



## DINÁMICA Y VULNERABILIDAD ECOLÓGICA DE LA RESERVA ESTATAL SIERRA DEL TENTZO, MÉXICO †

### [DYNAMICS AND ECOLOGICAL VULNERABILITY OF THE SIERRA DEL TENTZO STATE RESERVE, MEXICO

**Martin Neri-Suárez<sup>1</sup>, Angel Bustamante-González<sup>2\*</sup>, Samuel Vargas-López<sup>2</sup>,  
Benito Ramírez-Valverde<sup>2</sup>, José Luis Jaramillo-Villanueva<sup>2</sup>  
and Francisco J. Escobedo<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Puebla. Tercer Carril del Ejido “Serrano”, S/N, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, Puebla, México. C.P. 72640

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados Campus Puebla, km 125.5 carretera Federal México-Puebla, Santiago Momoxpan, Puebla, México. C.P. 72760. Email:

[angelb@colpos.mx](mailto:angelb@colpos.mx)

<sup>3</sup> US Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Los Angeles, CA, USA.

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background:** Knowledge and evaluation of ecological changes in Protected Natural Areas is important for their planning and management. The use of tools such as land use change prediction models and satellite image analysis are low-cost and high-precision alternatives that can contribute to this purpose. **Objective:** Estimate the trend of land use change and vulnerability of the ecosystems of the Sierra del Tentzo State Reserve (REST), Mexico. **Methodology:** The REST sites with the highest probability of change in their ecosystems were identified according to phases of the adaptive cycles of the Panarchy theory; the use of Landsat images to classify land use and vegetation types, and the identification of areas of greatest vulnerability with a Markov chain model. **Results:** The trend of change from a state of conservation to a state of growth predominates in the reserve, which indicates a deterioration of the ecosystems with primary vegetation that are being transformed into grasslands and crop areas. While, in the future projection, the areas with greater ecological vulnerability are grouped in a pattern associated with human settlements in population centers. **Implications:** The study was on a regional scale, so changes and vulnerability at the local level were not explored. **Conclusion:** In the Sierra del Tentzo State Reserve there is a process of ecosystem degradation and some areas, particularly those most susceptible to human activities, are more vulnerable to this degradation. These areas should be considered in the reserve management program as priority attention.

**Key words:** adaptive cycle; conservation status; ecosystems; Markov chains; Protected Natural Areas.

#### RESUMEN

**Antecedentes:** El conocimiento y evaluación de los cambios ecológicos de las Áreas Naturales Protegidas es importante para su planeación y gestión. El uso de herramientas como los modelos de predicción de cambio de uso del suelo y de análisis de imágenes de satélite son alternativas de bajo costo y alta precisión que pueden coadyuvar a ese propósito. **Objetivo:** Estimar la tendencia de cambio de uso del suelo y vulnerabilidad de los ecosistemas de la Reserva Estatal Sierra del Tentzo (REST), México. **Metodología:** Se identificaron los sitios de la REST con mayor probabilidad de cambio en sus ecosistemas de acuerdo a fases de los ciclos adaptativos de la teoría de la Panarquía; el uso de imágenes Landsat para clasificar el uso del suelo y tipos de vegetación, y la identificación de las áreas de mayor vulnerabilidad con un modelo de cadenas de Markov. **Resultados:** En la reserva predomina la tendencia de cambio de un estado de conservación a un estado de crecimiento, lo que indica un deterioro de los ecosistemas con vegetación primaria que se están transformando a pastizales y áreas de cultivo. Mientras que, en la proyección futura, las áreas con mayor vulnerabilidad ecológica se agrupan en un patrón asociado a los asentamientos humanos de los núcleos de población. **Implicaciones:** El estudio fue a una escala regional, por lo que no se exploraron cambios y vulnerabilidad a nivel local. **Conclusión:** En la Reserva Estatal Sierra del Tentzo se tiene un proceso de degradación de los

† Submitted December 3, 2023 – Accepted September 14, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5310>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = M. Neri-Suárez: <http://orcid.org/0000-0003-1828-8906>; A. Bustamante-González: <http://orcid.org/0000-0002-0727-9505>; S. Vargas-López: <http://orcid.org/0000-0002-8303-3128>; B. Ramírez-Valverde: <http://orcid.org/0000-0003-2482-5667>; J. L. Jaramillo-Villanueva: <http://orcid.org/0000-0001-8179-6351>; F. J. Escobedo: <http://orcid.org/0000-0002-9272-5046>

ecosistemas y algunas áreas, particularmente las más susceptibles a las actividades humanas, son más vulnerables a esta degradación. Estas áreas deben considerarse en el programa de manejo de la reserva como de atención prioritaria. **Palabras clave:** Áreas Naturales Protegidas; Cadenas de Markov; ciclos adaptativos; ecosistemas; estado de conservación.

## INTRODUCCIÓN

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de México son sistemas socioecológicos complejos debido a la diversidad biológica y procesos ecosistémicos que albergan, así como a la diversidad étnica, cultural y de procesos sociales presentes en las comunidades ubicadas dentro o en la vecindad de las ANP (De la Mora-De la Mora y López-Miguel 2022). A diferencia de países desarrollados, donde las áreas protegidas están deshabitadas y son de propiedad estatal (Barborak, 2021), en México la mayoría de las ANP se localizan en regiones rurales donde la población depende en gran medida de los recursos naturales para obtener parte de sus medios de subsistencia. En estado de Puebla, México, se tienen 19 Áreas Naturales Protegidas (ANP), dentro de las cuales se tiene la Reserva Estatal Sierra del Tentzo (REST); decretada en 2011 debido a su relevancia en biodiversidad y servicios ambientales, y a la presión antropogénica que afecta sus ecosistemas. La planeación y gestión efectiva de la reserva representa un reto, por la complejidad de las interacciones de los sistemas ecológicos y socioeconómicos, dentro de la cual la utilización del territorio determina tendencias de conservación o deterioro estos recursos.

Para entender por qué, a pesar de ser que la REST es un ANP, los ecosistemas de la reserva continúan deteriorándose es necesario el análisis espacio-temporal del estado de conservación o deterioro de los ecosistemas contenidos en la misma. En este estudio se utilizó el cambio de uso de suelo como indicador de vulnerabilidad de la REST a escala de paisaje, ya que este proceso es medible espacial y temporalmente (Lu *et al.*, 2017). Se clasificó el uso del suelo y los tipos de vegetación de la reserva en cuatro categorías, de acuerdo al concepto de ciclos adaptativos de la teoría de la Panarquía (Allen *et al.*, 2014).

En los ciclos adaptativos, la vulnerabilidad al cambio se define como una transición de una categoría a otra, lo que ocurre cuando un ecosistema supera sus fronteras de resiliencia y se vuelve vulnerable a un cambio de régimen (Dakos *et al.*, 2015). Se mide, por ejemplo, con el nivel de probabilidad de que un área con vegetación conservada transite a un área agrícola. Por el contrario, la resiliencia determina la cantidad de cambio que un ecosistema puede absorber antes de pasar de una fase a otra, y se relaciona intrínsecamente con cada uno de los procesos que ocurren en un ciclo adaptativo (Allen *et al.*, 2014). En este sentido, esta

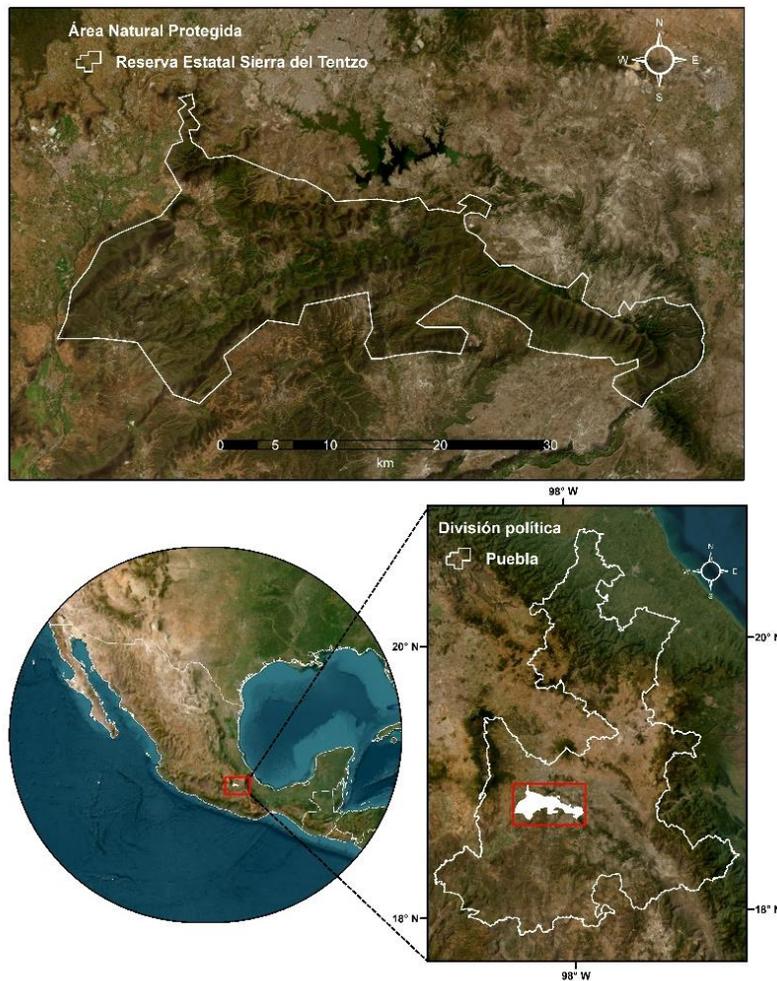
investigación se centra en la conceptualización de la REST como un sistema socioecológico y su análisis con la teoría de Panarquía y técnicas de análisis geoespaciales, para comprender la interacción humana - ecosistemas.

La Teoría de la Panarquía se ha utilizado para describir la evolución de sistemas socioecológicos en diversos estudios de procesos sociales y naturales, como la migración y el cambio ambiental, la deforestación y cambios institucionales (Downey, 2010; Carreiro y Zipperer, 2011; Warner, 2011). Con base en esta teoría, en este estudio se postula que la REST contiene áreas con diferente vulnerabilidad al deterioro ecológico y probabilidades de transición entre estados de conservación o deterioro. El objetivo de este estudio es estimar las tendencias de cambio en el uso del suelo y evaluar la vulnerabilidad ecológica, con el fin de identificar áreas con diferentes niveles de vulnerabilidad y determinar sus probabilidades de transitar entre distintos estados ecológicos.

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

La Reserva Estatal Sierra del Tentzo es una de las 19 Áreas Naturales Protegidas estatales del estado de Puebla, México, tiene una superficie de 578 km<sup>2</sup> y se localiza en la región central del estado de Puebla (Figura 1). La reserva fue decretada en 2011 con el objetivo principal de conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y los servicios ambientales y contiene un mosaico importante de diversidad biológica y cultural (SDRSO, 2011). Presenta una variación altitudinal de 950 a 2688 msnm, y cuenta con seis tipos de vegetación y diversas zonas agrícolas. Las actividades del sector primario, la agricultura y la ganadería, predominan en las comunidades humanas de la reserva, donde aún se lleva a cabo un alto uso extractivo de recursos naturales, como la fauna, flora silvestre, leña y minerales. La reserva tiene una zona núcleo, donde se concentra la mayor biodiversidad y se tiene mayor cobertura vegetal; una zona de aprovechamiento, donde la población aprovecha los recursos naturales y realiza actividades agropecuarias; una zona deteriorada, identificadas como zonas de restauración ecológica, y las zonas de los asentamientos humanos, ocupan superficies pequeñas dentro de la reserva, ya que la mayoría de las comunidades tienen menos de 1000 habitantes.



**Figura 1.** Ubicación del Área Natural Protegida Sierra del Tentzo. Fuente: elaboración propia a partir de datos de SDRSO (2011).

### Identificación y clasificación de los regímenes de la Panarquía

Los usos del suelo y tipos de vegetación se delimitaron con imágenes de satélite Landsat 4-5 de los años 1999, 2009 y 2018, todas del mes de noviembre. Se aplicó un proceso de mejoramiento de borde de píxel (ERDAS IMAGINE versión 14), utilizando un filtro de matriz de convolución 3 x 3. Posteriormente, se realizó una clasificación no supervisada de 50 clases, agrupadas por su similitud espectral relativa para cada imagen. Posteriormente, se realizó una clasificación supervisada, donde las 50 clases iniciales fueron agrupadas en 13 categorías. Este proceso de reagrupación se alineó cuidadosamente con la cartografía de las series I, IV y VI de uso de suelo y vegetación documentadas por el INEGI en los años 1997, 2009 y 2016, permitiendo así una comparación directa con clasificaciones estandarizadas y reconocidas a nivel nacional. Finalmente, se llevó a cabo una clasificación basada en la correspondencia a cada uno de los 13 tipos de vegetación y uso del suelo,

identificados previamente en las imágenes de satélite Landsat 4-5, con las características principales de los cuatro ciclos adaptativos de la Panarquía descritos por Allen *et al.* (2014) (Tabla 1). En los ciclos adaptativos, la fase de crecimiento ( $r$ ) correspondió a los ecosistemas con vegetación secundaria, los cuales han experimentado un proceso de perturbación, pero no han superado el umbral de resiliencia y se encuentran en transición para regresar a su estado inicial. La fase de conservación ( $k$ ) incluyó a ecosistemas que presentan un estado clímax en su vegetación y una acumulación importante de biomasa; se identificó por su vegetación primaria y el uso de recursos naturales por los pobladores locales. La fase de liberación ( $\Omega$ ) correspondió a las zonas agrícolas y urbanas. La fase de reorganización ( $\alpha$ ) son áreas con perturbación ecológica y en el estudio se relacionó con tierras de pastizal inducido, desarrollado en sitios donde se ha eliminado cualquier tipo de vegetación, en áreas agrícolas abandonadas o en áreas que se incendian frecuentemente.

**Tabla 1. Clasificación del uso del suelo de acuerdo a las fases de la Panarquía.**

Tipo de vegetación y uso de suelo	Fases
Bosque de encino	<i>k</i> - Conservación
Matorral desértico rosetófilo	
Palmar inducido	
Selva baja caducifolia	<i>r</i> - Crecimiento
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	
Vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	<i>α</i> - Reorganización
Pastizal inducido	
Agricultura de riego anual y semipermanente	<i>Ω</i> - Liberación
Agricultura de temporal anual	
Urbano construido	

**Fuente:** elaboración propia con base en INEGI (1997, 2009 y 2016)

### Selección de variables que influyen en el cambio

Para el modelo de dinámica de cambio del uso del suelo y los tipos de vegetación, se seleccionaron variables físicas relacionadas con factores de cambio ecológico: modelo digital de elevación, distancia a caminos y zonas agrícolas y urbanas. Además, se utilizó una capa de tendencias de cambio espacial con ajuste polinómico para identificar las zonas con mayor cambio entre 1999 y 2018. Las cinco variables de cambio se ingresaron en formato ráster (con un tamaño de celda de 30,30) al módulo "Land Change Modeler" del programa *TerrSet* y fueron procesadas utilizando la función de distancia euclidiana.

### Análisis de detección y tendencias de cambio en las fases de la Panarquía

Para predecir las tasas de cambio de uso del suelo y vegetación proyectados para los años 2030, 2050 y 2100, se empleó una red neuronal como algoritmo de aprendizaje automático, la cual identifica las áreas con mayor probabilidad de cambio en la cobertura del suelo (Eastman, 2016). Además, cuantifica las pérdidas y ganancias espacio-temporales de la superficie de la reserva, expresadas en términos del promedio de superficie que cambia de una fase a otra durante el periodo analizado. Esta estimación se obtuvo mediante la ecuación utilizada por Halefom *et al.* (2018):

$$\text{Tasa de cambio} \left( \frac{\text{km}^2}{\text{año}} \right) = \frac{x-y}{z}$$

dónde:

*x* = área reciente

*y* = área previa

*z* = intervalo de tiempo entre *X* y *Y* en años

### Cadenas de Markov

Se calculó la matriz de probabilidad de transición entre usos del suelo y vegetación con el módulo MARKOV de *TerrSet*, para estimar la probabilidad del cambio de superficie entre 2009 y 2018. El modelo de Cadenas de Markov es que describe procesos estocásticos y asigna probabilidades de cambio basadas en eventos anteriores para proyectar cambios futuros. Esto permite cuantificar la superficie modificada y obtener las probabilidades de que una categoría de uso de suelo o tipo de vegetación se mantenga o cambie en el futuro. El modelo considera dos supuestos. El primero considera que el estado de la tierra en cualquier momento del futuro (*t* + 1) es discreto y depende del estado anterior inmediato (*t*), obteniendo así una matriz de transición derivada de dos conjuntos de datos (*t* y *tn*). A partir de esta matriz se obtienen las probabilidades de cambio para un tercer punto en el futuro. El segundo supuesto se relaciona con la matriz de transición, que se supone estacionaria en el tiempo y se puede utilizar para predecir futuras distribuciones de uso de la tierra a partir de los datos actuales (Iacono *et al.*, 2015). En un contexto de análisis de cambio de uso de suelo, la matriz de transición se representa matemáticamente mediante la ecuación propuesta por Subedi y Thapa (2013):

$$L_{(t+1)} = P_{ij} * L_{(t)}$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mm} \end{bmatrix}$$

Donde,  $L_{(t+1)}$  y  $L_{(t)}$  corresponden a la categoría de uso de suelo para el tiempo *t*+1 y *t* respectivamente.

$(0 \leq P_{ij} < 1$  y  $\sum_{j=1}^m P_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, \dots, m))$  es la matriz de probabilidad de transición para un estado.

Se utilizaron los mapas de uso de suelo y tipos de vegetación de 1999 como el equivalente a  $t$  y del año 2009 como  $t+1$  para proyectar el uso de suelo y los tipos de vegetación en el año 2018. Para adaptar la matriz de transición a los ciclos adaptativos de la Panarquía se asignó una matriz de  $4 \times 4$  a las categorías de  $P_{ij}$ , donde se asume que cada estado corresponde a una de las fases de la Panarquía: crecimiento ( $r$ ), conservación ( $k$ ), liberación ( $\Omega$ ) y reorganización ( $\alpha$ ) (Figura 2).

### **Análisis de sensibilidad y precisión de la predicción del modelo**

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del modelo para determinar las variables con mayor influencia en el cambio de uso de suelo. Las variables se consideraron como variables estáticas, lo que significa que expresan aspectos básicos de idoneidad para las transiciones de los cuatro ciclos adaptativos y no cambian con el tiempo. El modelo utiliza el algoritmo de Red Neuronal de Perceptrón Multicapa (MLP) (Eastman, 2016) para medir la influencia de cada variable en el potencial de transición de los usos de suelo. Este algoritmo mantiene constantes todas las variables independientes y es capaz de identificar relaciones de naturaleza no lineal.

La precisión de la predicción del modelo se evaluó comparando la superficie y la ubicación espacial de cada categoría. Se comparó la imagen Landsat de 2018 con el mapa generado por el modelo de predicción para el mismo año. La comparación de superficies se realizó entre las clases de uso de suelo del mapa de clasificación y el mapa generado por el modelo de predicción del año 2018. Para la precisión de la ubicación espacial de cada categoría, se utilizó el módulo *VALIDATE* del programa *TerrSet* para obtener el estadístico Kappa de localización ( $K_{\text{location}}$ ).

### **Análisis de vulnerabilidad**

A partir de los mapas de tendencias de cambio proyectadas y el análisis de cadenas de Markov, se modelaron las transiciones que van desde la fase de conservación ( $k$ ) a la de destrucción ( $\Omega$ ). Este modelo realiza una evaluación integral del potencial de cambio del periodo analizado (Eastman, 2016) y arroja como resultado el mapa de vulnerabilidad al cambio, en el que se expresa la probabilidad de que un píxel cambie de un régimen a otro.

## **RESULTADOS**

### **Sensibilidad y precisión de predicción del modelo**

Los resultados revelaron que la variable de tendencia de transición  $k-\Omega$  de noveno orden ejerce la mayor influencia sobre los cambios de uso de suelo en la reserva. Esta variable dependiente, influenciada por el tipo de paisaje, el uso del suelo y las características físicas específicas de la reserva, es determinante en la transición de áreas bien conservadas hacia estados ecológicamente alterados. Por otro lado, la influencia de la distancia a zonas agrícolas y urbanas resultó ser la menos significativa (Tabla 2). Esta observación destaca la complejidad del proceso de deterioro de las zonas con vegetación primaria, que, a pesar de su lejanía de asentamientos humanos y zonas agrícolas, enfrentan cambios significativos. La incorporación de esta variable de tendencia polinómica en nuestro modelo permite una representación más precisa de dinámicas complejas y altamente no lineales, específicamente diseñada para contextos donde los patrones de cambio son complejos debido a la intervención humana (Gupta & Sharma, 2020). En contraste con variables convencionales como la proximidad a zonas agrícolas y urbanas, cuya influencia intuitiva en los cambios de uso del suelo ha sido documentada en estudios anteriores (Sahagún-Sánchez et al., 2018; Pérez et al., 2021; Hernández-Cavazos et al., 2023), nuestra investigación encontró que estas tienen un impacto menos determinante. El ajuste polinómico revela patrones de cambio que son cruciales para entender la dinámica de conservación y alteración ecológica. Esta metodología no solo mejora la precisión en la representación de las tendencias de cambio, sino que también facilita la identificación de áreas críticas de transición que de otro modo quedarían ocultas.

La predicción de los estados del ciclo adaptativo de la REST fue buena (Figura 3). Para cada clase de uso de suelo se obtuvieron valores superiores al 60% de precisión y se tuvo la mayor presión para la fase  $\alpha$  (pastizal inducido). En cambio, los sitios  $K$  tuvieron la menor precisión. El valor del análisis global para el modelo de precisión fue del 73.9 % (Tabla 3), lo que se considera aceptable (Mohamed y El-Raey, 2018). Con respecto a la precisión de la ubicación espacial de cada categoría el estadístico Kappa de localización ( $K_{\text{location}}$ ) fue de 0.7940, que, de acuerdo a Viera y Garrett (2005), se interpreta como una concordancia sustancial entre los dos mapas con respecto de la ubicación de los píxeles por categoría en el paisaje.

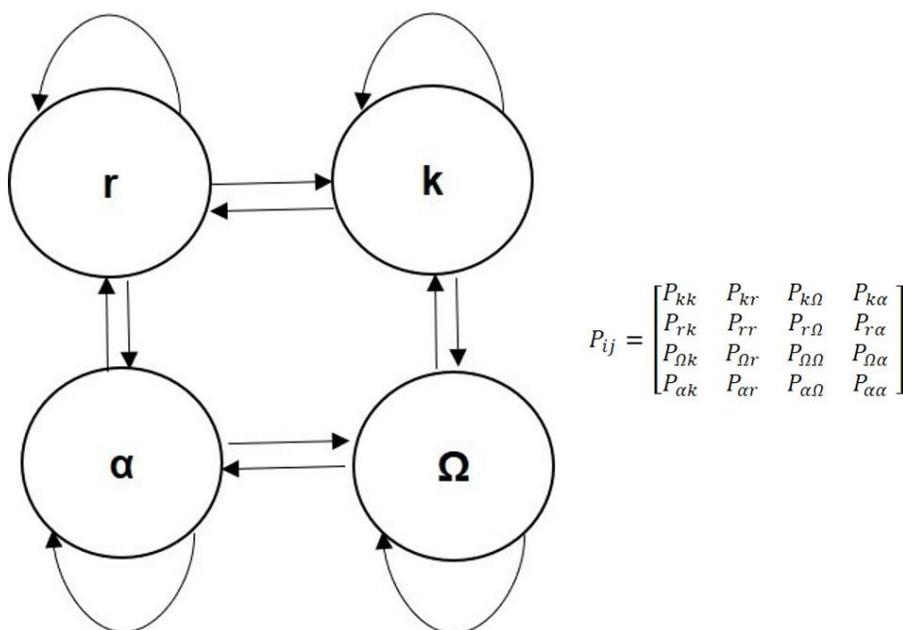


Figura 2. Diagrama y matriz de transición. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Porcentaje de precisión del modelo con variables independientes forzadas a ser constantes.

Modelo	Precisión (%)	Medida de habilidad	Orden de influencia
Todas las variables	82.11	0.6422	N/A
Var. 1 Distancia a caminos ( <i>constant</i> )	82.11	0.6422	4
Var. 2 Pendiente ( <i>constant</i> )	82.10	0.6419	3
Var. 3 Modelo digital de elevación ( <i>constant</i> )	81.10	0.6220	2
Var. 4 Distancia a zonas agrícolas y urbanas ( <i>constant</i> )	82.11	0.6422	5*
Var. 5 Transición K a Ω de 9 <sup>no</sup> orden polinomial ( <i>constant</i> )	79.75	0.5949	1**

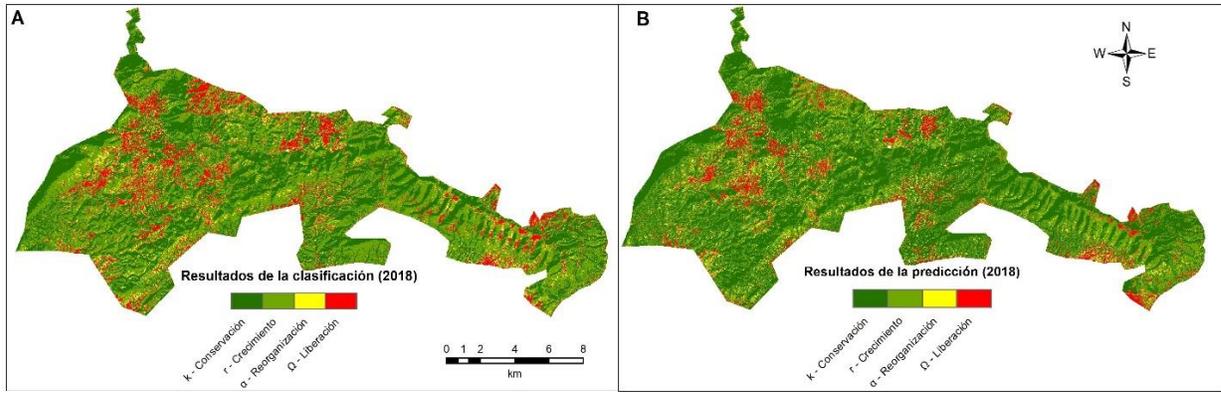
Referencia: \*Variable menos influyente, \*\* Variable más influyente

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del módulo *Land Change Modeler* de *TerrSet*

### Transición entre los ciclos adaptativos

El modelo estima una probabilidad del 0.70 de que las áreas clasificadas en la fase k no cambien a otra durante el periodo de tiempo analizado (Tabla 4). Esta probabilidad es relativamente alta en comparación con las transiciones de las otras tres fases y favorece el mantenimiento y conservación de los ecosistemas con vegetación primaria. Según el modelo, la desaparición de la cobertura de conservación por vegetación secundaria tiene una probabilidad del 0.27. Este resultado indica la posibilidad de que el ecosistema se encuentre en un proceso de restauración (fase r) después de un impacto, ya sea natural o antropogénico.

La mayor probabilidad de ganancia de superficie de conservación en la reserva se presenta en la transición r-k, la cual ocurre cuando el desarrollo de la vegetación secundaria alcanza su estado clímax. Esta transición tiene una probabilidad de ocurrencia del 0.19, lo cual es relativamente bajo debido a que, en el caso de la vegetación secundaria, es posible que no transite a la fase k debido a las actividades antropogénicas. Contrariamente a lo esperado, las áreas de conservación (k) tienen una menor probabilidad de transformarse en zonas agrícolas o urbanas (Ω) y pastizales (α), respectivamente. En cambio, las áreas de vegetación secundaria presentan la mayor probabilidad de transición a un régimen antrópico (Ω), quizá debido a su cercanía con los asentamientos urbanos y las zonas agrícolas.



**Figura 3.** Comparación del mapa derivado de imágenes de satélite y el mapa derivado con el modelo. **Referencias:** (a) mapa de clasificación de los ciclos adaptativos de la reserva para 2018, (b) mapa generado por el modelo de predicción. Fuente: elaboración propia basado en el resultado del módulo *Land Change Modeller* de *TerrSet*.

**Tabla 3. Evaluación de la precisión del modelo de predicción para el año 2018.**

Clases de uso de suelo	2018 Actual (km <sup>2</sup> )	2018 Estimado (km <sup>2</sup> )	Diferencia (km <sup>2</sup> )	Diferencia (%)	Precisión (%)
k-conservación	213.289	288.5436	75.2546	35.28	64.7
r - crecimiento	269.329	218.1672	-51.1618	-19.00	81.0
α - reorganización	35.5995	32.4468	-3.1527	-8.86	91.1
Ω - Destrucción	62.4564	41.5008	-20.9556	-33.55	66.4
Total	580.6739	580.6584	-0.0155	-26.12	73.9

Fuente: elaboración propia

**Tabla 4. Matriz de probabilidad de transición para el año 2018 calculada a partir de los mapas de uso de suelo y tipos de vegetación de 1999 y 2009.**

Clases de uso de suelo	k	r	Ω	A
k	0.7075	0.2788	0.0111	0.0025
r	0.1962	0.5671	0.1293	0.1073
Ω	0.0686	0.5532	0.1660	0.2121
α	0.0215	0.1851	0.0653	0.7281

Fuente: elaboración con datos del módulo de *Land Change Modeling* (LCM) en *TerrSet*.

Para los procesos de restauración de la reserva, los sitios clasificados en la fase de reorganización (α) son clave, ya que presentan estructuras físicas de vegetación residual y potencial de crecimiento, acumulación de recursos y almacenamiento posterior (Allen *et al.*, 2014). Sin embargo, esta fase puede presentar dos escenarios: uno predecible y otro impredecible. El primero ocurre cuando el sistema mantiene su estructura y condiciones originales, por lo tanto, el régimen original prevalecerá y seguirá una trayectoria predecible, es decir, transitará de pastizal a vegetación secundaria y luego a primaria, con una probabilidad de 0.18 y 0.02, respectivamente. El segundo escenario se presenta cuando se incorporan nuevos procesos, estructuras y especies, lo que lleva a que el sistema sea diferente del original. En este caso, la trayectoria puede ser bastante impredecible y surgen

oportunidades para el surgimiento de ecosistemas nuevos. La probabilidad estimada para la reserva en este escenario fue de 0.06.

Las condiciones socioecológicas de la reserva condicionan su cambio de estado. La probabilidad de cambio de ecosistema conservado a zona agrícola o urbana se mantiene relativamente bajo, sin embargo, dependerá de las mismas restricciones que en el plan de manejo del ANP se hayan establecido. En este sentido, las probabilidades de transición contribuyen a identificar los sitios más vulnerables al cambio, donde se deberá tener especial atención para identificar los componentes y procesos socioecológicos que influyen en la conservación de sus recursos naturales y servicios ambientales asociados.

**Tendencias de cambio de las fases del ciclo adaptativo**

De acuerdo a los cambios estimados de la superficie transformada en la REST para el periodo 1999 a 2018, y proyectados para el periodo 2030 a 2100, se observa una disminución a largo plazo de su área de conservación, ya que se registró una tasa de cambio negativa. A excepción del periodo 2018-2030, donde el modelo pronostica un aumento de 61 km<sup>2</sup>, para los años posteriores se proyectan tasas de cambio negativas. Para las áreas clasificadas como crecimiento (vegetación secundaria), reorganización (pastizal) y omega (zona agrícola y urbana), se estima un aumento en su superficie (Tabla 5). Todo esto revela la presión que existe en las zonas de conservación debido a la expansión de la frontera agrícola y el desarrollo urbano en la región, tendencia observada en otras ANP de México (Mendoza-Ponce *et al.*, 2019).

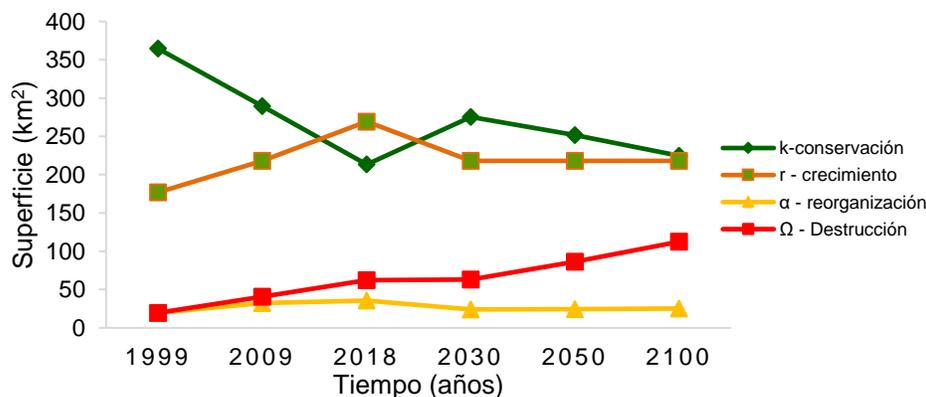
En el análisis de las tendencias de cambio de superficie en la reserva, se observa una correlación negativa ( $r =$

$-0.9983$ ) entre las áreas de conservación ( $k$ ) y crecimiento ( $r$ ) para el periodo 1999-2018 (Figura 4). Los patrones de cambio en las zonas clasificadas como reorganización ( $\alpha$ ) y liberación ( $\Omega$ ) muestran una correlación positiva ( $r = 0.9418$ ) con las variables, lo que indica que las actividades antropogénicas tienen un mayor impacto en estas áreas. En la REST, la agricultura de temporal es predominante, lo que implica ciclos agrícolas que permiten el descanso de la tierra. Es en esta fase de descanso cuando se presenta el proceso de reorganización del ecosistema en forma de pastizal. Si las condiciones y patrones de cambio actuales persisten, se espera que la vegetación primaria se recupere en 2030. Sin embargo, después de esa fecha, la tendencia será a la baja debido al crecimiento urbano y la expansión de la agricultura (Figura 5). La tendencia de cambio de uso del suelo en la REST es diferente a la observada en áreas donde se tienen asentamientos humanos altamente poblados (Mohamed y El-Raey, 2018).

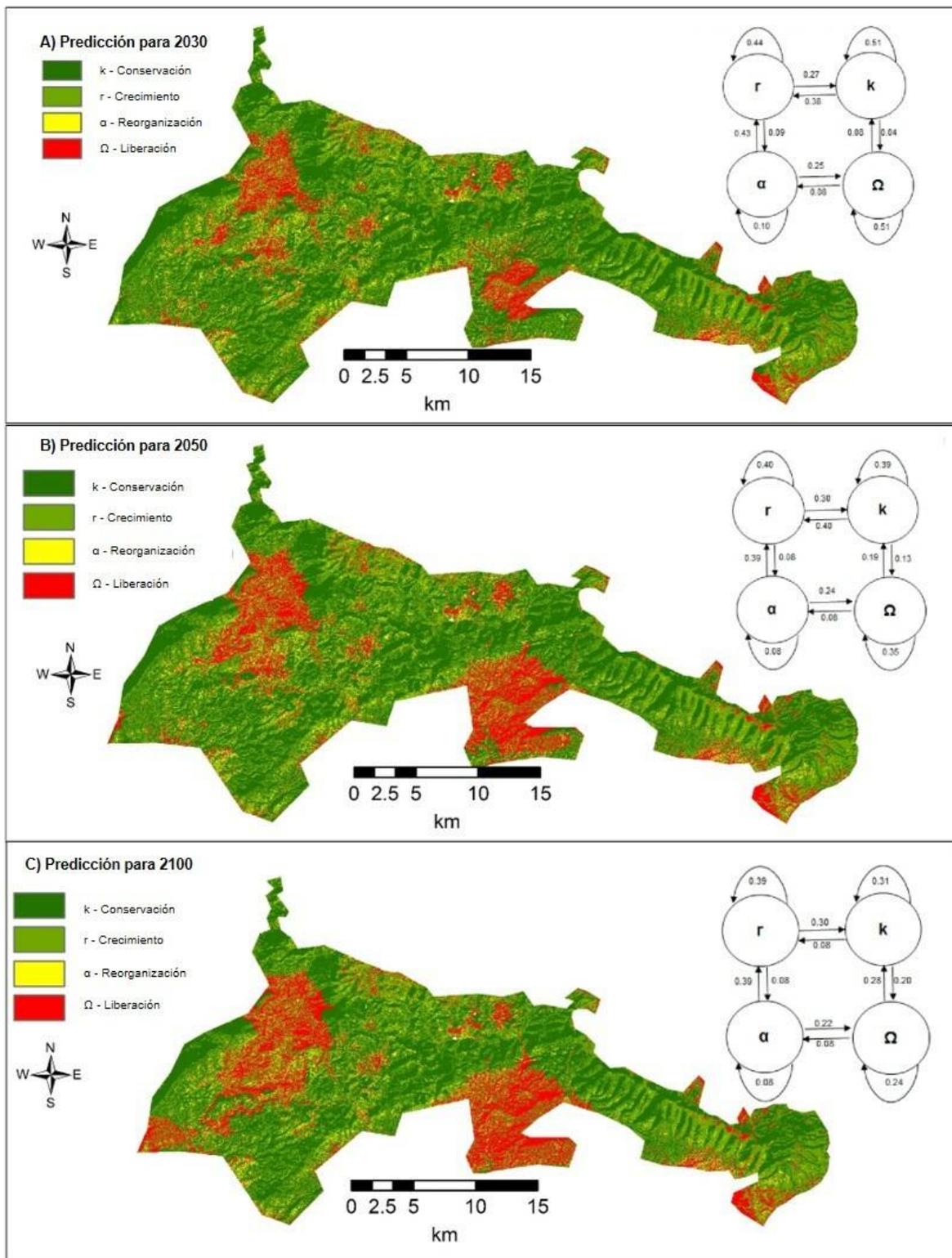
**Tabla 5. Tendencias en los cambios de superficie de 1999 a 2018 en la REST.**

Fases del ciclo adaptativo	Año y superficie (km <sup>2</sup> )						Tasa de cambio				
	1999	2009	2018	2030	2050	2100	1999 - 2009	2009 - 2018	2018- 2030	2030 - 2050	2050 - 2100
<b>k - conservación</b>	364.47	289.27	213.3	275.25	251.62	224.79	-7.52	-7.6	6.2	-2.36	-2.68
<b>r - crecimiento</b>	176.89	218.18	269.3	218.17	218.17	218.17	4.13	5.12	-5.12	0.00	0.00
<b><math>\alpha</math> - reorganización</b>	19.67	32.45	35.6	24.08	24.35	25.21	1.28	0.32	-1.15	0.03	0.09
<b><math>\Omega</math> - Destrucción</b>	19.63	40.78	62.46	63.17	86.53	112.49	2.11	2.17	0.07	2.34	2.6

**Fuente:** elaboración propia con datos de INEGI (1997, 2009, 2016) y el módulo LCM



**Figura 4.** Tendencias de cambio de superficie en la REST para el periodo 1999 – 2018 y proyección para 2030, 2050 y 2100. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.** Escenarios proyectados de acuerdo a las tendencias de cambio espacial en la REST para 2030, 2050 y 2100. Fuente: elaboración propia.

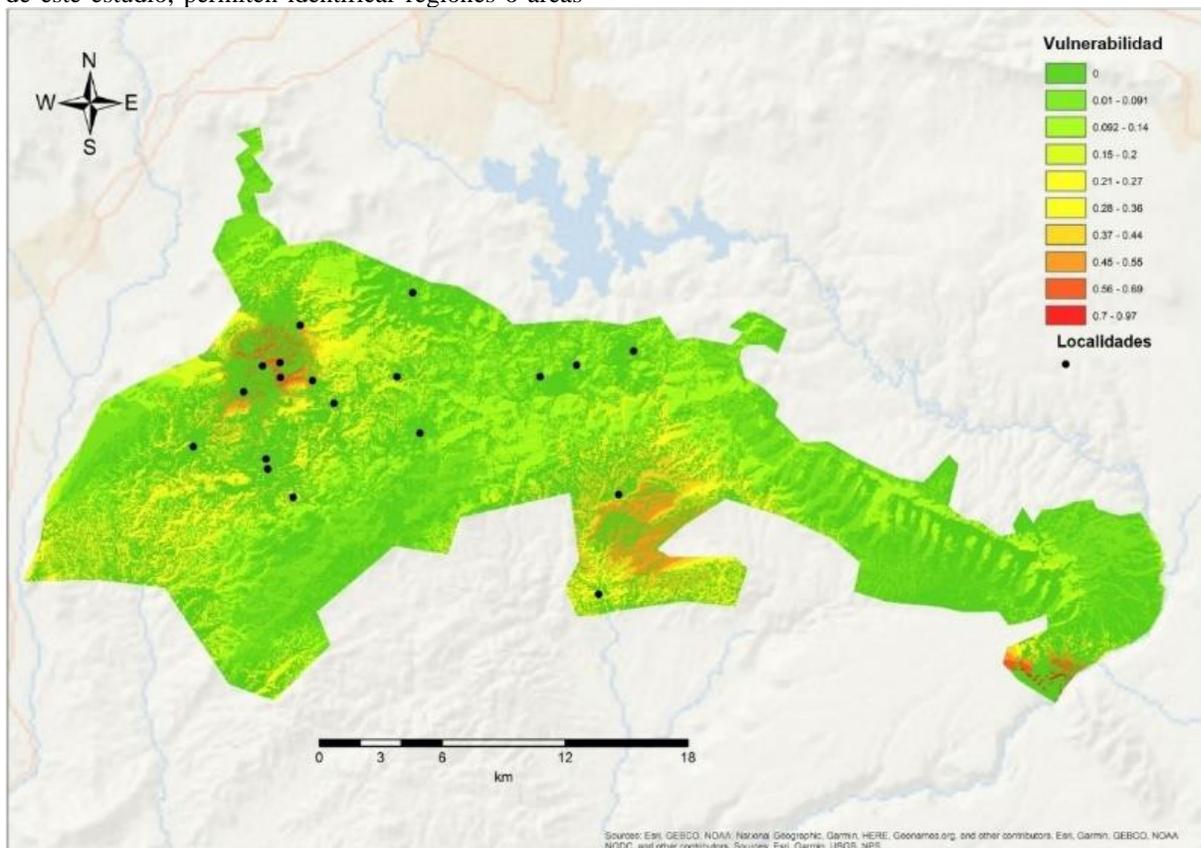
## Vulnerabilidad

Las áreas más vulnerables al deterioro ecológico se localizan en tres subregiones del territorio de la reserva. Estos sitios se ubican al oeste, centro y este de la reserva, y se relacionan con la ubicación de los asentamientos humanos en la reserva y las actividades agropecuarias (Figura 6).

En particular, la alta vulnerabilidad observada en la zona este de la reserva se debe a su proximidad a las localidades de Atlalpan, Tempexquixtla y Copalcotitla que, aunque físicamente se encuentran fuera de los límites de la reserva, su área comunal se extiende dentro de ella. Esta característica geográfica conlleva ciertas condiciones que incrementan la vulnerabilidad, incluyendo caminos accesibles que facilitan la entrada a áreas comunes. En estas zonas de uso común, la regulación, sanciones y vigilancia son menos estrictas, lo que permite un mayor aprovechamiento de los recursos naturales. Las predicciones de estudio de la dinámica de cambio de los usos de la tierra, como los de este estudio, permiten identificar regiones o áreas

prioritarias para el manejo sustentable y la conservación de ecosistemas (Colman *et al.*, 2022).

Este estudio, a través de su modelación, revela perspectivas valiosas sobre la dinámica de cambio de uso del suelo, subrayando su importancia para la planificación estratégica en conservación de ecosistemas y manejo sustentable. Las herramientas utilizadas no solo permiten identificar áreas prioritarias para intervención, considerando los aspectos socioecológicos, sino que también ofrecen una forma eficiente y económica de detectar sitios vulnerables a nivel regional. Esta capacidad es crucial ante la limitación de recursos de las instituciones encargadas, permitiendo dirigir esfuerzos de conservación de manera más efectiva hacia áreas críticas. Sin embargo, a pesar de su utilidad, es vital reconocer las limitaciones de estas herramientas, como la necesidad de actualizaciones de datos y adaptación a condiciones específicas y necesidades de cada área protegida, para abordar la degradación de ecosistemas y sus causas subyacentes de forma proactiva.



**Figura 6.** Mapa de vulnerabilidad ecológica de la REST. **Referencia:** los valores de vulnerabilidad indican los sitios con mayor probabilidad de transitar de vegetación primaria a zonas urbanas y agrícolas. **Fuente:** elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En la Reserva Estatal Sierra del Tentzo, el análisis de Panarquía y geoespacial de la dinámica espacio-temporal de la cobertura vegetal indicó que en el territorio de la reserva se tiene actualmente cambios en la condición ecológica, con mayor probabilidad de una transición (cambio) de fase  $k - r$  (de un estado de conservación a un estado de crecimiento). El cambio implica la transformación de áreas de mayor con vegetación primaria, donde se tiene mayor cantidad y calidad de recursos forestales y faunísticos, que la población local y externa aprovecha, a áreas con vegetación secundaria, ecológicamente deterioradas.

Las áreas de la Reserva Estatal Sierra del Tentzo más vulnerables a la pérdida de ecosistemas conservados a ecosistemas deteriorados se localizan en la cercanía de los asentamientos humanos. Por lo que el diseño y ejecución de estrategias de conservación y aprovechamiento de los ecosistemas, por parte de los usuarios y tomadores de decisiones, debe dar un énfasis especial a la atención de éstas áreas.

**Funding.** This research was funded in part by the Colegio de Postgraduados through Student Academic Activities (AAE) support funds

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest

**Compliance with ethical standards.** Not applicable due to the nature of the study (modeling study)

**Data availability.** No datasets were generated. The satellite images used are available on the EarthExplorer server.

**Author contribution statement (CRediT).** **M. Neri-Suárez:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing draft, Software, Investigation. **A. Bustamante-González:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Validation, Supervision, Writing review and editing, Funding acquisition, Project administration. **S. Vargas-López:** Formal analysis, Methodology, Writing review and editing. **B. Ramírez-Valverde:** Methodology, Software, Writing review and editing. **J.L. Jaramillo-Villanueva:** Formal analysis, Writing review and editing. **F.J. Escobedo:** Formal analysis, Writing review and editing.

## REFERENCES

Allen, C. R., Angeler, D.G., Garmestani, A.S., Gunderson, L.H. and Holling, C.S., 2014. Panarchy: theory and application. *Ecosystems*, 17(4), pp. 578–89. <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9744-2>

- Barborak, J.R., 2021. 30 % Para 2030: América Latina y La Nueva meta global para sus sistemas de áreas protegidas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), pp. 349-359. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.19>
- Carreiro, M.M. and Zipperer, W.C., 2011. Co-Adapting societal and ecological interactions following large disturbances in urban park woodlands. *Austral Ecology*, 36(8), pp. 904–15. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2010.02237.x>
- Colman, C.B., Guerra, A., Roque F.O., Rosa, M.D. and Sanches P.T., 2022. Identifying priority regions and territorial planning strategies for conserving native vegetation in the Cerrado (Brazil) under different scenarios of land Use changes. *Science of the Total Environment*, 807, pp. 150998. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150998>
- Dakos, V., Carpenter S. R., Van Nes, E.H. and Scheffer, M., 2015. Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1659), pp.20130263. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0263>
- De la Mora-De la Mora, G. and López-Miguel, C., 2022. Challenges in the management of urban natural protected area systems and the conservation of ecosystem services in Guadalajara and Monterrey, Mexico. *Land Use Policy*, 114, pp.105987. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105987>
- Downey, S.S., 2010. Can properties of labor-exchange networks explain the resilience of swidden agriculture?. *Ecology and Society*, 15(4), pp.15. <http://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art15/>
- Eastman, J.R., 2016. *TerrSet: Geospatial Monitoring and Modelling System. Tutorial*. Worcester, MA. <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/TerrSet-Tutorial.pdf>
- Filatova, T.J., Polhill, G and, Van Ewijk, S., 2016. Regime shifts in coupled socio-environmental systems: review of modelling challenges and approaches. *Environmental Modelling and Software*, 75, pp. 333–47. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.04.003>
- Gupta, R., and Sharma, L.K., 2020. Efficacy of Spatial

- Land Change Modeler as a forecasting indicator for anthropogenic change dynamics over five decades: A case study of Shoolpaneshwar Wildlife Sanctuary, Gujarat, India. *Ecological Indicators*, 112, pp. 106171. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106171>
- Halefom, A., Teshome, A., Sisay, E., Khare, D., Dananto, M., Singh, L. and Tadesse, D., 2018. Applications of remote sensing and GIS in land use/land cover change detection: a case study of Woreta Zuria watershed, Ethiopia. *Applied Research Journal of Geographic Information System*, 1(1), pp. 1–9. <https://skies.education/applications-of-remote-sensing-and-gis-in-land-use-land-cover-change-detection-a-case-study-of-woreta-zuria-watershed-ethiopia/>
- Hernández-Cavazos, M.C., Sandoval-García, R., Molina-Guerra, V.M. and Alanís-Rodríguez, E., 2023. Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo en el municipio de Linares, Nuevo León. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(2), pp. e3743. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3743>
- Iacono, M., Levinson, D., El-Geneidy A. and Wasfi, R., 2015. A Markov chain model of land use change. *Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 8(3), pp. 263-276. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/2985>
- INEGI, 1997. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000, Serie I. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250kcs1agw.html>
- INEGI, 2009. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000, Serie IV. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks4gw.html>
- INEGI, 2016. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía{ <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s6gw.html>
- Lu, X., Yuyu, Z., Yaling, L. and Yannick, L.P., 2017. The role of protected areas in land use/land cover change and the carbon cycle in the conterminous United States. *Global Change Biology*, 24(2), pp. 617–30. <https://doi.org/10.1111/gcb.13816>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R.O., Galicia, L. and Kraxner, F., 2019. Identifying hotspots of land use cover change under socioeconomic and climate change scenarios in Mexico. *Ambio*, 48, pp. 336–349. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1085-0>
- Mohamed, S.A. and El-Raey, M., 2018. Assessment, prediction and future simulation of land cover dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Assiut University Bulletin for Environmental Researches*, 21(2), pp. 37–49. <https://doi.org/10.21608/auber.2018.133172>
- Pérez Hernández, M. J., Hernández Acosta, E., Sánchez Jiménez, R., González Gervacio, C. and Madrigal Reyes, S., 2021. Dinámica de cambios de uso de suelo y vegetación por actividades antropogénicas en Zaachila, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(66), pp.26-45. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.894>
- Sahagún-Sánchez, F. J. and Reyes-Hernández, H., 2018. Impactos por cambio de uso de suelo en las áreas naturales protegidas de la región central de la Sierra Madre Oriental, México. *CienciaUAT*, 12(2), 6-21. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v12i2.831>
- SDRSO, 2011. Polígono del área natural protegida “Parque Estatal Sierra Del Tentzo”. Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial. [https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/imagenes/cibiogem/sistema\\_nacional/documentos/A-NPL/Pue/ANP-Sierra-del-Tentzo.pdf](https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/imagenes/cibiogem/sistema_nacional/documentos/A-NPL/Pue/ANP-Sierra-del-Tentzo.pdf)
- Subedi, P., Subedi, K. and Thapa, B., 2013. Application of a hybrid cellular automaton – Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: a case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 1 (6), pp. 126-132. <https://doi.org/10.12691/aees-1-6-5>
- Viera, A.J. and Garrett, J.M., 2005. Understanding interobserver agreement: the Kappa statistic. *Family Medicine*, 37(5), pp. 360-363. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15883903/>
- Warner, K., 2011. Environmental change and migration: methodological considerations from ground-breaking global survey. *Population and Environment*, 33(1), pp. 3–27. <https://doi.org/10.1007/s11111-011-0150-4>