), para construir una tipología de tipos de manejo que se podrían implementar (mapa 5.2), en función de las características de las fincas y el paisaje, lo que ayudó a explorar las similitudes y diferencias en los efectos de los factores biofísicos sobre el rendimiento. Para cada parcela, se tomaron en cuenta los porcentajes de sombra (derivados de imágenes del satélite RapidEye, con una resolución espacial de 5 metros); los índices de textura de contraste, homogeneidad y similitud (obtenidos de las imágenes); la distancia respecto de los caminos, y el área y la altura promedio. A continuación, se describen cada uno de los sistemas de manejo diferenciados.

Los *sistemas tradicionales* corresponden a la producción de café en áreas pequeñas de cultivo con porcentajes de sombra mayores o iguales a 60 %, por lo general en zonas altas. A medida que se intensifica el manejo, se vuelve un sistema de transición, con 40-60 % de sombra, que se distribuye a lo largo de la región. Los sistemas comerciales operan con niveles de sombra por debajo de 40 %, y en las fincas con mayor superficie, distribuidas en alturas bajas y en pendientes menos pronunciadas.

OBTENCIÓN DE DATOS

En esta investigación, se planteó usar el modelo Ocelet con la finalidad de disponer de una herramienta metodológica que se alimente de información biofísica actual, para estimar el rendimiento y predecir cambios en escenarios de cambio climático y de decisiones de adaptación.

El modelo se diseñó con un lenguaje de programación derivado de Java (*Domain Specific Language*), que simula la dinámica espacial de paisajes geográficos [Degenne *et al.*, 2010; Degenne y Lo Seen, 2016] mediante la modelación basada en agentes, evoluciona por medio de funciones lineales aplicadas en pasos discretos (años) y estima el nivel de rendimiento para el año 2019, además de que emplea análisis de escenarios para estimar los cambios en los rendimientos (comparando la línea base con los rendimientos predichos).

Para construir el modelo y lograr un entendimiento profundo del conjunto de factores biofísicos, se consiguió información de metaanálisis publicados [Kuyah *et al.*, 2019; Torres Castillo *et al.*, 2020; Koutouleas *et al.*, 2022; Mokondoko *et al.*, 2022], además de aplicar métodos participativos con expertos (académicos). Los factores que se identificaron para estimar los rendimientos fueron la sombra (%), la densidad de plantas de café (planta ha⁻¹), la altura promedio (m), la pendiente

promedio (%) y la incidencia de roya (%). La literatura muestra que los niveles bajos de sombra reducen la competencia por luz y nutrientes, y también facilitan el control de la roya en las hojas de café (CLR, del inglés *coffee leaf rust*) [Avelino *et al.*, 2020]. Los efectos interactivos de la sombra, la altitud (a medida que aumenta, la temperatura descende), la pendiente y la roya de la hoja del café se consideran factores que disminuyen el rendimiento [Cerdeña *et al.*, 2020; Kath *et al.*, 2020].

La densidad de plantas y los porcentajes de sombra se distinguen como las principales fuerzas impulsoras de la producción. Se utilizó una base de datos con información de 99 fincas del Sistema Comunitario para el Manejo y Protección de la Biodiversidad (Sicobi), a fin de construir el modelo biofísico mediante el uso de una regresión múltiple, con base en las relaciones señaladas por Mokondoko y colaboradores [2022]. Los rendimientos predichos para la región se correlacionaron con medidas de precipitación media anual (mm) y temperatura promedio (°C), para estimar los efectos de los cambios en el clima. La simulación actualizó los valores correspondientes de precipitación y temperatura en los escenarios de cambio climático, al igual que los valores de la sombra y densidad de plantas en los escenarios de adopción de medidas de mitigación.

Los límites de las parcelas se tomaron del Padrón Nacional Cafetalero [Sagarpa, 2007]. El porcentaje de sombra se calculó conforme a imágenes de satélite RapidEye para 2018 y con el uso del modelo SMACC (del inglés, *Sequential Maximum Angle Convex Cone*) en el *software* ENVI versión 5.3 [Yang *et al.*, 2012]. La densidad de plantas y la incidencia de la roya se estimaron mediante el análisis de regresión espacial en el *software* GEODA versión 1.18.0, con información de la base de datos del Sicobi y diferentes índices de vegetación derivados de las imágenes de satélite. La altitud y la pendiente se derivaron de un modelo digital de elevación del Inegi, con una resolución espacial de 15 metros, en el *software* ArcMap

versión 10.6. Los datos climáticos se obtuvieron de estaciones meteorológicas cercanas y se interpolaron usando el método de interpolación IDW (*Inverse Distance Weighting*), con una resolución espacial de 30 metros, en ArcMap.

Descripción del modelo

Primero, se calculó el rendimiento (Cy_{pi}) total por hectárea, como un indicador de los niveles de producción ($t\ ha^{-1}$). El área modelada representa un ráster de 45 800 por 42 593 píxeles, con resolución espacial de 15 metros. Las simulaciones requirieron de cinco tipos de agentes: el *conjunto de fincas*, caracterizadas por su sistema espacial de referencia (UTMZ14, datum WGS-84), sus coordenadas espaciales y el área; el *paisaje*, conformado por una colección de rásteres o *stacks*, cuyas bandas registran valores de altitud y pendiente; *biofactores*, con bandas que proporcionaron valores continuos de los porcentajes de sombra, la densidad de plantas y las tasas de infestación de roya de la hoja del café; el *cambio climático*, con bandas representadas por los valores alternativos de precipitación y temperatura, y dos escenarios de cambios en el porcentaje de sombra y la densidad de plantas; y por último, los *rendimientos*, referidos al conjunto de fincas para las que se estimaron los niveles de rendimiento y los cambios (deltas) por cada tipo de manejo.

Estimación de rendimientos

La estrategia fue la misma para cada parcela (finca). Se calculó la media de los valores de densidad de plantas, porcentaje de sombra, altitud, pendiente e infestación de roya, aplicando la ecuación 1, donde Cy_{pi} es el rendimiento predicho (p) de café

cereza para la finca i ; Cd_{it} , la densidad de plantas, la cual resulta de una función lineal de la altura promedio y el índice normalizado de humedad del suelo en el año t (NDMI, usando la ecuación 3); Sc , el porcentaje de sombra; Slp , la pendiente media; y CLR_{it} , el porcentaje de pérdida por efecto de la roya, estimado como una relación lineal de la temperatura ($Temp$) para la finca i , en el año t .

$$Cy_{pi} = 1.1522 + 0.000211Cd_{it} - 0.3794Sc - 0.000232Alt + 0.0839Slp - 0.0287CLR_{it} \quad (1)$$

$$CLR_{it} = -43.619 + 2.999Temp \quad (2)$$

$$Cd_{it} = 2.341 - 0.6684Alt + 2126NDMI_{it} \quad (3)$$

Predicciones de cambios

El efecto de la variabilidad climática en el rendimiento se estimó con las ecuaciones 4 y 5; el efecto de la CLR se calculó utilizando los valores de la temperatura y la ecuación 2; el rendimiento neto predicho (Ty_{it}) se estableció mediante la ecuación 6. El rendimiento en función de datos climáticos se obtuvo por medio de la ecuación 7, donde Cp_{it} y Ct_{it} son los rendimientos proyectados para la finca i , en los escenarios t , como función de los cambios en precipitación (P) y temperatura ($Temp$). Un modelo de ecuaciones estructurales sirvió para estimar los efectos conjuntos de dichos factores. La ecuación 7 muestra que la precipitación ejerce un mayor efecto en la variabilidad de Cy_{it} ($\beta = 0.63$; $\alpha = 0.001$).

$$Cp_{it} = -0.0000007P^2 + 0.0036P - 2.2086 \quad (4)$$

$$Ct_{it} = -0.0134Temp^2 + 0.5401Temp - 4.1299 \quad (5)$$

$$Ty_{it} = (1 - CLR_{it}) * Cy_{it} \quad (6)$$

$$Cy_{it} = (0.63 * Cp_{it}) + (0.37 * Ct_{it}) \quad (7)$$

Generación de escenarios

El grupo de entidades de *rendimientos* corresponde a las nuevas condiciones bajo dos escenarios de prácticas: uno con el uso de variedades de alto rendimiento y resistentes, como el Bourbon y Mundo Novo, que exigen un aumento en la densidad de 3 000 plantas ha⁻¹ [Torres Castillo *et al.*, 2020]; y otro con reducciones de 50 % en lo relativo a la sombra. Además, se planteó explorar el cambio en el rendimiento bajo escenarios de cambios en la temperatura y precipitación de 10 % y 20 % (incremento y reducción, respectivamente).

RESULTADOS

Caracterización de los tipos de manejo

De acuerdo con el cuadro 5.1 y con las características de las 3 489 fincas, el análisis de clúster mostró un total de 616 sistemas comerciales, 1 546 tradicionales y 1 687 de transición, lo que refleja una dominancia de los sistemas diversificados, los cuales constituyeron la posible elección de manejo por parte de los productores.

La organización espacial sugiere que los sistemas comerciales se distribuyen por lo general en regiones con alturas entre 915 y 1 517 metros; los tradicionales, en zonas más bajas (500-1 700 metros), con mayores temperaturas (28 °C en promedio); los de transición, a lo largo de toda la región. Se observaron niveles de sombra menores en los sistemas comerciales (<40 %), que coincidieron espacialmente con zonas de mayor precipitación y de laderas menos pronunciadas; por contraste, los sistemas tradicionales se ubicaron en regiones de menor precipitación y en terrenos de pendientes pronunciadas (con un rango de pendiente de 2-46 %).

**Cuadro 5.1. Estadísticos descriptivos de las variables biofísicas
y rendimientos en cada tipo de manejo de la región cafetalera de Copalita
(Oaxaca, México), 2018**

Factores biofísicos	Comercial	De transición	Tradicional
	Rango	Rango	Rango
Área (ha)	0.08-298	0.04-214	0.04-145
Sombra (%)	30-44	38-60	46-80
Densidad de café (planta ha ⁻¹)	040-2500	980-2500	961-1860
Altura (m)	851-1870	270-1950	230-1970
Pendiente (%)	3-39	2-44	3-46
Incidencia de CLR (%)	19-33	16-35	17-39
Precipitación (mm año ⁻¹)	1 280-2460	1 300-2480	1 210-2200
Temperatura (°C)	18-28	17-28	18-28
	Promedio	Promedio	Promedio
Rendimiento (t ha ⁻¹ año ⁻¹)	0.989	0.862	0.827

Fuente: elaboración propia. CLR: roya de la hoja de café; mm año: milímetros por año.

Estimación de rendimientos y efecto de los factores biofísicos

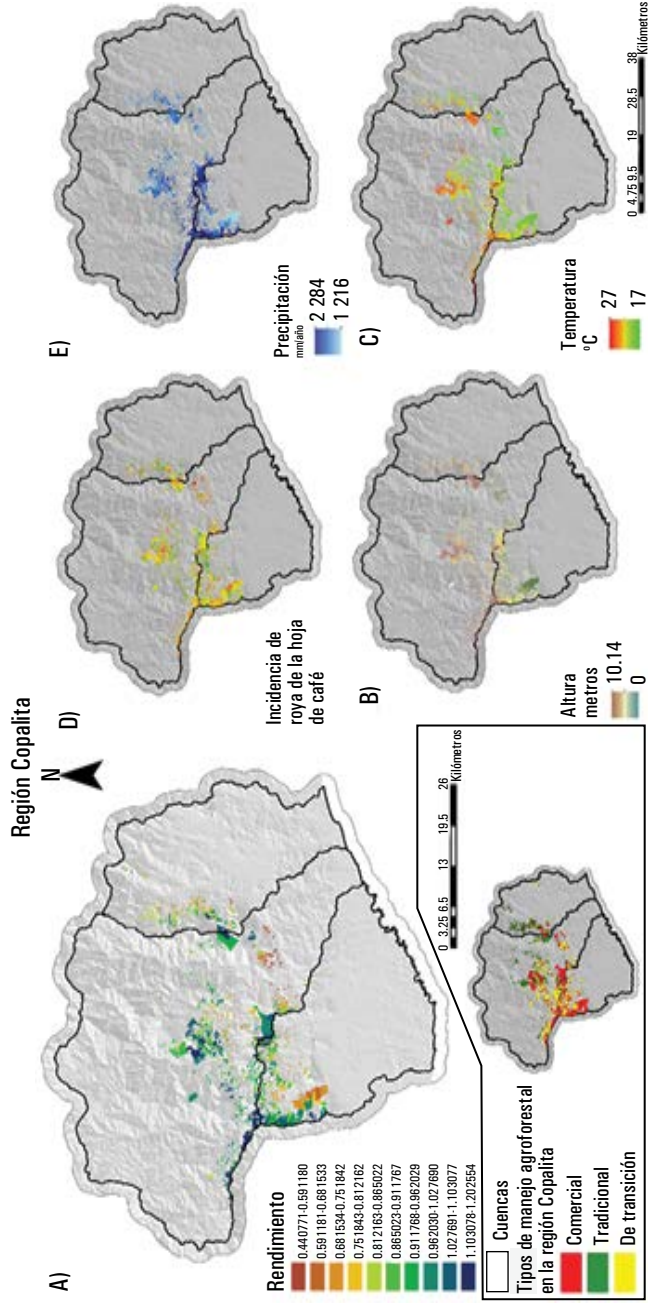
Los rendimientos para el año 2018 se estimaron por cada finca. La región mostró un rendimiento promedio de 869 t ha⁻¹ año⁻¹ de café cereza. El rendimiento máximo se encontró entre 1 800 y 2 200 milímetros por año⁻¹ de precipitación y entre los 19.5 °C y 22 °C. Los rendimientos en los sistemas comerciales resultaron significativamente más altos que los rendimientos de los sistemas tradicionales, pero sin diferencias notables con los de transición, lo que indica que los niveles de sombra entre 30 % y 50 % permiten rendimientos en altos niveles; sin embargo, se halló una relación negativa entre la sombra y los rendimientos en fincas con más de 60 % de niveles de sombra. Los rendimientos más bajos se presentaron en alturas inferiores a 8 000 metros, donde las temperaturas suelen ser más elevadas y, por ello, la incidencia de roya es más alta (mapa 5.3). La sombra benefició al rendimiento en alturas entre 800 y 1 300 metros, pero esto se redujo conforme la altura aumentó. Por otro lado, la sombra tuvo un efecto de amortiguamiento

o *buffer* en alturas bajas (menores o iguales a 900 metros), ya que los rendimientos de los sistemas tradicionales fueron más altos que en los sistemas comerciales.

Estimación de cambios en los rendimientos

Se propuso la generación de dos escenarios con tendencia al estrés hídrico y disminuciones en la precipitación: un escenario, E1, de 300 milímetros por año⁻¹ (10 %); y otro escenario, E2, de 600 milímetros por año⁻¹ (20 %). Se consideró el calentamiento global con temperaturas de 1.4 °C (E1) y 2.7 °C (E2). En el E1, se previó una caída de 10 % en el rendimiento por causa del cambio climático, con efectos más severos en alturas media y baja; el aumento en la temperatura significaría un aumento de 9 % en la infestación de la roya de la hoja del café. Bajo el escenario E2, se pronosticaron tendencias más severas, con una disminución de 43 % en los rendimientos y un incremento de 19 % en la infestación de la roya de la hoja del café (cuadro 5.2); en este escenario, el rendimiento de los sistemas comerciales se vería más afectado y la sombra jugaría el papel de *buffer* minimizando los efectos del cambio climático, y aun así, los sistemas tradicionales y de transición enfrentarían reducciones en los rendimientos. Bajo los supuestos adaptativos, en que los productores reducirían la sombra hasta en 50 % (E3), con respecto al porcentaje de sombra en el año 2018, las pérdidas en los rendimientos serían menores en comparación con los escenarios de cambios en el clima (E1 y E2), sobre todo en los sistemas tradicional y de transición. La combinación de un aumento en la densidad de café (E4), junto con la reducción de la sombra al 50 %, significaría un aumento de hasta 6 % en los rendimientos de los sistemas menos intensificados. Bajo el supuesto de una reducción de 20 % en la precipitación (E2), se esperarían reducciones de hasta 28 % en los rendimientos.

Mapa 5.3. Distribución espacial de los tipos de manejo, rendimientos, incidencia de roya, precipitación, temperatura y altura, en la región cafetalera de Copalita, en 2018



Fuente: elaboración propia. CLR: roya de la hoja de café.

Cuadro 5.2. Cambios porcentuales en el rendimiento, predichos bajo escenarios combinados de cambios en el clima y con la adopción de medidas de adaptación por parte de los productores de la región Copalita (Oaxaca, México), 2018

Manejo	Escenarios de cambios potenciales y medidas de adaptación					
	Cambio en el clima		Medidas de adaptación			
			E3		E4	
			Sombra (–50 %)		Densidad (3 000)	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2
	10 %	20 %	10 %	20 %	10 %	20 %
Comercial	–7.9	–50.5	–7.15	–38.0	–1.9	–28.8
De transición	–6.9	–46.8	–2.74	–28.8	3.5	–17.9
Tradicional	–5.3	–35.7	–1.94	–22.6	5.4	–9.5

Fuente: elaboración propia. Se observa reducción de la precipitación e incremento en la temperatura de 10 % y 15 %, respectivamente.

REFLEXIONES Y CONCLUSIONES GENERALES

Conforme a los escenarios generados, se halló que los sistemas comerciales o más intensificados presentaron un mayor rendimiento, con una relación negativa entre el rendimiento y los altos niveles de sombra, lo cual se ha observado en otras investigaciones [Aguilar-Støen *et al.*, 2011; Torres Castillo *et al.*, 2020]. Sin embargo, conforme a los resultados del presente estudio, la sombra dentro de los sistemas de transición no reduce el rendimiento, sino que puede producir efectos similares a los que se aprecian en los sistemas con manejo comercial, ya que con niveles de sombra de entre 30 % y 60 % se previeron rendimientos óptimos. Además de los efectos positivos de la densidad, es posible inferir un efecto negativo de los manejos menos intensificados, al mostrar mayor susceptibilidad ante la incidencia de la roya [Durand-Bessart

et al., 2020; Koutouleas *et al.*, 2022]. En función de la variabilidad espacial, los efectos más severos recayeron en los sistemas con más diversificación, que se caracterizan por ubicarse en regiones de baja altitud y mayor temperatura, lo cual crea las condiciones más adecuadas para la dispersión de la roya [Vaast *et al.*, 2016; Kath *et al.*, 2020]. Por otro lado, la sombra en altitudes elevadas (alrededor de 1 300 metros sobre el nivel del mar) tiende a generar rendimientos más bajos, junto con los efectos de la precipitación y la temperatura más baja [Sarmiento-Soler *et al.*, 2019]; sin embargo, mostró un efecto *buffer*, al evidenciar los efectos más severos de la roya en los cafetales comerciales localizados en altitudes bajas.

La variabilidad climática, expresada a través de cambios en la temperatura y la precipitación, ejerce un efecto negativo en los rendimientos, como lo muestran algunas investigaciones [Jha *et al.*, 2014; Valencia *et al.*, 2018]. Otros estudios proponen evaluar la adopción de prácticas para afrontar el cambio climático y los efectos de la roya, por lo que en este caso se tomó en cuenta el uso de variedades resistentes que requieren una reducción en la sombra y el aumento de la densidad de plantas de café, a fin de incrementar los rendimientos [Valencia *et al.*, 2018]. Sin embargo, tales medidas significarían un costo elevado para los productores pequeños [Eakin *et al.*, 2018]. Asimismo, diversos estudios afirman que, aunque resulte conveniente solo en términos de producción, la reducción de la sombra ocasionaría la pérdida de múltiples beneficios tangibles e intangibles [Kuyah *et al.*, 2019]. Por ejemplo, los árboles de sombra brindan servicios ecosistémicos importantes para el cultivo de café, como la producción diversificada (frutos, alimentos, leña, entre otros), la producción sostenible a largo plazo, el secuestro de carbono, la regulación del microclima, el aporte de nutrientes, la regulación de la fertilidad de los suelos y la reducción de la evapotranspiración [Cerda *et al.*, 2017; Meylan *et al.*, 2017; Villarreyna *et al.*, 2020]; en estas circunstancias, los sistemas diversificados

pueden tener un aporte de insumos proveniente de la propia finca, por lo que los beneficios de la sombra serían mayores que sus posibles efectos negativos, de modo que el conocimiento de sus múltiples beneficios ayudaría a la toma de decisiones.

Con el fin de profundizar en el desarrollo de metodologías replicables y fáciles de comprender para los tomadores de decisiones, se recomienda continuar con estudios sobre la predicción y estimación de rendimientos; por ejemplo, los métodos apoyados en la inteligencia artificial podrían ayudar a estimar los rendimientos en diferentes fases fenológicas del cultivo de café. Los efectos negativos de la sombra, como favorecer a patógenos del café (por ejemplo, la roya) y reducir las densidades de plantas, se expresan en una ligera disminución en el rendimiento, pero podrían evitarse con una elección correcta de los árboles y las variedades de café, según las características de la región, y con un manejo adecuado de la sombra; en ese sentido, varios estudios sugieren optar por variedades de café arábica que responden positivamente a la sombra, como Sarchimor, Oro Azteca, Costa Rica 95 y Caturra [Torres Castillo *et al.*, 2020; Koutouleas *et al.*, 2022].

En conclusión, el desarrollo del modelo y la síntesis de resultados aquí expuestos contribuyen a presentar avances teóricos relativos al análisis de los SAF y sistemas socioecológicos complejos, y proporcionan una lista de variables que son relevantes para predecir los rendimientos de café bajo sombra a nivel de finca, explorar los efectos de potenciales de cambios en el clima y analizar los efectos de una posible respuesta por parte de los productores de Copalita. La descripción de resultados considerando el gradiente de tipos de manejo lleva a un mayor entendimiento de las características biofísicas del sistema agroforestal de las fincas, en donde los tipos de manejo y sobre todo el manejo de la sombra son viables para mantener los rendimientos de café bajo sombra, de manera que sea posible adoptar prácticas más amigables con el ambiente y uso sostenible de los sistemas agroforestales. Por consiguiente,

la determinación de los niveles óptimos de sombra y de manejo es crucial para promover la resiliencia de la cuenca.

REFERENCIAS

- Aguilar-Støen, M. *et al.* [2011], “The emergence, persistence, and current challenges of coffee forest gardens: a case study from Candelaria Loxicha, Oaxaca, Mexico”, *Society & Natural Resources*, 24(12): 1235-1251.
- Avelino, J. *et al.* [2022], “Tree effects on coffee leaf rust at field and landscape scales”, *Plant Disease*, 107(2): 247-261, <<https://doi.org/10.1094/PDIS-08-21-1804-FE>>.
- Avelino, J. *et al.* [2020], “Shade tree *Chloroleucon eurycyclum* promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain”, *Crop Protection*, 129: 105038.
- Avelino, J. *et al.* [2018], “Multiple-disease system in coffee: from crop loss assessment to sustainable management”, *Annual Review of Phytopathology*, 56: 611-635.
- Barral, M. P. *et al.* [2015], “Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: A global meta-analysis”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 202: 223-231, <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.009>>.
- Bateman, I. J. *et al.* [2013], “Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom”, *Science*, 341(6141): 45-50.
- Beenhouwer, M. de *et al.* [2013], “A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 175: 1-7, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880913001424>>.
- Bennett, D. E., y H. Gosnell [2015], “Integrating multiple perspectives on payments for ecosystem services through a social-ecological systems framework”, *Ecological Economics*, 116: 172-181.

- Cerda, R. *et al.* [2020], “Coffee agroforestry systems capable of reducing disease-induced yield and economic losses while providing multiple ecosystem services”, *Crop Protection*, 134: 105149.
- Cerda, R. *et al.* [2017], “Effects of shade, altitude and management on multiple ecosystem services in coffee agroecosystems”, *European Journal of Agronomy*, 82, part B: 308-319, <<https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.09.019>>.
- Cerdán, C. R. *et al.* [2012], “Local knowledge of impacts of tree cover on ecosystem services in smallholder coffee production systems”, *Agricultural Systems*, 110: 119-130.
- Degenne, P., y D. Lo Seen [2016], “Ocelet: Simulating processes of landscape changes using interaction graphs”, *SoftwareX*, 5: 89-95.
- Degenne, P. *et al.* [2010], “Modelling the environment using graphs with behaviour: do you speak Ocelet?”, D. A. Swayne *et al.* (eds.), *Modelling for environment's sake. Proceedings of the Fifth Biennial Conference of the International Environmental Modelling and Software Society. Ottawa, Canada, Guelph, Canadá, IEMSS*, 188-195, <<http://iemss.org/iemss2010/Volume1.pdf>>.
- Do, H., E. *et al.* [2020], “Decision analysis of agroforestry options reveals adoption risks for resource-poor farmers”, *Agronomy for Sustainable Development*, 40(20): 1-12, <<https://doi.org/10.1007/s13593-020-00624-5>>.
- Durand-Bessart, C. *et al.* [2020], “Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems”, *Crop Protection*, 133: 105137, <<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137>>.
- Eakin, H. *et al.* [2018], “Agricultural change and resilience: Agricultural policy, climate trends and market integration in the Mexican maize system”, *Anthropocene*, 23: 43-52.
- Filatova, T. *et al.* [2013], “Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects”, *Environmental Modelling & Software*, 45: 1-7.

- Foley, J. A. *et al.* [2011], “Solutions for a cultivated planet”, *Nature*, 478(7369): 337-342.
- Foley, J. A. *et al.* [2005], “Global consequences of land use”, *Science*, 309(5734): 570-574, <<https://doi.org/10.1126/science.1111772>>.
- Freire Santos, P. Z. *et al.* [2019], “Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest”, *Forest Ecology and Management*, 433: 140-145.
- García Alvarado, M. E. *et al.* [2017], “Caracterización del agroecosistema de café bajo sombra en la cuenca del río Copalita”, *Revista Mexicana de Agronegocios*, enero-junio, 40: 635-648.
- Golden, C. D. *et al.* [2021], “Social-ecological traps link food systems to nutritional outcomes”, *Global Food Security*, 30: 100561.
- Jahel, C. *et al.* [2018], “Modelling cropping plan strategies: What decision margin for farmers in Burkina Faso?”, *Agricultural Systems*, 167: 17-33.
- Jha, S. *et al.* [2014], “Shade coffee: Update on a disappearing refuge for biodiversity”, *BioScience*, 64(5): 416-428.
- Kath, J. *et al.* [2020], “Not so robust: Robusta coffee production is highly sensitive to temperature”, *Global Change Biology*, 26(6): 3677-3688.
- Kouadio, L., y N. K. Newlands [2021], “Probabilistic yield forecasting of robusta coffee at the farm scale using agro-climatic and remote sensing derived indices”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 306: 108449.
- Koutouleas, A. *et al.* [2022], “Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review”, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6: 877476, <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>>.
- Kuyah, S. *et al.* [2019], “Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A

- meta-analysis”, *Agronomy for Sustainable Development*, 39(47): 1-18, <<https://doi.org/10.1007/s13593-019-0589-8>>.
- Läderach, P. *et al.* [2017], “Climate change adaptation of coffee production in space and time”, *Climatic change*, 141(1): 47-62.
- Leslie, H. M. *et al.* [2015], “Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19): 5979-5984.
- Lestrelin, G. *et al.* [2017], “Collaborative landscape research in Reunion Island: using spatial modelling and simulation to support territorial foresight and urban planning”, *Applied Geography*, 78: 66-77.
- López Morgado, R., y G. Díaz Padilla (comps.) [2020], *Diagnóstico, productividad y ambiente en cafetales: estudios regionales y de caso*, Veracruz, México, INIFAP, <<https://cutt.ly/Owi0jc2j>>.
- López-Bravo, D. F. *et al.* [2012], “Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions”, *Crop Protection*, 38: 21-29, <<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.03.011>>.
- Martin, K. L. *et al.* [2017], “Watershed impacts of climate and land use changes depend on magnitude and land use context”, *Ecohydrology*, 10(7): e1870.
- McGinnis, M. D., y E. Ostrom [2014], “Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges”, *Ecology and Society*, 19(2).
- Meylan, L. *et al.* [2017], “Evaluating the effect of shade trees on provision of ecosystem services in intensively managed coffee plantations”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 245: 32-42.
- Mokondoko, P. *et al.* [2022], “Biophysical drivers of yield gaps and ecosystem services across different coffee-based agroforestry management types: A global meta-analysis”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337: 108024, <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108024>>.

- Oijen, M. van *et al.* [2018], “Effects of climate change on grassland biodiversity and productivity: The need for a diversity of models”, *Agronomy*, 8(2): 14.
- Oijen, M. van *et al.* [2010], “Coffee agroforestry systems in Central America: II. Development of a simple process-based model and preliminary results”, *Agroforestry Systems*, 80(3): 361-378.
- Piato, K. *et al.* [2020], “Effects of shade trees on robusta coffee growth, yield and quality. A meta-analysis”, *Agronomy for Sustainable Development*, 40(38): 1-13.
- Rodríguez, D. *et al.* [2011], “A coffee agroecosystem model: I. Growth and development of the coffee plant”, *Ecological Modelling*, 222(19): 3626-3639, <<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.003>>.
- Sarmiento-Soler, A. *et al.* [2020], “Effect of cropping system, shade cover and altitudinal gradient on coffee yield components at Mt. Elgon, Uganda”, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295: 106887.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) [2017], “Se incrementa 30 por ciento producción de café en 2017”, 3 de agosto, <<https://www.gob.mx/agricultura/prensa/se-incrementa-30-por-ciento-produccion-de-cafe-en-2017>>.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa) [2007], “Conjuntos vectoriales del Padrón Nacional Cafetalero”, Amecafé, comunicación directa.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) [2020], “Anuario Estadístico de la Producción Agrícola [Sistema producto-café 2003-2020]”, México, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, <<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>>.
- Simonetti, J. A. *et al.* (eds.) [2012], *Biodiversity conservation in agroforestry landscapes: Challenges and opportunities*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria: 154.

- Tenza, A. *et al.* [2019], “Sustainability of small-scale social-ecological systems in arid environments: trade-off and synergies of global and regional changes”, *Sustainability Science*, 14: 791-807.
- Toledo, V. M., y P. Moguel [2012], “Coffee and sustainability: The multiple values of traditional shaded coffee”, *Journal of Sustainable Agriculture*, 36(3): 353-377.
- Torrens, P. M. [2010], “Agent-based models and the spatial sciences”, *Geography Compass*, 4(5): 428-448.
- Torres Castillo, N. E. *et al.* [2020], “Impact of climate change and early development of coffee rust. An overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico”, *Science of the Total Environment*, 738: 140225.
- Trisurat, Y. *et al.* [2016], “Integrating land use and climate change scenarios and models into assessment of forested watershed services in Southern Thailand”, *Environmental Research*, 147: 611-620.
- Tucker, C. M. *et al.* [2010], “Perceptions of risk and adaptation: Coffee producers, market shocks, and extreme weather in Central America and Mexico”, *Global Environmental Change*, 20(1): 23-32.
- Vaast, P. *et al.* [2016], “Coffee and cocoa production in agroforestry. A climate-smart agriculture model”, E. Torquebiau (ed.), *Climate Change and Agriculture Worldwide*, Heibelberg, Springer, 899: 197-208, <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_16>.
- Valencia, V. *et al.* [2018], “Smallholder response to environmental change: Impacts of coffee leaf rust in a forest frontier in Mexico”, *Land Use Policy*, 79: 463-474.
- Vezy, R. *et al.* [2020], “DynACof: A process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems”, *Environmental Modelling & Software*, 124: 104609.
- Vigerstol, K. L., y J. E. Aukema [2011], “A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services”, *Journal of Environmental Management*, 92(10): 2403-2409.

- Villarreyna, R. *et al.* [2020], “Adaptación basada en ecosistemas: efecto de los árboles de sombra sobre servicios ecosistémicos en cafetales”, *Agronomía Mesoamericana*, 31(2): 499-516.
- Yang, J. *et al.* [2012], “Landsat remote sensing approaches for monitoring long-term tree cover dynamics in semi-arid woodlands: Comparison of vegetation indices and spectral mixture analysis”, *Remote Sensing of Environment*, 119: 62-71, <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442571100441X>>.

6. IMPULSORES DE CAMBIO Y ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO SOCIOCLIMÁTICO: UNA VISIÓN DESDE LO LOCAL, A TRAVÉS DE CARTOGRAFÍA PARTICIPATIVA EN COPALITA

José Mauricio Galeana-Pizaña

V. Sophie Ávila-Foucat

Juan Manuel Núñez

Driss Ezzine de Blas

Alejandra Ramírez León

Ángel Merlo Galeazzi

Pierre Mokondoko Delgadillo

RESUMEN

El reconocimiento de los impulsores de cambio y las medidas de adaptación al cambio socioclimático adoptadas por los actores locales juegan un papel preponderante en el análisis de las interacciones sociedad-naturaleza, ya que muestran la susceptibilidad y el significado de estas interacciones desde la perspectiva de protagonistas que convergen en el territorio. Asimismo, permite evaluar el conocimiento colectivo en torno a las trayectorias pasadas, presentes y futuras relativas a impactos de fenómenos como el cambio climático, las transiciones demográficas, las variaciones de mercado o los procesos migratorios. El presente estudio es un ejemplo de cómo se articula la identificación de los impulsores de cambio que afectan el complejo Copalita-Zimatán-Huatulco (Cozihua) y las estrategias de adaptación presentes y futuras, a través de

la visión local delimitada en un taller de cartografía participativa. Este taller tuvo una duración de cuatro horas de trabajo divididas en tres sesiones y se organizó en grupos temáticos según el tipo de impulsor de cambio documentado en capítulos previos: cambio climático, cambio de uso de suelo y políticas públicas. Como resultado general del taller, se encontró que los impulsores con mayor importancia son los cambios en la temporada de lluvias, la roya, la deforestación, el incremento de cultivos intensificados y la tala ilegal. Respecto de las estrategias de adaptación presentes en 2022, destacaron las campañas de reforestación, la propagación de prácticas agroecológicas, la diversificación agrícola y la implementación de tecnología de captación de agua de lluvia. La reforestación se consideró una de las estrategias fundamentales para los escenarios futuros, acompañada de proyectos de turismo de naturaleza, mayores esfuerzos de gobierno para la recuperación de terrenos invadidos, el freno a los asentamientos humanos irregulares, el impulso al café amigable con aves y otros polinizadores, al igual que el fomento de mayores redes de colaboración que aporten valor agregado a los productos emblemáticos de la región, como el café. Asimismo, se distinguieron elementos que pueden contribuir al fortalecimiento de la gobernanza local en la toma de decisiones territoriales, a través de la planeación y gestión participativa. Los resultados muestran el papel clave del mapeo participativo en el aprendizaje colectivo, con énfasis en el territorio como una herramienta potencialmente valiosa para transparentar el pulso de las dinámicas espacio-temporales de los estresores y estrategias de adaptación del complejo, al igual que una herramienta de consulta para la focalización y priorización de estrategias de intervención territorial desde diversos esfuerzos locales e interinstitucionales de cara a un desarrollo resiliente. Sin embargo, cabe resaltar sus límites como espacio de negociación, dado que los actores con mayor vinculación sobre las políticas públicas no suelen participar en este tipo de talleres, lo que disminuye su carácter vinculante.

El crecimiento exponencial de las actividades humanas propicia una cada vez mayor preocupación social respecto de la desestabilización de sistemas biofísicos críticos (ciclos biogeoquímicos) y el desencadenamiento de cambios ambientales abruptos o irreversible para el bienestar humano y para aquellas actividades económicas muy relacionadas con el estado del tiempo [Rockström *et al.*, 2009]. En este sentido, resulta fundamental adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, con el fin de reducir sus impactos y, al mismo tiempo, transitar hacia una sostenibilidad de los medios de vida [Samaniego *et al.*, 2017].

En las últimas dos décadas, se ha producido un rápido crecimiento en el desarrollo de respuestas de adaptación al cambio climático en todo el mundo [Arnott *et al.*, 2016], así como una mejor comprensión científica de los impactos de diversos estresores y *shocks*. Estas iniciativas han tenido como objetivo innovar con nuevas tecnologías e infraestructura [Schenk *et al.*, 2016]; implementar políticas de gestión y gobernanza [Henstra, 2016], y reducir la exposición al riesgo ambiental [Jost *et al.*, 2016]. Las iniciativas de adaptación abarcan múltiples socioecosistemas, incluidos la agricultura, las costas, el medio ambiente, la salud, el agua y las zonas urbanas [Owen, 2020].

La gran mayoría de las estrategias propuestas en el contexto de cambio ambiental global corresponde a planteamientos generales, susceptibles de agruparse en estrategias que promueven las capacidades de persistir, adaptarse y transformarse en el marco de la teoría de resiliencia [Béné *et al.*, 2016]. Este enfoque teórico es de interés para los sectores académico, de gobierno y privado, debido al efecto cada vez mayor y recurrente de los estresores y *shocks* que amenazan tanto los servicios ecosistémicos como el bienestar humano [Biggs *et al.*, 2012; González-Quintero y Ávila-Foucat, 2019].

Las respuestas exitosas de adaptación al cambio climático deben responder a distintas necesidades, vulnerabilidades y capacidades de adaptación locales y regionales [Lobo, 2011]. En este contexto, los actores locales, como son pobladores, agricultores y organismos no gubernamentales, constituyen agentes clave que operan a una microescala y que toman la mayor parte de las decisiones esenciales sobre el uso del suelo y la asignación de recursos para adaptarse ante las amenazas y oportunidades que plantea un clima cambiante [Lee *et al.*, 2014]. Por tanto, al formular las respuestas de adaptación, es imperativo reparar en las opiniones y prioridades de los actores locales que influyen significativamente en las decisiones sobre el uso de suelo, el agua y otros recursos.

Una aproximación a los métodos de aprendizaje y acción participativos para involucrar a los actores locales es el mapeo participativo, ya que se trata de un proceso de aprendizaje social geolocalizado que desarrolla la comprensión, el conocimiento y las habilidades que empoderan y capacitan a las comunidades vulnerables en torno a los desafíos como el cambio climático, así que puede proporcionar una plataforma valiosa para el diseño de intervenciones de adaptación climática [Mazeka *et al.*, 2019]. El mapeo participativo es una “fusión espontánea de métodos de Aprendizaje y Acción Participativos con tecnologías de información geográfica” [Brown y Kytä, 2014: 123-124], cuyos resultados espaciales reflejan la naturaleza de las relaciones humano-lugar. Los valores o significados de lugar son valores de relación, por lo que cabe esperar una variabilidad significativa en los valores mapeados entre los participantes, incluso cuando corresponden a la misma ubicación geográfica; de igual modo, el género, la edad, el nivel de educación formal, la familiaridad con el área geográfica y los medios de vida de los actores locales pueden influir en el número y tipo de valores mapeados [Brown y Reed, 2009].

Dada la diversidad de dinámicas y procesos identificados en las trayectorias históricas, presentes y futuras de la

cuenca Copalita, descritas en los capítulos previos, el presente capítulo tiene por objetivo mostrar los resultados de un taller de cartografía participativa que se celebró el 25 de marzo de 2022 en la ciudad de Santa María Huatulco, en el marco de un taller de presentación de resultados del proyecto TRASSE-Oaxaca y discusión de escenarios de cambio en la cuenca del río Copalita. El taller estuvo integrado por 21 actores, incluidos productores de café, representantes de organizaciones no gubernamentales, académicos y funcionarios de gobiernos federal y estatal (cuadro 6.1).

Cuadro 6.1. Listado de participantes del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022

Organismo	Sector	Número de participantes
Comité de Playas Limpias del Municipio de Santa María Huatulco	Asociación civil	1
Fondo Mundial para la Naturaleza	Asociación civil	1
Mbis Bin Semillas para la Siembra	Asociación civil	2
Terra	Asociación civil	1
Huatulco Verde	Asociación civil	1
Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible (ccmss)	Asociación civil	1
Huatulco Salvaje	Asociación civil	1
Finca El Gavilán	Cafetalero	1
Cooperativa El Jacaralito	Cafetalero	3
Café Pluma	Cafetalero	1
Certificadora Mayacert	Cafetalero	1
Universidad del Mar	Académico	2
Cruz del Monte	Promotor turístico	1
Parque Nacional Huatulco	Gobierno	3
Secretaría del Medio Ambiente, Energías y Desarrollo Sustentable (Semaedeso)	Gobierno estatal	1

Fuente: elaboración propia.

MÉTODO

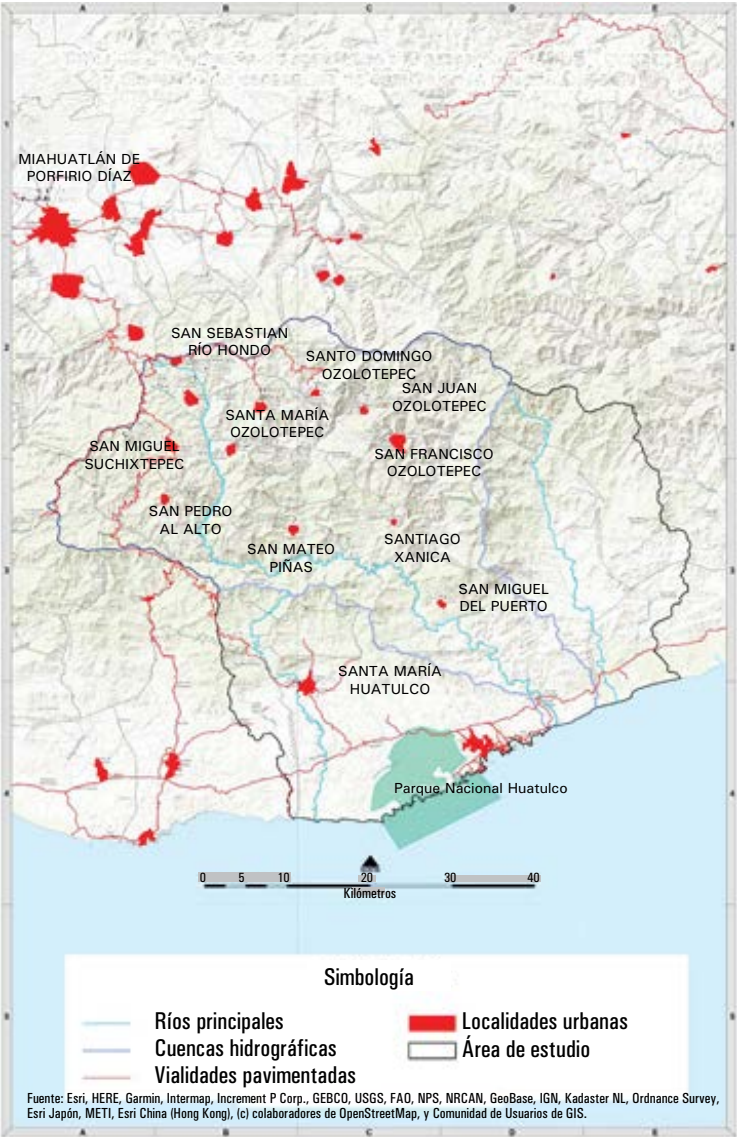
La dinámica del taller consistió en una presentación general en plenaria de los resultados principales del proyecto TRASSE-Oaxaca y la organización posterior de los actores en tres grupos, con base en su experiencia y conocimiento de tres tipos de estresores y *shocks*: cambio climático, cambio de uso de suelo y políticas públicas.

Cada grupo recibió materiales cartográficos del complejo Cozihua (cuencas de los ríos Copalita, Zimatán y Huatulco), con una diversidad de referencias espaciales como son los principales poblados, los ríos, las carreteras, el polígono del Parque Nacional, entre otros (mapa 6.1), para que ubicaran estos elementos en el mapa.

El taller se dividió en tres sesiones basadas en sistemas de preguntas (cuadro 6.2). Cada grupo temático contó con un moderador responsable de organizar la expresión espacial de las respuestas de los participantes y la explicación extendida a los demás integrantes del grupo del porqué de su respuesta. Cabe destacar que se entregó un plumón de un color específico por cada grupo de participantes, de tal forma que para el análisis de gabinete pudiera reconocerse el origen de las participaciones.

Una vez que todos los participantes compartieron sus respectivas aportaciones, así como la explicación del porqué de las mismas, se procedió a una categorización de la importancia de los impulsores y de las acciones identificadas en cada grupo. Para ello, se les proporcionaron tres adhesivos de distinto color por participante, a fin de que, a manera de semáforo, les dieran el valor percibido correspondiente: verde (1), amarillo (2) o rojo (3).

Mapa 6.1. Mapa base para la realización del taller de cartografía participativa en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022, como parte de la difusión de resultados del proyecto TRASSE-Oaxaca



Cuadro 6.2. Sesiones y sistemas de preguntas del taller de cartografía participativa, en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), marzo de 2022

Sesiones	Sistema de preguntas	Objetivos
Impulsores de cambio	¿Dónde identifica usted que han ocurrido los principales cambios en los últimos 30 años en la cuenca (en el marco del impulsor del grupo correspondiente)? ¿Por qué?	Mapear zonas donde han ocurrido cambios relacionados con impulsores de cambio o aplicación de políticas públicas.
Acciones actuales para contrarrestar impulsores	De las siguientes acciones, identifique las que han jugado un papel para enfrentar el impulsor en discusión y ¿dónde se están implementando dichas acciones en la cuenca?	Mapear las zonas donde actualmente [año 2022] se están realizando acciones vinculadas con los impulsores de cambio.
Escenarios futuros	¿Dónde se espera que ocurran los cambios principales asociados con el impulsor correspondiente dentro de los próximos 30 años? ¿Qué acciones implementaría: las mismas o nuevas?	Mapear zonas donde esperan que existan cambios futuros asociados con los impulsores de cambio.

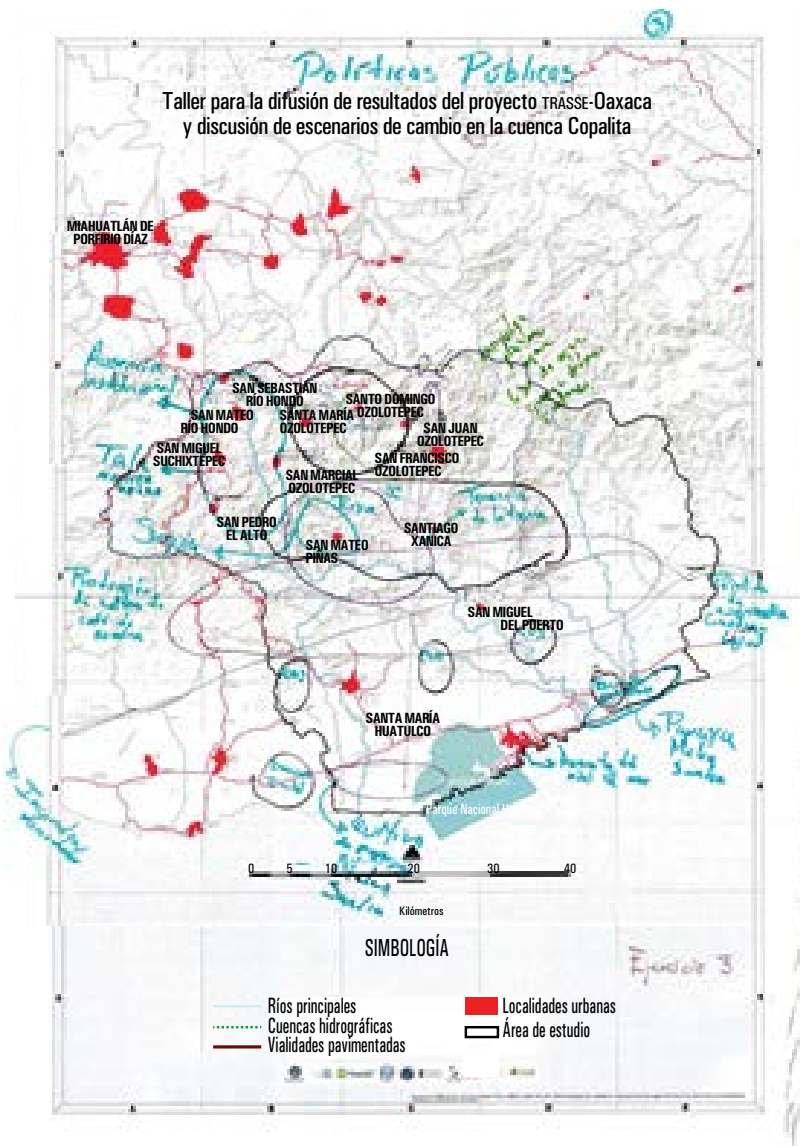
Fuente: elaboración propia.

En una fase de gabinete, los resultados del taller expresados de forma análoga (mapas) se escanearon para que a través de un sistema de información geográfica se llevara a cabo el proceso de georreferenciación de las imágenes, la digitalización de lo vertido por los participantes y la construcción de la base de datos de cada elemento cartografiado, así como la jerarquización de los niveles de importancia, según los porcentajes y la distribución de los adhesivos.

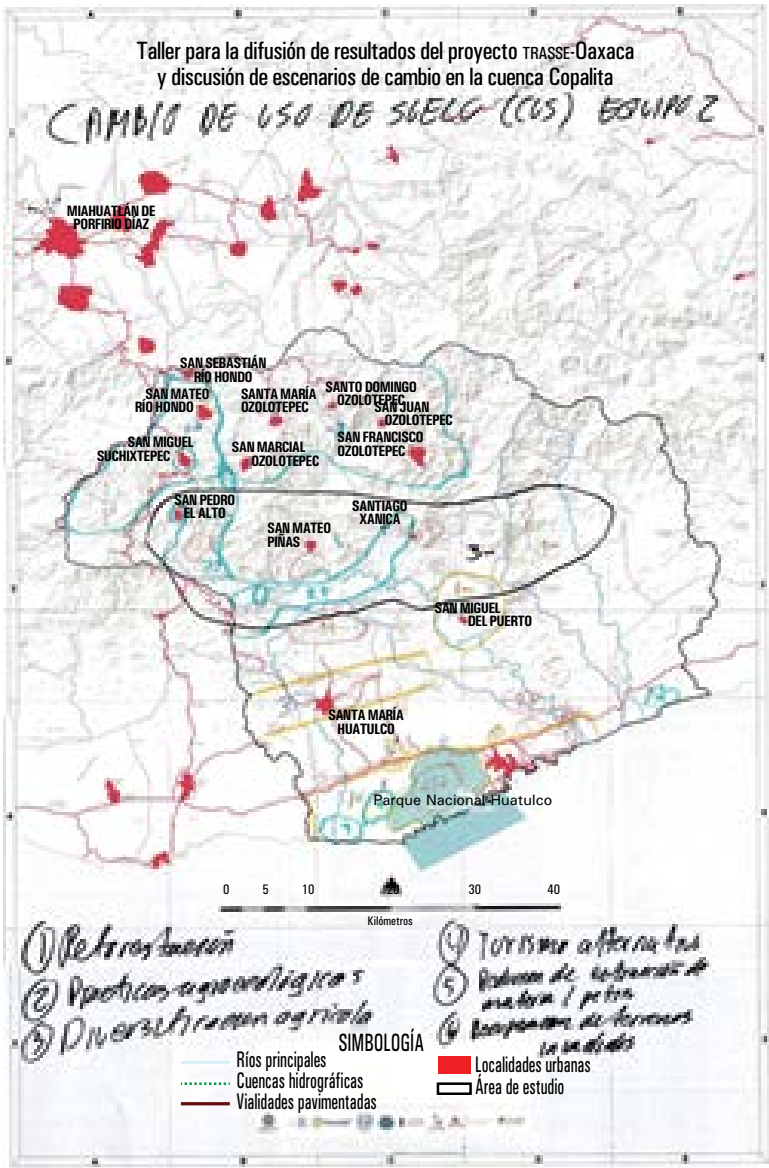
RESULTADOS

En los mapas 6.2a, 6.2b, 6.2c y 6.2d se muestran, a manera de ejemplo, algunas de las expresiones espaciales derivadas del taller. En ellas se observan los trazos originales de los participantes sobre los mapas base (mapa 6.1) y la guía empleada para la identificación del tipo de impulsor de cambio o estrategia de adaptación.

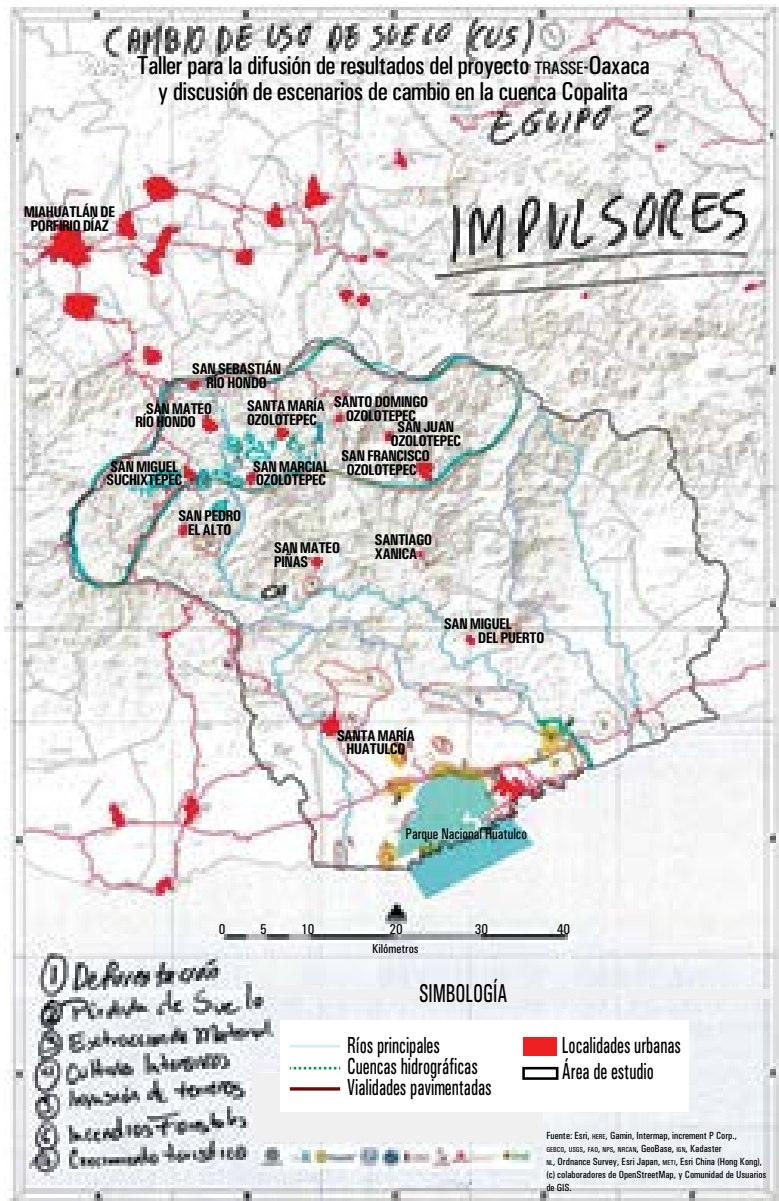
Mapa 6.2a. Ejemplo de los resultados análogos del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022. Impulsores de cambio señalados por el grupo de políticas públicas



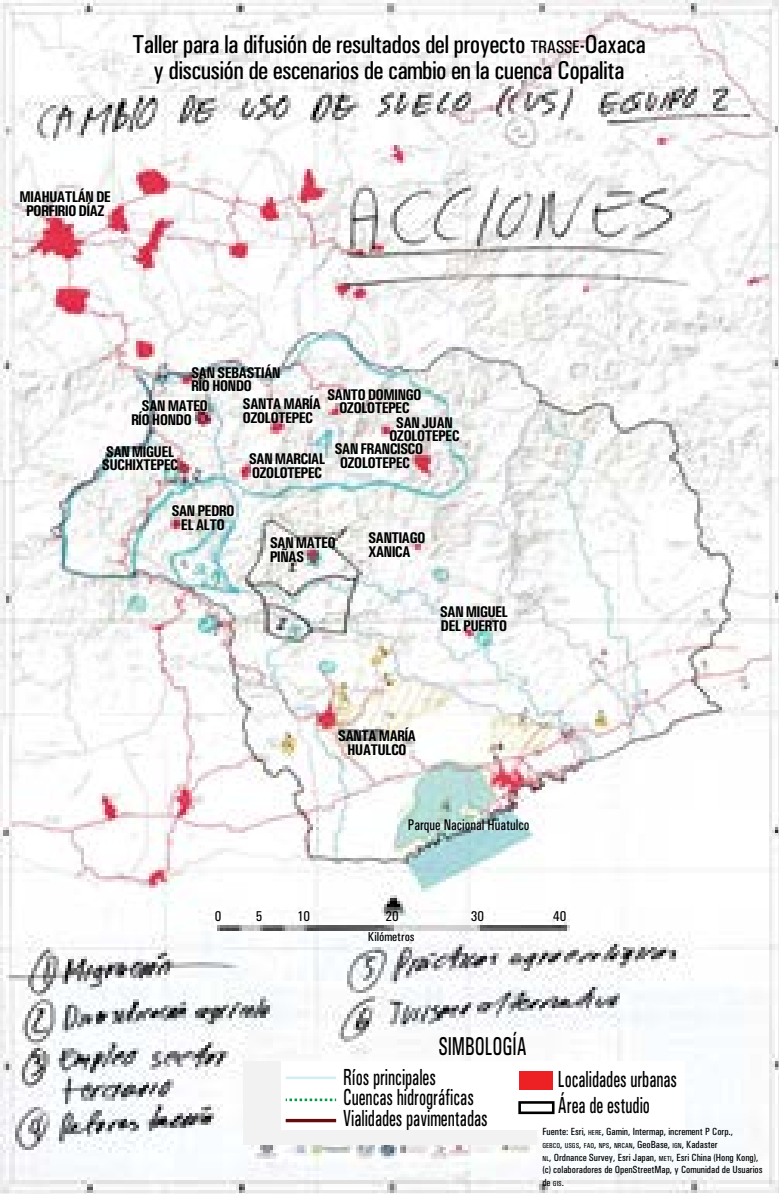
Mapa 6.2b. Ejemplo de los resultados análogos del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022. Acciones actuales para contrarrestar impulsores, señaladas por el grupo de cambio de uso de suelo



Mapa 6.2c. Ejemplo de los resultados análogos del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022. Impulsores de cambio identificados por el grupo de cambio de uso de suelo



Mapa 6.2d. Ejemplo de los resultados análogos del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022. Acciones futuras anotadas por el grupo de cambio de uso de suelo



Sesión de impulsores de cambio

Como parte de la sesión orientada a identificar zonas donde han ocurrido los principales cambios en los últimos 30 años en la cuenca (según grupo correspondiente), hasta 2022, en el cuadro 6.3 se muestran los impulsores mencionados por los participantes. Cabe destacar que los impulsores de cambio identificados por parte de los tres grupos son los que han tenido un impacto negativo en el paisaje.

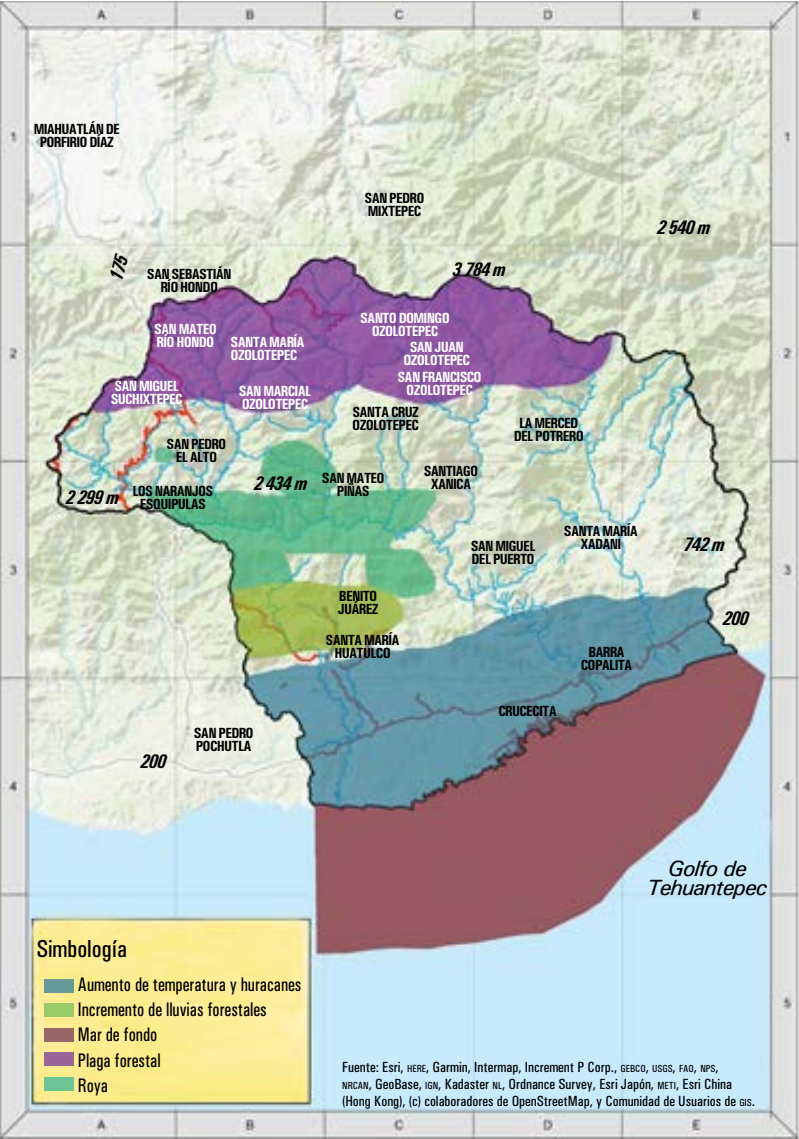
Cuadro 6.3. Impulsores de cambio, según los grupos de trabajo del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022

Cambio climático	Cambio de uso de suelo	Políticas públicas
Aumento de temperatura	Crecimiento turístico	Aumento en el nivel del mar
Aumento de huracanes	Cultivos intensivos	Cambio climático
Incremento de lluvias torrenciales	Deforestación	Cambio de uso de suelo
Mar de fondo	Extracción de material	Cultivo de papaya, melón y sandía
Plagas forestales	Incendios forestales	Plagas forestales
Roya	Invasión de terrenos	Roya
	Pérdida de suelo	Sequía
		Tala ilegal

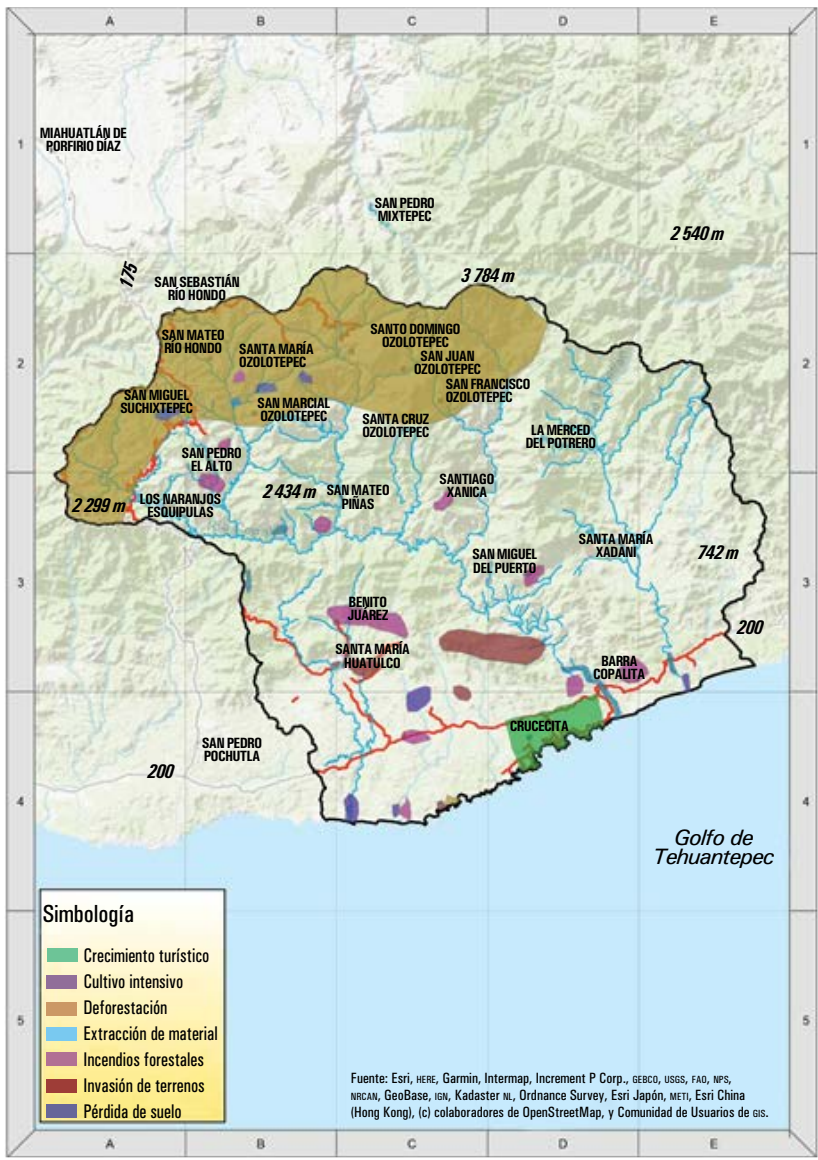
Fuente: elaboración propia.

Los mapas 6.3a, 6.3b, 6.3c y 6.3d muestran los resultados procesados a través del sistema de información geográfica (SIG), por cada grupo. Cabe resaltar que el grupo de políticas públicas identificó las áreas con impulsores de cambio y las usó para elaborar un mapeo de la presencia o ausencia de instrumentos de políticas públicas que han ejercido un impacto positivo o negativo en el paisaje (figura 6.3d), según el tipo de propósito: contener el cambio de uso de suelo, cambio climático, conservación de la biodiversidad o diversificación productiva (cuadro 6.4).

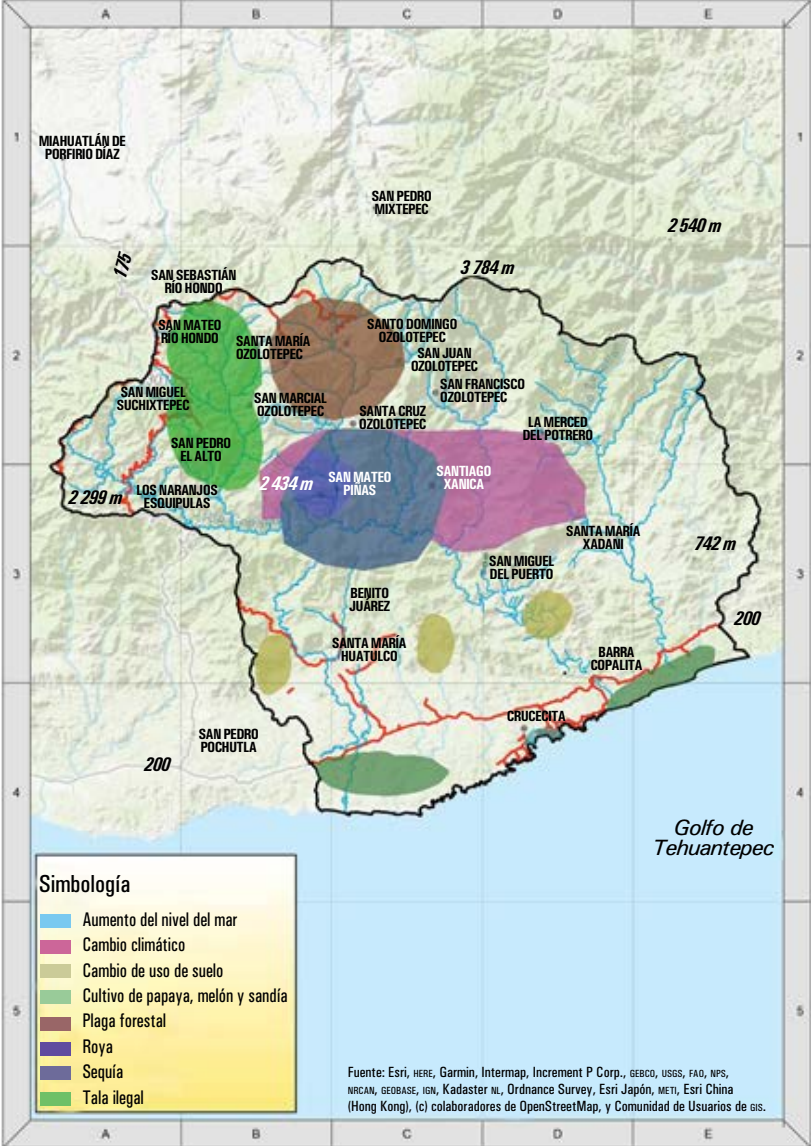
Mapa 6.3a. Impulsores de cambio de cobertura y uso de suelo, identificados por el grupo de cambio climático del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022



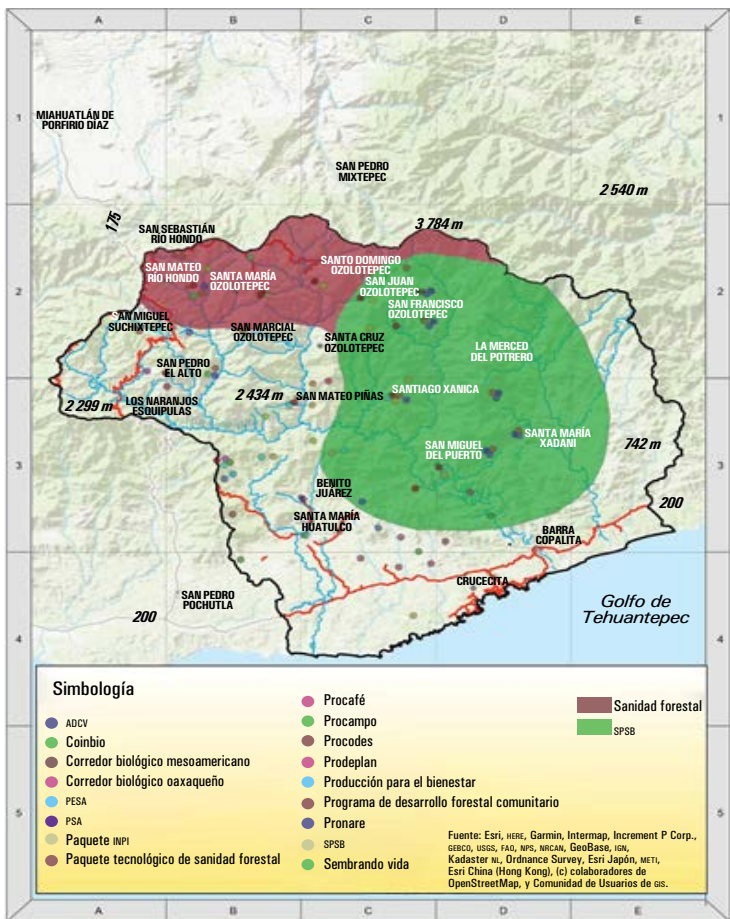
Mapa 6.3b. Impulsores de cambio identificados por el grupo de cambio de uso de suelo del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022



Mapa 6.3c. Impulsores de cambio identificados por el grupo de políticas públicas del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco, en marzo de 2022



Mapa 6.3d. Instrumentos o programas de políticas públicas identificados en el taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco, en marzo de 2022



ADVC: Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación; Coinbio: Programa de Conservación Comunitaria de la Biodiversidad; PESA: Proyecto Estratégico para la Seguridad Alimentaria; PSA: Pago por Servicios Ambientales; INPI: Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas; Procafé: componente del Programa de Apoyo a Pequeños Productores; Procampo: Programa de Apoyos Directos al Campo; Procodes: Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible; Prodeplan: Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales; Pronare: Programa Nacional de Reforestación; SPSB: sistemas productivos sostenibles y biodiversidad.

Cuadro 6.4. Relación de instrumentos o programas de políticas públicas, según su impacto, elaborada en el taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022

Instrumento o programa	Cambio de uso de suelo	Cambio climático	Conservación de la biodiversidad	Diversificación productiva
Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC)	X	X	X	
Programa de Desarrollo Comunitario	X	X	X	
Proyecto Estratégico para la Seguridad Alimentaria (PESA)				X
Proyectos del Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI)		X	X	X
Pago por Servicios Ambientales (PSA)	X	X	X	
Procafé		X	X	
Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible (Procodes)	X	X	X	X
Producción para el Bienestar				X
Programa de Desarrollo Forestal (Prodefor)		X		
Programa de Fomento a la Organización Social, Planeación y Desarrollo Regional Forestal (Profos)	X	X		
Estrategia Nacional REDD+ (ENAREDD+)	X	X		
Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC)		X		
Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del Territorio de la Región Sierra Sur-Costa del Estado de Oaxaca	X	X	X	
Estrategia para la Conservación y el Uso Sustentable de la Biodiversidad del Estado de Oaxaca (ECUSBEO)			X	

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se indican los principales impulsores que cada grupo identificó en el ejercicio de priorización:

- *Grupo de cambio climático.* En primer lugar, se percibió la roya como un problema generalizado en toda la región, sobre todo desde el huracán Paulina en 1997. En segundo lugar, se contempló el aumento de la temperatura, que en la costa se asoció con la ampliación de la mancha urbana de Santa María Huatulco y la expansión hotelera, mientras que en la zona cafetalera este fenómeno llevó a introducir variedades de café que requieren menos sombra, como Costa Rica, Colombia y Marsellesa. En tercer lugar, se evidenciaron los cambios en la temporada de lluvias, que han alterado los ciclos productivos (por ejemplo, del maíz) y los procesos de secado de café.
- *Grupo de cambio de uso de suelo.* Este grupo colocó la deforestación, la extracción de material pétreo y la invasión de terrenos en la categoría de los principales impulsores. La deforestación se consideró un impulsor de importancia a lo largo de la cuenca por diversos motivos, como la tala ilegal, los incendios forestales y el crecimiento de la frontera agrícola, y su manifestación en la parte alta de la cuenca es muy visible y con un aumento importante en los últimos tiempos. La extracción de material pétreo se convirtió en un tema que los participantes abordaron con amplitud y asociaron en especial con procesos de urbanización, crecimiento de la infraestructura turística y construcción de caminos, además de relacionarlo con otras problemáticas como ruido generado por la maquinaria y la apertura de brechas para el paso de maquinaria y tráfico pesado. También se etiquetó como impulsor a la invasión de terrenos, cuyas causas se vinculan con el alza de demanda de vivienda social.

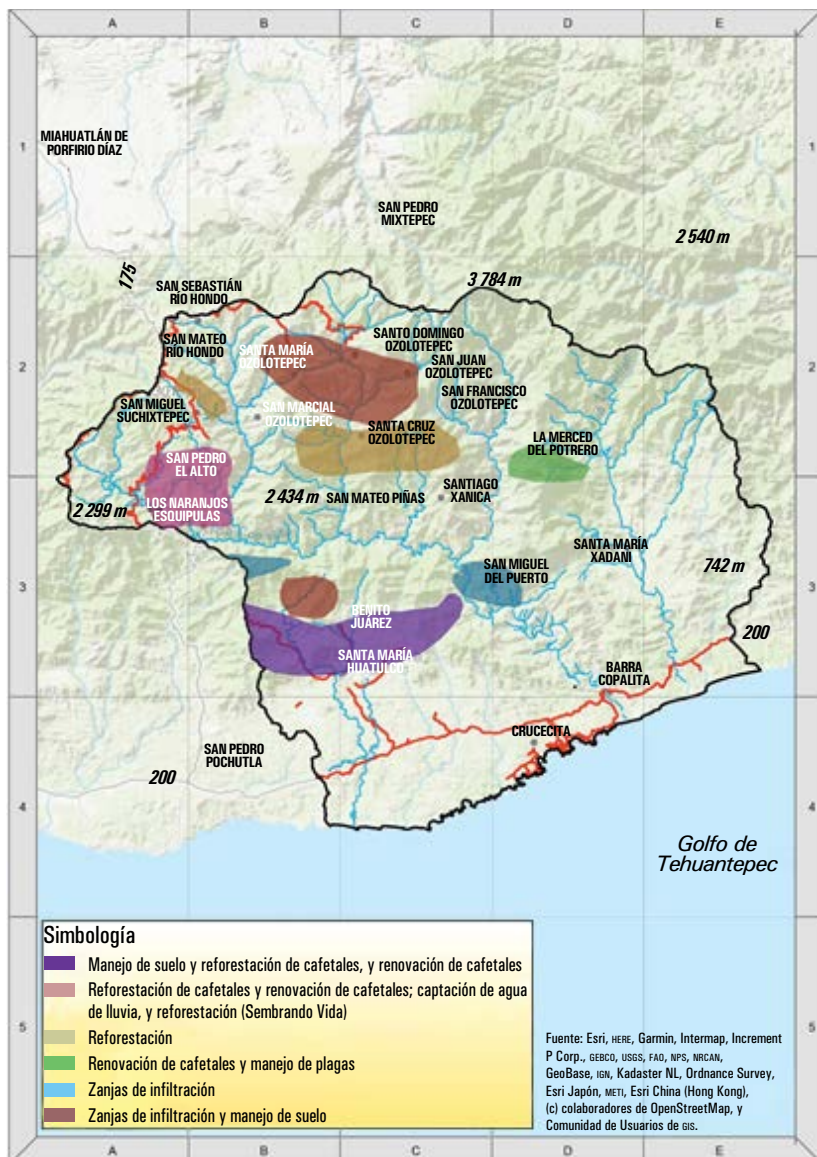
- *Grupo de políticas públicas.* Los integrantes del grupo de políticas públicas incorporaron en el conjunto de principales impulsores los cultivos intensificados, como las plantaciones de aguacate en las partes altas, y de guanábana y papaya en las partes bajas de la cuenca, las cuales se están dispersando en las zonas donde ya no hay café. De igual modo, mencionaron las plagas forestales, las cuales afloran por el cambio climático y en muy pocas comunidades reciben atención; también destacaron la tala ilegal, dada la existencia de denuncias por malos aprovechamientos o ilegales, así como ausencias de permisos de manejo forestal y vigilancia.

Sesión de acciones o estrategias de adaptación (año 2022)

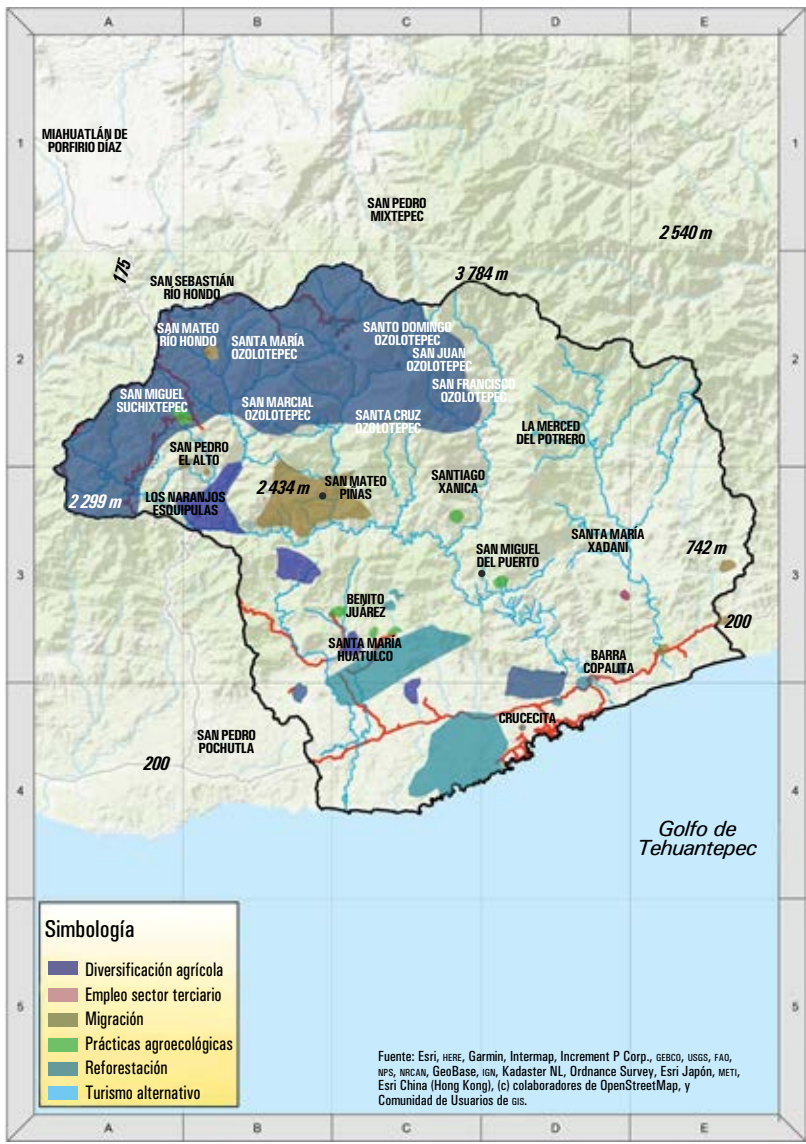
Como parte de la sesión dirigida a identificar acciones o estrategias de adaptación que han jugado un papel para enfrentar impulsores de cambio y las zonas donde se han implementado (según grupo correspondiente), en los mapas 6.4a y 6.4b se muestra la localización de las acciones de los grupos de cambio climático y cambio de uso de suelo.

El grupo de cambio climático resaltó como acciones o estrategias de adaptación presentes, en orden de importancia: la reforestación y su acompañamiento a través de políticas públicas como Sembrando Vida (sv) y la milpa intercalada en árboles frutales (MIAF); el manejo de residuos en las principales localidades de la cuenca; la renovación de los cafetales, y la implementación de tecnología de captación de agua de lluvia (cuadro 6.5). Por su parte, el grupo de cambio de uso de suelo destacó la reforestación como la estrategia primordial de adaptación, seguida de la implementación de prácticas agroecológicas y la diversificación agrícola (cuadro 6.6).

Mapa 6.4a. Acciones actuales señaladas por el grupo de cambio climático del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco, en marzo de 2022



Mapa 6.4b. Acciones actuales identificadas por el grupo de cambio de uso de suelo del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022



En términos de la distribución espacial de las acciones identificadas, se resaltó la focalización de las acciones de reforestación y diversificación agrícola en la cuenca alta, mientras que en la cuenca media sobresalió la renovación de cafetales e implementación de prácticas agroecológicas y el turismo alternativo en la cuenca baja.

Cuadro 6.5. Ejercicio de priorización de acciones o estrategias de adaptación presentes, ordenadas según importancia relativa (porcentaje), identificadas por el grupo de cambio climático del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), marzo de 2022

Acciones o estrategias	Importancia	Porcentaje
Reforestación (SV y MIAF)	16	38.10
Manejo de residuos	7	16.67
Renovación de cafetales	6	14.29
Captación de agua de lluvia	6	14.29
Manejo de suelo	5	11.9
Zanjas de infiltración	2	4.76
Reforestación en cafetales	-	-
Infraestructura hidráulica	-	-
Manejo de plagas	-	-
Total	42	100

Fuente: elaboración propia. SV: Sembrando Vida; MIAF: milpa intercalada en árboles frutales.

Cuadro 6.6. Ejercicio de priorización de acciones o estrategias de adaptación, ordenadas según importancia relativa (porcentaje) e identificadas por el grupo de cambio de uso de suelo del taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), marzo de 2022

Acciones o estrategias	Importancia	Porcentaje
Reforestación	13	36.1
Prácticas agroecológicas	11	30.5
Diversificación agrícola	9	25
Turismo alternativo	2	5.5
Empleo sector terciario	1	2.78
Migración	-	-
Total	36	100

Fuente: elaboración propia.

En el marco del grupo de trabajo de políticas públicas, más que identificar espacialmente las acciones, se discutió sobre programas importantes para la adaptación al cambio climático o al cambio de uso de suelo. A continuación (cuadro 6.7) se enlistan los principales programas que los participantes mencionaron, discutieron y justificaron al opinar que juegan un papel más importante.

Cuadro 6.7. Programas que inciden en el cambio climático y cambio de uso de suelo, identificados por el grupo de políticas públicas en el taller de cartografía participativa celebrado en Santa María Huatulco (Oaxaca, México), en marzo de 2022

Programa	Justificación
Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación	Evita cambios de uso de suelo y contribuye al mantenimiento de áreas forestales (cambio climático) que capturan agua y carbono y que incluyen conservación de biodiversidad.
Paquete del Instituto Nacional de los Pueblos Indígenas (INPI)	Introduce proyectos productivos diversificando. Actualmente, el INPI desarrolla programas que atienden temas de cambio climático y de conservación de biodiversidad, un programa de cambio climático y convocatorias para llevar a cabo proyectos de adaptación o mitigación ante el cambio climático.
Pago por Servicios Ambientales (PSA)	Está hecho para que no cambie el uso del suelo.
Programa de Conservación para el Desarrollo Sostenible	Financia actividades de conservación y actividad económica sustentable.
Producción para el Bienestar	Producción con base agroecológica.
Programa de Fomento a la Organización Social, Planeación y Desarrollo Regional Forestal (Profos)	Contribuía a la organización social y organización productiva, así como a la lucha contra el cambio climático y el cambio de uso de suelo. Lo operaba la Comisión Nacional Forestal (Conafor) de manera transversal a todos los componentes.

Fuente: elaboración propia.

Sesión de escenarios futuros (acciones o estrategias de adaptación)

Como parte de la sesión orientada a identificar acciones o estrategias de adaptación futuras para enfrentar impulsores de cambio (según grupo correspondiente), el grupo de cambio climático indicó que la acción o estrategia que debe seguir promoviéndose es la reforestación, además de las siguientes en orden de importancia: actividades económicas como el turismo alternativo, esfuerzos de gobierno para la recuperación de terrenos invadidos y freno a los asentamientos humanos irregulares. Mientras tanto, el grupo de cambio de uso de suelo insistió en la necesidad de continuar fortaleciendo las tres acciones o estrategias identificadas como presentes (reforestación, prácticas agroecológicas y diversificación agrícola), de tal forma que se extiendan a diversas áreas del complejo Cozihua. Por último, el grupo de políticas públicas apuntó como esfuerzos futuros requeridos: implementar mayores proyectos de turismo de naturaleza; impulsar el café amigable con aves y otros polinizadores; fomentar mayores redes de colaboración que aporten valor agregado a los productos emblemáticos de la región, como el café; y propiciar o contribuir al empoderamiento de las comunidades en la toma de decisiones territoriales a través de planeación y gestión participativa.

CONCLUSIONES Y REFLEXIONES GENERALES

La cartografía participativa constituye una herramienta fundamental para el fortalecimiento de los procesos de gestión y planeación, por medio de la cual los propios actores locales representan los fenómenos en su espacio geográfico y el sentido o tipo de relación que mantienen con ellos; además, dan visibilidad a procesos no colectados en fuentes de información primaria y a través de imágenes de satélite. En este sentido, en el taller se identificó una concordancia espacial

entre lo que se hace o habría que hacer y dónde, en las expresiones geoespaciales vertidas por los actores involucrados (tres grupos, según estresor), por ejemplo, acerca de los procesos de tala ilegal, plagas forestales y deforestación (mapas 6.3a, 6.3b, 6.3c y 6.3d), así como en una discusión en torno a fenómenos complementarios de los procesos que convergen en las estrategias de adaptación del complejo Cozihua.

Los mapeos permitieron identificar el potencial de conflicto y resolución asociado con énfasis en el uso de suelo, dada la conformación de grupos de trabajo con diversos perfiles e intereses personales. Cabe destacar que la invitación para asistir al taller se extendió a ciertos actores con intereses contrarios a los propósitos de conservación de la biodiversidad y el reconocimiento de los servicios ecosistémicos (como sector turístico o productores intensificados), a fin de que ampliaran el diálogo de valores de posición para incluir una variedad de usos terrestres y marinos en función del entrelazado de juicios de compatibilidad entre diversos actores. Sin embargo, la inasistencia de esos actores agregó una de las limitaciones a la propuesta y creó un área de oportunidad para futuros esfuerzos. Una manera de hacer frente a este punto sería presentar un resumen ejecutivo a estas autoridades que facilite la transferencia de información y procesos de construcción de opinión de largo plazo, apoyados por propuestas científicas.

La herramienta de este estudio fungió como un medio de comunicación para el aprendizaje espacial, discusión, intercambios de información y análisis, con un enfoque integral y multiescalar, que condujo a transparentar el pulso de las dinámicas espaciotemporales de los estresores y estrategias de adaptación del complejo Cozihua para un desarrollo resiliente, además de que adquirió el carácter de una herramienta de consulta para la focalización y priorización de estrategias de intervención territorial desde diversos esfuerzos locales e interinstitucionales. En el marco académico, este esfuerzo

provee información útil para calibración-verificación de modelos de corte espaciotemporal, lo mismo que elementos de validación de los diferentes trabajos expresados a lo largo de la obra. Asimismo, posibilita la coconstrucción de objetivos de investigación futura, de acuerdo con la visión local de cara a un desarrollo resiliente.

REFERENCIAS

- Arnott, J. C. *et al.* [2016], “Evaluation that counts: A review of climate change adaptation indicators & metrics using lessons from effective evaluation and science-practice interaction”, *Environmental Science & Policy*, 66: 383-392.
- Béné, C. *et al.* [2016], “Is resilience a useful concept in the context of food security and nutrition programmes? Some conceptual and practical considerations”, *Food Security*, 8(1): 123-138, <<https://doi.org/10.1007/s12571-015-0526-x>>.
- Biggs, R. *et al.* [2012], “Toward principles for enhancing the resilience of ecosystem services”, *Annual Review of Environment and Resource*, 37: 421-448.
- Brown, G., y M. Kyttä [2014], “Key issues and research priorities for public participation GIS (PPGIS): A synthesis based on empirical research”, *Applied Geography*, 46: 122-136.
- Brown, G., y P. Reed [2009], “Public participation GIS: A new method for national forest planning”, *Forest Science*, 55(2): 166-182.
- Brown, G. *et al.* [2020], “Mapping place values: 10 lessons from two decades of public participation GIS empirical research”, *Applied Geography*, 116: 102156, <<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102156>>.
- Galindo, L. M. *et al.* [2014], “Procesos de adaptación al cambio climático. Análisis de América Latina”, *Colección Documentos de Proyecto*, Cepal.

- González-Quintero, C., y V. S. Ávila Foucat [2019], "Operation-
alization and measurement of social-ecological resilience:
a systematic review", *Sustainability*, 11(21): 6073.
- Henstra, D. [2016], "The tools of climate adaptation policy:
analysing instruments and instrument selection", *Climate
Policy, Taylor & Francis Journals*, 16(4): 496-521, <<https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1015946>>.
- Jost, C. *et al.* [2016], "Understanding gender dimensions of
agriculture and climate change in smallholder farming
communities", *Climate and Development*, 8(2): 133-144.
- Lee, D. R. *et al.* [2014], "Developing local adaptation strate-
gies for climate change in agriculture: A priority-setting
approach with application to Latin America", *Global
Environmental Change*, 29: 78-91.
- Lobo, C. [2011], "Mainstreaming climate change adaptation:
The need and role of civil society organizations", world
resources report, World Resources Institute Accessed, con-
sultado el 12 de julio de 2023, <[https://files.wri.org/d8/s3fs-
public/2023-02/wrr-2010-11-question-9-response-3.pdf](https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-02/wrr-2010-11-question-9-response-3.pdf)>.
- Mazeka, B. *et al.* [2019], "Community-based mapping methodo-
logy for climate change adaptation: A case study of Quarry
Road West informal settlement, Durban, South Africa", P.
B. Cobbinah y M. Addaney (eds.), *The geography of climate
change adaptation in urban Africa*, Cham, Suiza, Palgrave
Macmillan, 57-88.
- Owen, G. [2020], "What makes climate change adaptation
effective? A systematic review of the literature", *Global
Environmental Change*, 62: 102071.
- Rockström, J. *et al.* [2009], "A safe operating space for huma-
nity", *Nature*, 461(7263): 472-475.
- Samaniego, J. *et al.* [2017], "Medidas de mitigación y adap-
tación al cambio climático en América Latina y el Caribe",
Santiago, Cepal/ONU, consultado el 9 de agosto de 2023,
<[https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/
45704/1/S1700198_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45704/1/S1700198_es.pdf)>.

Schenk, T. *et al.* [2016], “Joint fact-finding in practice: Review of a collaborative approach to climate-ready infrastructure in Rotterdam”, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(1): 273-293.

CONCLUSIONES

V. Sophie Ávila-Foucat

PRINCIPALES HALLAZGOS

La presente obra muestra los principales estresores y *shocks* con sus efectos en las esferas sociales, económicas, ambientales y de gobernanza en la región Copalita. Asimismo, explica cómo esos efectos producto de las interacciones dentro del socioecosistema definen las trayectorias históricas y futuras de este último. Por tanto, cumple con su principal objetivo inicial y expone una diversidad de enfoques teórico-metodológicos para abordar la dinámica de los socioecosistemas. De manera particular, se describe la relación explícita de diversos estresores y el cambio de uso del suelo con los servicios ecosistémicos y las actividades productivas, lo mismo que las estrategias de adaptación y de políticas públicas, tales como la migración, la diversificación y las políticas sociales y de conservación.

El capítulo 1 explica que algunos factores de cambio, entre los que se cuentan la desaparición del Inmecafé, los huracanes Paulina y Agatha, la roya, los sismos y el covid-19, han generado la creación de un sistema de comunidades, mercados específicos de café o políticas públicas de conservación; así, se acredita que las acciones concretas de la sociedad encaminadas a enfrentar los factores de cambio van moldeando la resiliencia y la trayectoria del socioecosistema.

El capítulo 2 reporta el aumento de la provisión superficial de agua, la retención de sedimentos y el almacenamiento de carbono en áreas de mayor cobertura vegetal, lo que resalta la importancia del café bajo sombra.

El capítulo 3 ofrece un análisis de los medios de vida de los hogares del complejo Cozihua, tales como la migración y la diversificación de ingresos. Así, se observó que la migración internacional se asocia con apoyos de gobierno, remesas y comunicaciones, porque requiere elementos mínimos en términos de ingreso y capital social para poder materializarse; en contraste, decrece si los miembros del hogar laboran en el sector servicios (como en la zona turística de Huatulco), lo que evidencia el alcance económico del desarrollo y promoción de las actividades turísticas en la región, a pesar de ser un turismo de masas no amigable con el medio ambiente. De este modo, se identificó a la migración como una estrategia para afrontar problemas estructurales que, sin embargo, no coadyuva a un desarrollo resiliente

El capítulo 4 expone escenarios prospectivos de cambios de uso del suelo y cobertura, que confirman la tendencia del crecimiento urbano, el aumento de la frontera agropecuaria y la disminución de la selva asociada con el café bajo sombra.

El capítulo 5 muestra los efectos del cambio climático en la producción de café, por medio de la modelación basada en agentes, para lo cual plantea dos escenarios: en el escenario 1, de menos de 600 milímetros de precipitación y una elevación de 1.4 grados en la temperatura, se prevé un descenso de alrededor de 10 % en el rendimiento de café y 9 % más de roya; en el escenario 2, con menos de 900 milímetros de precipitación y un aumento de 2.7 grados de temperatura, se anticipa una reducción de 43 % en rendimiento y 19 % de incremento de roya. Por tanto y dado que la producción de café representa un medio de vida de suma relevancia para la zona en términos ambientales, sociales y económicos, cobran especial importancia el manejo del cafetal y el poder de agencia de los productores.

Con respecto a las estrategias de adaptación, en el taller de cartografía participativa (capítulo 6) se citaron como principales acciones la reforestación, el manejo de residuos, la renovación de cafetales, las prácticas agroecológicas, los mercados de especialización, las cadenas cortas de mercado y la diversificación. En cuanto a las políticas públicas relevantes a lo largo del tiempo para enfrentar diversos estresores, se destacaron diversos instrumentos de conservación, como las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación o el Pago por Servicios Ambientales, pero también los programas de manejo forestal; asimismo, se juzgaron relevantes las políticas de apoyo a la producción agroforestal y a proyectos productivos en los pueblos indígenas, así como el fomento a la organización social. En esta obra se comprueban las diferencias espaciales a lo largo de la cuenca, por lo que la resiliencia para el desarrollo debe considerar políticas diferenciadas territorialmente a escala cuenca o por lo menos regional.

IMPLICACIONES TEÓRICAS Y METODOLÓGICAS

Diversidad de estresores

Una de las principales conclusiones de esta obra es que los sistemas socioecológicos experimentan diversos *shocks* y estresores tanto internos como externos que deben tomarse en cuenta en las investigaciones relacionadas, ya que el estudio de un solo estresor (resiliencia específica) origina cierta incertidumbre, porque el sistema responde al mismo tiempo a varios estresores. De igual manera, los factores de cambio internos y externos producen efectos distintos en los componentes del sistema, lo mismo que espacialmente y en el tiempo; por tanto, monitorear su progreso e impacto en el tiempo y espacio es de suma importancia para los programas de adaptación, de vulnerabilidad o de atención a desastres. Además de

lo anterior, algunas estrategias de respuesta pueden convertirse con el tiempo en estresores, debido a la falta de límites (umbrales) específicos de dicha actividad.

Interacciones socioecológicas

Las interacciones en el socioecosistema de estudio varían en el espacio y el tiempo, con efectos diferenciados de los estresores. Las respuestas espaciales no solo se relacionan con el contexto y los factores estructurales, sino con diferentes interacciones entre los aspectos sociales, económicos y ambientales a lo largo del territorio, lo que produce efectos particulares de los factores de cambio. En este libro, no se alcanza a analizar cómo varían las interacciones entre cada una de las escalas (cuenca, mesocuenca y hogar), ni los efectos cascada entre estas escalas; pero sí se comprueban las implicaciones de los estresores identificados en los servicios ecosistémicos y en las actividades productivas a escala cuenca y para la región de café. Si bien se analiza la migración y se reconoce la importancia de la diversificación, en un futuro sería de gran valor incluir de manera más estrecha la interacción con la gobernanza y otros aspectos económicos.

Poder de agencia

Las acciones humanas pueden moldear la trayectoria de los socioecosistemas, como se observa a través del manejo agroforestal, la capacidad de organización social, la creación de mercados o las acciones de conservación, lo que hace evidente que tanto la naturaleza como el ser humano son capaces de producir servicios ecosistémicos que benefician a la sociedad. Por tanto, se necesita planear acciones que den pauta a una trayectoria sustentable de los socioecosistemas y fundamentada

en datos científicos, en la interdisciplina y la transdisciplina. El poder de agencia va acompañado de un proceso de auto-organización, gobernanza y aprendizaje a lo largo del tiempo (elementos clave de un desarrollo resiliente), y por esa razón surge de procesos en el socioecosistema que es importante incentivar y monitorear.

Trayectoria hacia un desarrollo resiliente

La trayectoria del socioecosistema aquí estudiado depende de las interacciones entre sociedad, naturaleza y estresores. Es posible advertir la necesidad de una coevolución de los elementos del sistema, tales como el cambio de uso del suelo, los servicios ecosistémicos, el poder de agencia o respuestas institucionales, así como los aspectos económicos y los medios de vida.

Difícilmente se puede adjudicar un peso diferenciado a cada uno de esos elementos, debido a que todos influyen en la dinámica del sistema; pero a lo largo del libro es posible distinguir umbrales para algunas de estas variables, tales como cobertura mínima de sombra, capitales de los hogares o rendimientos, mismos que definen la trayectoria futura del sistema socioecológico.

Por otro lado, el estudio de la trayectoria histórica del sistema permite identificar estresores, efectos y respuestas a lo largo del tiempo, para entender los aprendizajes extraídos del sistema y comprender que con el tiempo algunas respuestas pueden convertirse en estresores. La dinámica de los socioecosistemas no parece comportarse como lo indica el ciclo adaptativo de Holling con las etapas de crecimiento, colapso y reorganización; en la segunda década del siglo XXI, el sistema de estudio se ha estancado enfrentando de manera más recurrente nuevos estresores.

Los escenarios de cambio de uso de suelo y la modelación de agentes tampoco muestran escenarios muy promisorios. Esto lleva a inferir que los socioecosistemas que enfrentan de manera más recurrente e intensa diversos estresores y *shocks* tendrán que destinar más esfuerzos a construir un desarrollo resiliente; los factores clave para ello son el reconocimiento de umbrales clave y la generación de capacidades para la reorganización, la innovación y la gobernanza.

Interdisciplina y transdisciplina

La interdisciplina visible en cada uno de los capítulos del libro facilita un mejor entendimiento de los procesos que se dan en la cuenca. En cuanto a la transdisciplina, se observa gran interacción con diversos actores mediante las diferentes metodologías; pero no hay una construcción conjunta de las preguntas de investigación, sino una validación de resultados o hipótesis. En particular, el mapeo participativo permitió lograr un aprendizaje colectivo con énfasis en el territorio, siendo esto un elemento valioso para transparentar bajo diferentes miradas el pulso de las dinámicas espaciotemporales; también focalizar y priorizar estrategias de intervención territorial, considerando diversos esfuerzos locales e interinstitucionales de cara a un desarrollo resiliente.

Aspectos metodológicos

La riqueza de enfoques metodológicos presentados en el libro a través de análisis espaciales, modelos econométricos, modelos basados en agentes y el análisis cualitativo induce a reflexionar sobre la necesidad de recurrir a enfoques complementarios, pero compatibles, para entender la dinámica

de un socioecosistema. Incluso los enfoques pueden ser integrados en un solo modelo, como es el caso de la modelación basada en agentes o modelación de sistemas dinámicos, lo que demanda superar varios retos, entre ellos vincular escalas diferentes, la disponibilidad de datos y la formalización matemática en un modelo. En este sentido, la modelación basada en agentes, presentada en el capítulo 5, representa un esfuerzo importante por integrar diversos enfoques teórico-metodológicos, y conjunta el análisis del cambio de uso del suelo, la modelación de servicios ecosistémicos y los rendimientos del café. Los siguientes pasos a este respecto son incorporar de manera más precisa aspectos económicos, de mercado y de gobernanza de la actividad cafetalera, elementos a los que se concede relevancia en el primer capítulo. Cabe señalar que a lo largo del proyecto se produjo más información no incluida en la obra, pero que contribuye a entender la dinámica del socioecosistema y adiciona nuevos enfoques metodológicos, por ejemplo: un análisis de la diversificación de ingresos; un análisis de redes sociales para estudiar la cadena de valor del café y los servicios ecosistémicos hídricos; un análisis de coherencia de políticas, y los determinantes y resiliencia de los medios de vida a escala hogar.

IMPLICACIONES EMPÍRICAS

A lo largo de esta obra, se han estudiado las perspectivas de desarrollo resiliente para la costa de Oaxaca y en particular para la cuenca Copalita. El desarrollo histórico en la región ha mostrado pautas de crecimiento y estancamientos por causa de diversos efectos de los estresores y *shocks*, pero los elementos ecológicos y sociales también transitan por un proceso de aprendizaje y adaptación. Por tanto, se identificaron variables y umbrales específicos que determinan la trayectoria de este sistema. De manera particular, hay que poner

atención en el cambio de uso del suelo, los servicios ecosistémicos hídricos y la gobernanza de la región en términos de organización social, relaciones institucionales, diversificación productiva; también en aspectos de innovación en los mercados y formas de producción sustentable. Las políticas públicas han tenido un papel fundamental en la zona, siendo las productivas, sociales y ambientales cruciales para el futuro de la cuenca. En conjunto, dichas políticas deben integrarse en un plan de desarrollo resiliente de la cuenca, que contenga una teoría de cambio con una zonificación de actividades, formas de llevarlas a cabo, umbrales e interacciones por conservar, así como la identificación de capacidades por fortalecer.

SEMBLANZAS

V. Sophie Ávila-Foucat. Investigadora Titular C del Instituto de Investigaciones Económicas de la UNAM y miembro del Consejo Directivo del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera (LANRESC). Recibió la Distinción Universidad Nacional para Jóvenes Académicos en el área de Investigación en Ciencias Económico-Administrativas en 2012 y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 3.

Es doctora en Economía Ambiental y Manejo de Ecosistemas por la Universidad de York del Reino Unido, maestra en Manejo Integral de Zonas Costeras Tropicales por la Universidad de Newcastle Upon Tyne, también del Reino Unido, y bióloga por la Facultad de Ciencias de la UNAM. Es docente en la Licenciatura de Economía y en los posgrados de Economía y de Ciencias de la Sostenibilidad. Sus líneas de investigación abordan los temas de la diversificación sustentable del sector rural, la pobreza y los medios de vida, la resiliencia de los socioecosistemas, la valoración económica y la evaluación de políticas públicas.

Alejandra Ramírez León. Candidata a doctora del posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, por el Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Su proyecto de investigación de doctorado enfoca el papel de las interacciones sociales en la adaptación y resiliencia del sistema agroalimentario de café localizado en las cuencas Copalita y Huatulco, en Oaxaca. Sus temas de interés están relacionados con gobernanza de actividades económicas

sustentables y gobernanza para la adaptación en sistemas socio-ecológicos. Ha sido consultora independiente en proyectos asociados con la diversificación productiva y la intensificación del manejo productivo entre cafetaleros para organizaciones como Conservación Internacional México y el Fondo Mundial para la Naturaleza México (WWF, del inglés, World Wildlife Fund). Actualmente colabora en el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera, como parte del grupo de trabajo de gobernanza y socioeconomía, donde aborda temas relacionados con adaptación y resiliencia entre cooperativas pesqueras de los siete observatorios costeros del Laboratorio.

Ángel Merlo Galeazzi. Candidato a doctor del posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad por el Instituto de Investigaciones Económicas (IIEC) de la UNAM.

Estudió la licenciatura en Biología en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y posteriormente cursó la maestría en Ciencias Biológicas en la UNAM con estudios acerca de los efectos de la perturbación antropogénica sobre cuerpos de agua dulce. Su proyecto de investigación de doctorado en Ciencias de la Sostenibilidad cubre el tema gobernanza y preservación de los servicios ecosistémicos hídricos del complejo hidrológico Copalita y Huatulco, en Oaxaca. Es miembro del Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera.

Driss Ezzine de Blas. Investigador del Departamento de Sociedades y Medioambiente, en el Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD, por sus siglas en francés). Sus temas de interés son la evaluación de programas de conservación y de desarrollo. Cuenta con experiencia de campo en Europa, África y Latinoamérica. Actualmente coordina diversos proyectos y es docente en temas tales como análisis de políticas ambientales. Le interesa apoyar el cambio social y las políticas para un desarrollo rural sustentable.

José Mauricio Galeana-Pizaña. Investigador del Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo). Es licenciado en Geografía, maestro en Geomática y doctor en Geografía. Actualmente funge como profesor investigador en el CentroGeo y forma parte de la plantilla de profesores del Colegio de Geografía en la UNAM. Entre otras distinciones, ha sido ganador de un concurso nacional de tesis de licenciatura sobre ecosistemas y biodiversidad, en la categoría de investigación, que organiza la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp). Su desempeño profesional ha contribuido principalmente a aportar conocimiento en las áreas de sistemas de información geográfica, percepción remota, cartografía participativa y geoestadística, con orientación a líneas de investigación de modelación de la biofísica de servicios ecosistémicos, cambio de uso de suelo y la interacción salud-sistemas agroalimentarios.

Juan Manuel Núñez. Investigador del Centro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad (Centrus), de la Universidad Iberoamericana. Doctor y maestro en Geomática por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo). Estudió la licenciatura en Ingeniería Topográfica y Geodesia en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, donde se desempeña como profesor de asignatura desde hace más de 15 años. Fue investigador asociado del CentroGeo y actualmente es académico de tiempo completo del Centrus en la Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Ha acumulado una experiencia de 20 años en docencia, con participación en proyectos de investigación y vinculación relacionados con la aplicación de la geomática en la comprensión de diferentes procesos geográficos en entornos naturales y urbanos. Es autor y coautor de múltiples obras en su campo de aplicación. Forma parte del Comité Técnico Asesor de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT)

de la Ciudad de México y del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Julieta Blancas-Zamora. Ingeniera en Geomática por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ganadora de la Medalla Gabino Barreda 2020 y galardonada con el premio ANFEI 2018 otorgado por la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería por su gran nivel académico como estudiante de licenciatura. Ha realizado estancias en la Universidad Politécnica de Valencia, en España, para la especialización de procesos espaciales dentro del área de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. Ha colaborado en proyectos de creación de herramientas y manuales para el uso de herramientas libres aplicadas a la visualización y procesamiento de información espacial. Se ha desarrollado como residente en temas de topografía y construcción, así como en temas de hidrografía para dragados.

Pierre Mokondoko Delgadillo. Maestro y doctor en Ciencias por el Instituto de Ecología, A. C. (Inecol), en Xalapa Veracruz, con estancia posdoctoral en el Instituto de Investigaciones Económicas (IEEC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Sus líneas de investigación de maestría y doctorado se centraron en el manejo de recursos naturales del Instituto de Ecología, A. C. Desde 2007, su trabajo como estudiante y prestador de servicios profesionales se ha enfocado en el uso de herramientas de percepción remota y de sistemas de información geográfica (SIG), para la cuantificación de los servicios ecosistémicos (SE), modelación espaciotemporal de sistemas socioecológicos y el manejo de cuencas. Ha acumulado experiencia en el uso de herramientas de modelación dinámica, para simular proyecciones futuras de los sistemas socioecológicos, con el fin de identificar las variables biofísicas y socioeconómicas que afectan los sistemas productivos,

los agroecosistemas y los servicios ecosistémicos. Sus trabajos de investigación pretenden convertir el uso y desarrollo de herramientas tecnológicas para el análisis espacial en una piedra angular para conservar los servicios ecosistémicos o servicios hidrológicos, contribuir al diseño de políticas y brindar un soporte de la toma de decisiones.

Uberto Salgado Nieto. Investigador Asociado C de Tiempo Completo en el Instituto de Investigaciones Económicas (IIEC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Doctor y maestro en Economía por el Programa de Posgrado de Economía de la UNAM. Se desempeña como docente en la licenciatura de Actuaría de la Facultad de Ciencias; a nivel de especialidad, en el Programa Único de Especializaciones en Economía (PUEE); y en la maestría, en el Instituto de Investigaciones Económicas. Sus líneas de investigación se vinculan con temas como desarrollo económico, mercados laborales, migración, estudios rurales y sustentabilidad.

Ulises Sánchez Guerrero. Economista por la Facultad de Economía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con especialidad en microfinanzas por la Unidad de Posgrado de la misma institución. Obtuvo el reconocimiento Medalla Gustavo Baz Prada por compromiso social en 2016. Ha sido analista de datos y colaborador en diferentes proyectos y artículos de investigación en el Instituto de Investigaciones Económicas (IIEC) de la UNAM, en temas de migración, mercados de trabajo y economía ambiental. Se ha desempeñado como consultor independiente en el proyecto TEEB AgriFood Café en México, realizando talleres estatales, así como gestión y análisis de datos; en el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), colaborando en la creación de un sistema de monitoreo de los medios de vida y resiliencia de hogares en el estado de Oaxaca; y en la Iniciativa Financiamiento de la Biodiversidad (Biofin) México, para el análisis de subsidios agrícolas con efectos en la biodiversidad.