

PROGRAMA
DE GESTIÓN DE
CALIDAD DEL AIRE
Y DE ACCIÓN ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO
ESTADO DE PUEBLA
2021-2030

**VULNERABILIDAD DEL SECTOR FORESTAL ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

proaire
PEACC



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



INECC
INSTITUTO NACIONAL
DE ECOLOGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO

CAVME
COMISIÓN AMBIENTAL
DE LA MEGALÓPOLIS



**Gobierno
de Puebla**

Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490
para Apoyar los Programas, Proyectos
y Acciones Ambientales de la Megalópolis

PROGRAMA DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL AIRE Y DE ACCIÓN ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO 2021-2030 DEL ESTADO DE PUEBLA

"Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490
para Apoyar los Programas, Proyectos
y Acciones Ambientales de la Megalópolis"

Este documento fue desarrollado por:
AMBIENS Consultoría, Sustentabilidad y Gestión Climática SA de CV para la
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE, DESARROLLO SUSTENTABLE Y
ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL GOBIERNO DEL ESTADO DE PUEBLA
Bajo el proyecto con número de contrato
GESAL-140-027/2022



Secretaría de
Medio Ambiente,
Desarrollo Sustentable y
Ordenamiento Territorial
Gobierno de Puebla

Autores del documento:

Mtra. María Luisa Cuevas Fernández

Dra. Alma Mendoza Ponce

Biol. Saúl Castañeda Contreras

Con la colaboración de:

Ing. Víctor Javier Gutiérrez Avedoy

Mat. Jorge Martínez Castillejos

Este documento se elaboró para la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno del Estado de Puebla con recursos del Proyecto Financiado por el Fideicomiso 1490 “Para Apoyar los Programas, Proyectos y Acciones Ambientales de la Megalópolis”.

Citar el documento como: Vulnerabilidad del Sector Forestal ante el Cambio Climático, 2023. Programa de Gestión de Calidad del Aire y de Acción ante el Cambio Climático, 2021-2030. SMADSOT – CAME – SEMARNAT.

La reproducción total o parcial de este documento podrá efectuarse mediante autorización expresa de la fuente y dándole el crédito correspondiente.

© 2023

PROGRAMA
DE GESTIÓN DE **CALIDAD DEL AIRE**
Y DE ACCIÓN ANTE EL **CAMBIO CLIMÁTICO**
ESTADO DE PUEBLA
2021-2030

**VULNERABILIDAD DEL SECTOR FORESTAL ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

CONTENIDO

VULNERABILIDAD DEL SECTOR FORESTAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO; COMUNIDADES VEGETALES	6
Introducción.....	6
Métodos.....	15
Sensibilidad	17
Criterio 1. Tamaño del parche.....	18
Criterio 2. Rango altitudinal del parche	18
Criterio 3. Índice de proximidad.....	18
Criterio 4. Índice de forma.....	19
Criterio 5. Riesgo de incendios	19
Criterio 6. Densidad de carreteras.....	20
Exposición	20
Capacidad adaptativa	23
Vulnerabilidad	23
Resultados.....	27
Recomendaciones.....	42
Referencias	43

Figuras

Figura 1. Estadísticas estatales de producción forestal maderable 2018.....	10
Figura 2. Porcentaje de variación de la Producción Forestal No Maderable en México 2017-2018.	11
Figura 3. Ejes estratégicos y líneas de acción de la Estrategia Estatal de Cambio Climático que consideran aspectos del sector forestal.....	13
Figura 4. Estrategias y líneas de acción de la Temática 2. Adaptación al cambio climático de las zonas rurales.....	14
Figura 5. Resumen gráfico del proceso para calcular la vulnerabilidad.	25
Figura 6. Zonas de pérdida de idoneidad climática integrada de acuerdo con las 8 proyecciones de cambio climático para cada comunidad vegetal.	26
Figura 7. Proporción de la superficie de las comunidades vegetales por clase de vulnerabilidad y proyección.....	28

Tablas

Tabla 1. Superficie forestal arbolada y no arbolada del estado de Puebla.....	6
Tabla 2. Certificación de la producción forestal del estado de Puebla.	10
Tabla 3. Variables consideradas para calcular la vulnerabilidad del sector forestal.	16
Tabla 4. Superficie y porcentaje de las comunidades vegetales por clase de vulnerabilidad.....	39
Tabla 5. Superficie de las comunidades vegetales por región y clase de vulnerabilidad.....	40

VULNERABILIDAD DEL SECTOR FORESTAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO; COMUNIDADES VEGETALES

INTRODUCCIÓN

El estado de Puebla tiene una extensión de 3,431608.7 hectáreas, de las cuales 45.8%, es decir 1,573,464.1 ha, son forestales (CONAFOR, 2022).

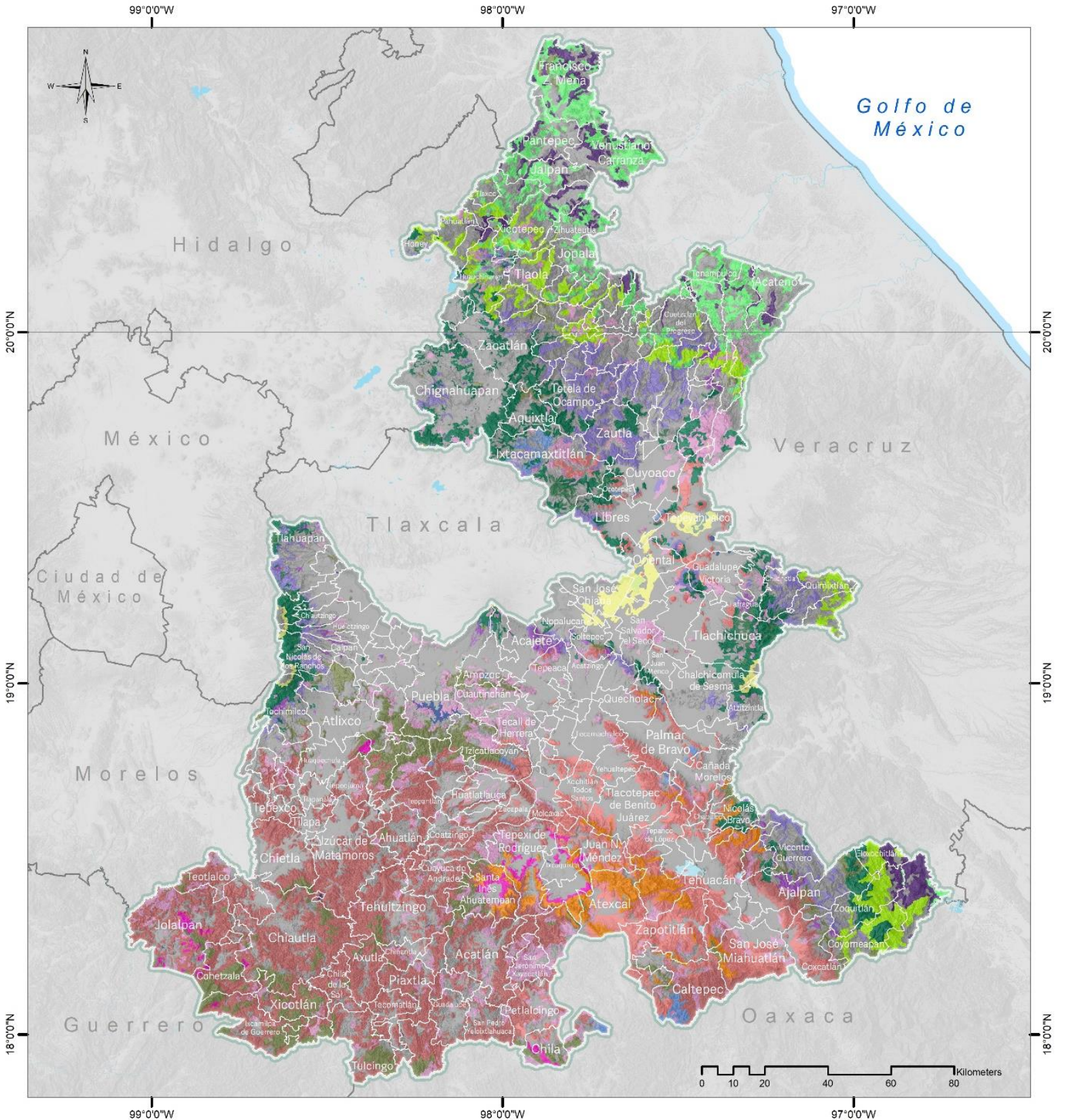
Los factores topográficos y climáticos han sido determinantes de la gran variedad de ambientes que existen en el estado de Puebla. En sus diferentes gradientes altitudinales es posible encontrar gran variedad de especies forestales arbóreas y no arbóreas. Un ejemplo de lo anterior es la diversidad del género *Quercus* presente en el Estado, que lo coloca entre los cinco más ricos en este género, después de Nuevo León, Veracruz, Oaxaca y Jalisco. De igual forma, de las 54 especies del género *Pinus* reportadas en México, 17 crecen en el estado de Puebla (CONABIO, 2011).

De acuerdo con el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) 2020, elaborado por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), la superficie forestal estatal se encuentra distribuida, principalmente en tres grandes grupos: bosques, selvas y matorrales (Tabla 1).

TABLA 1. SUPERFICIE FORESTAL ARBOLADA Y NO ARBOLADA DEL ESTADO DE PUEBLA.

ECOSISTEMA	ha	%
Bosque	620,601.1	39.4
Selva	622,179.8	39.5
Matorral xerófilo	280,642.3	17.8
Otras asociaciones*	50,130.98	3.19

Fuente: CONAFOR, 2020.



Simbología

Límite municipal	Bosque de oyamel	Mezquital
Cuerpos de agua	Coníferas	Otras asociaciones
Límite estatal	Coníferas y latifoliadas	Pastizal cultivado
Límite del Estado de Puebla	Bosque de tascote	Otras áreas forestales
Uso Suelo	Bosque mesófilo de montaña	Pastizal inducido
Tipo	Zona semiárida, Chaparral	Selva alta y mediana
Bosque cultivado	Cuerpo de agua	Selva baja
Latifoliadas	Zonas áridas	Tular
Bosque de encino-pino		Otros



M012. Uso de Suelo y Vegetación

Fuente: Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI. Elaboración propia con información de Principales Indicadores forestales para el Estado de Puebla (Ciclo 2015-2020)

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

El resto de la superficie estatal está ocupada por agricultura de temporal (~1,200,000 ha), agricultura de riego (~282,305 ha), pastizales cultivados e inducidos (~272,851 ha), asentamientos humanos, cuerpos de agua, áreas desprovistas de vegetación, entre otros (CONAFOR, 2022)¹.

Los bosques juegan un papel crucial en la regulación del clima, debido a la capacidad que tienen para absorber y fijar el CO₂. Alrededor de 191,483.32 Gg CO₂e fueron absorbidas en 2019 por las tierras forestales de México (Gobierno de México et al., 2022), su pérdida por deforestación, degradación o incendios favorece las emisiones de Gases de Efecto invernadero (GEI), comprometiendo la calidad del aire, así como los acuerdos nacionales, estatales y municipales en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. De acuerdo con datos del propio estado, Puebla ocupa el sexto lugar nacional en deforestación (LX Legislatura del Honorable Congreso del Estado de Puebla, 2019).

En el territorio poblano encontramos bosques de coníferas en las regiones montañosas, donde crecen principalmente, *Pinus hartwegii*, *P. rudis*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. oaxacana*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla*, *Abies religiosa*, *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus Patula* los dos últimos altamente valorados para la producción de árboles de navidad y el manejo forestal. Los juníferos, coníferas de madera densa, son utilizados para hacer muebles. Hoy en día, el avance de la frontera agropecuaria y urbana son la principal amenaza de estos bosques (CONAFOR, 2020; CONABIO, 2011).

El bosque mesófilo de montaña, localizado al norte y sureste del Estado, es otro ecosistema altamente diverso y amenazado, se caracteriza por la presencia de *Liquidambar styraciflua*, asociado con otras especies como *Quercus* y *Pinus*. Los principales servicios ambientales que prestan son: captura de agua y de carbono, conservación de la biodiversidad y del suelo, filtración de contaminantes del aire, suelo y agua, regulación del clima y mantenimiento de ciclos minerales de gases y agua (CONABIO, 2022).

En los bosques latifoliados del estado de Puebla también abundan especies de alto valor ambiental y económico. En las selvas perennifolias se pueden encontrar especies comerciales como *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla* y *Brosimum alicastrum*, mientras que en las caducifolias abundan especies del género *Bursera*, Estos ecosistemas proveen madera,

¹ Base de datos superficie forestal, obtenida de CONAFOR (2022). Datos del inventario. Principales Indicadores Forestales ciclo-2015-2020. Recuperado de: <https://snmf.cnf.gob.mx/principalesindicadoresforestalesciclo-2015-2020>.

leña y productos no maderables. Su principal amenaza es el pastoreo y los incendios, ya que no están adaptados a condiciones de sequía y aridez (CONABIO, 2022), por lo que CONAFOR los tiene clasificados como altamente susceptibles al fuego, factor determinante de vulnerabilidad ante las condiciones cambiantes del clima.

En las faldas de las serranías, entre la transición de los bosques templados con los matorrales, se pueden observar bosques de pino piñoneros dominados por *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*, esta especie tiene un alto valor ecológico por su resistencia a condiciones climáticas extremas, por lo que es ideal para reforestar zonas áridas, semiáridas o zonas muy erosionadas. Aunado a lo anterior, la comercialización de su semilla, o “piñón”, la hace una especie de alto valor comercial y cultural (CONAFOR-CONABIO, s/f).

La superficie de matorrales, localizados en el Valle de Tehuacán y la Sierra Negra, ocupa 8% del Estado. El matorral espinoso del Valle de Tehuacán forma un ecosistema único por la presencia de cactus columnares junto con nopales, acacias, mezquites y agaves, estos últimos de gran importancia económica para la región.

Debido a sus características fisiográficas, los matorrales están siendo fuertemente afectados por el pastoreo. Al ser un ecosistema sumamente frágil, esta actividad ha alterado su estructura, reduciendo su cobertura de manera importante (CONABIO, 2022).

De acuerdo con datos oficiales, 488 ejidos y comunidades con al menos 200 hectáreas viven de los bosques, selvas y matorrales de la entidad; la población proveniente de pueblos originarios que habita en ecosistemas forestales de Puebla es de 339,356 hab., lo que representa 55% del total estatal (COESPO, 2022) y 9.9% del total nacional (CONAFOR, 2019).

A pesar de la vasta superficie forestal, la actividad silvícola nunca ha sido la principal actividad económica del Estado, el cual cuenta con ocho Unidades de Manejo Forestal (UMA) (CONAFOR, 2019), de las cuales dependen alrededor de 300 mil personas. La participación de Puebla en la producción forestal nacional es reducida, menos del 4%. El principal género aprovechado, *Pinus*, se utiliza para la producción de escuadría (Figura 1).

Los municipios con mayores volúmenes de productos maderables son Chignahuapan, Tetela de Ocampo, Vicente Guerrero, Zacatlán y Huauchinango (CONAFOR, 2019). Dentro de las actividades que se promueven desde los

diferentes órdenes de gobierno para asegurar un manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos forestales, está el impulso a la certificación que avale el desarrollo de buenas prácticas. El estado de Puebla tiene 45 predios certificados, con una superficie total de alrededor de 79,000 ha (Tabla 2).

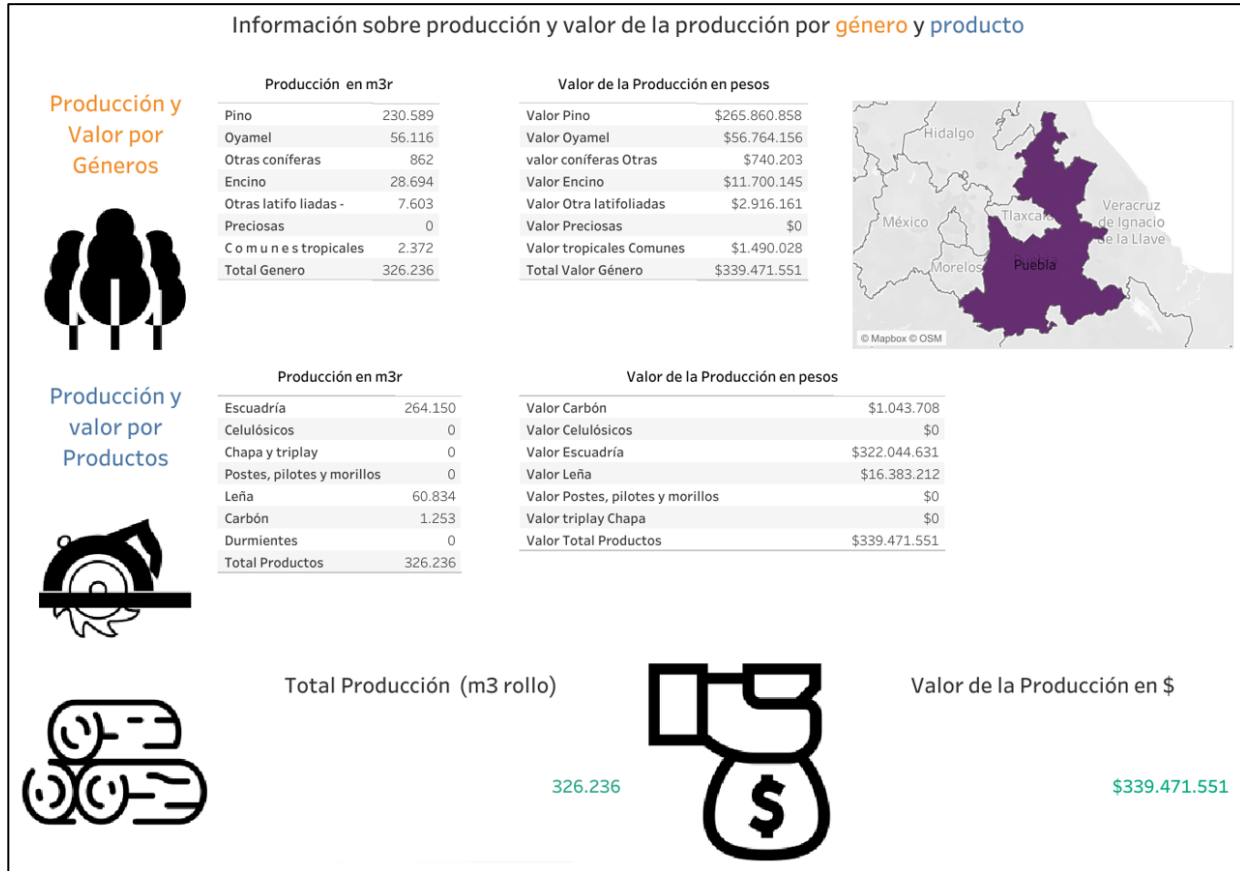


FIGURA 1. ESTADÍSTICAS ESTATALES DE PRODUCCIÓN FORESTAL MADERABLE 2018.

Fuente: CONAFOR (2022). Anuarios Estadísticos Forestales

TABLA 2. CERTIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL DEL ESTADO DE PUEBLA.

CERTIFICADO	NO. DE PREDIOS	SUPERFICIE (HA)	VOLUMEN AUTORIZADO M ³ R.T.A (ROLLO TOTAL ÁRBOL)	VOLUMEN PROMEDIO ANUAL M ³ R.T.A (ROLLO TOTAL ÁRBOL)
Forest Stewardship Council® (FSC®)	21	21,889.3	1,117,086.07	115
Auditoría Técnica Preventiva (ATP)	10	49,996.7	251,544.6	25154.47
Norma NMX-AA-143-SCFI-2015	14	80,59.15	348,287.93	37605.01
Total	45	79,945.15	1,716,918.6	62874.48

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAFOR, 2022b

Contrario a lo que sucede con la producción forestal maderable, la cual disminuyó 9% entre 2017 y 2018, según datos de CONAFOR², la producción de productos forestales no maderables ha incrementado (Figura 2). Artículos manufacturados a partir del ixtle, fibra natural extraídas de la yuca (*Yucca carnerosana*), como bolsas, huaraches, tapetes, manteles, estropajos, escobetas, cepillos, costales, ayates y artesanías han encontrado nuevas cadenas de comercialización en años recientes. Si bien esta producción no iguala la derrama económica que genera la producción forestal maderable, emplea a un sector de la población rural muy vulnerable.

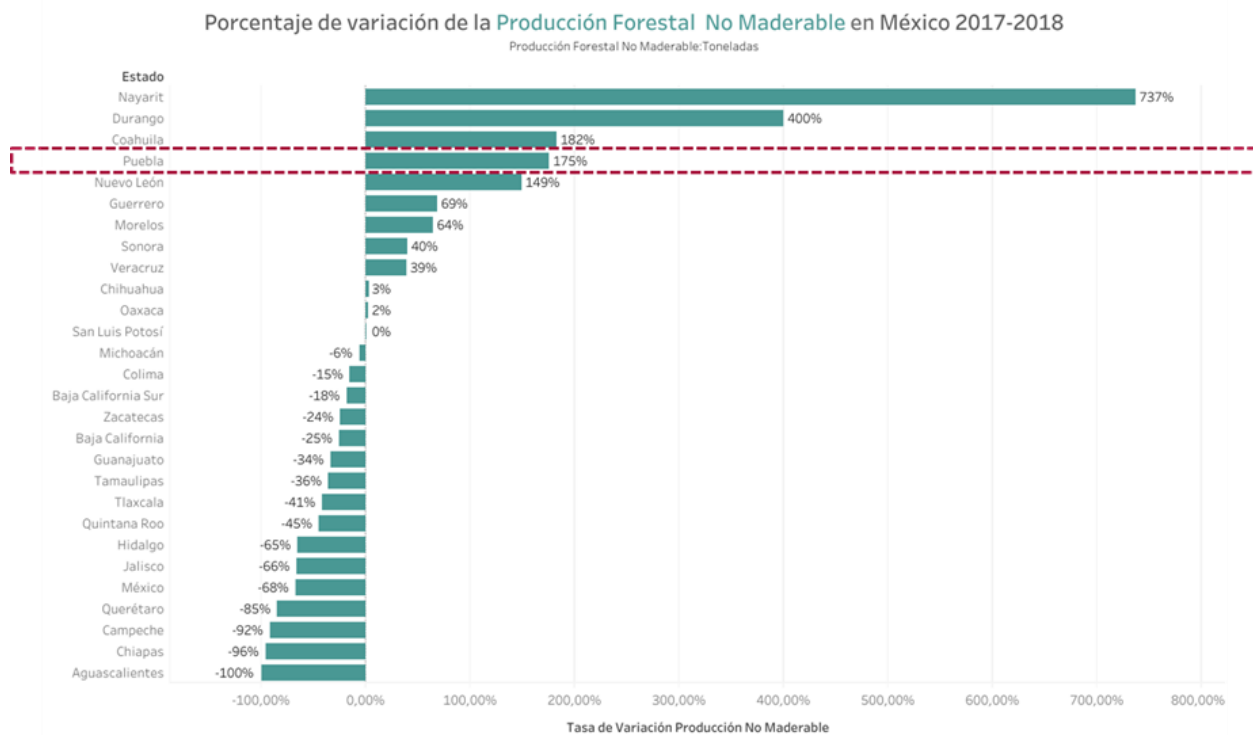


FIGURA 2. PORCENTAJE DE VARIACIÓN DE LA PRODUCCIÓN FORESTAL NO MADERABLE EN MÉXICO 2017-2018.

Fuente: CONAFOR (2022). Anuarios Estadísticos Forestales.

La mayoría de los productos procedentes del uso de los recursos forestales no maderables derivan del conocimiento tradicional de las comunidades rurales y pueblos indígenas, por lo que es necesario diseñar e implementar una estrategia para impulsar proyectos productivos comunitarios, con el objetivo de ampliar la oferta de actividades forestales y mejorar la calidad de vida de sus pobladores, a través de Soluciones basadas en Comunidades. De acuerdo con el informe de actividades 2022 de la CONAFOR, en la entidad se han apoyado

² CONAFOR (2022). Estadísticas estatales de producción forestal maderable y no maderable. Recuperado de: <https://snif.cnf.gob.mx/estadisticas-por-estados-de-produccion-forestal-maderable-y-no-maderable>

dos proyectos productivos forestales liderados y operados por mujeres (CONAFOR, 2022a).

Como se ha descrito, Puebla es una entidad rica en biodiversidad y recursos forestales maderables y no maderables, de los cuales dependen, principalmente comunidades rurales y población proveniente de pueblos originarios. Sin embargo, enfrenta grandes retos en materia de conservación y manejo de sus recursos. Para hacer frente a esos retos, el gobierno federal y estatal cuentan con una serie de instrumentos que apoyan el fortalecimiento de capacidades locales y de respuesta ante emergencias tales como incendios y plagas forestales e inundaciones.

El Gobierno del Estado de Puebla, a través de la Secretaría de Medio Ambiente Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT), cuenta con un sistema de monitoreo de columnas de humo integrado por 29 cámaras de video en tiempo real, donde se monitorea el 80% de la superficie forestal del Estado, este sistema ha permitido disminuir el tiempo de detección de incendios forestales de 1 hora 40 minutos a 16 minutos actualmente.

En el Centro Estatal de Manejo del Fuego se cuenta con personal especializado en la materia, que trabajan en coordinación interinstitucional con el gobierno Federal (CONAFOR), monitoreando, evaluando y despachando los recursos necesarios para la atención de los incendios forestales, en colaboración importante con la Coordinación General de Protección Civil y la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (CONAFOR-SMADSOT, 2022).

Para el control de plagas, la Promotoría de Desarrollo Forestal en Puebla de la CONAFOR tiene establecidas brigadas de sanidad forestal que realizan recorridos de monitoreo para poder detectar las áreas con presencia de plagas o enfermedades que pueden causar perturbaciones a los ecosistemas (CONAFOR, 2021; CONAFOR, 2020). Así mismo, se tienen programas permanentes de apoyo a productores forestales y cadenas de valor (CONAFOR, 2022a).

Aunado a los problemas que enfrenta el sector forestal producto de la actividad humana, se añade el cambio climático. Las nuevas condiciones climáticas impondrán mayor estrés para algunas especies, como *Abies* y *Pinus*, lo que puede aumentar la probabilidad de decrecimiento en su área de distribución (Araiza-Olivare, 2020; Sáenz-Romero et al., 2016; Castellanos-Acuña et al., 2016; Guitérrez y Trejo, 2014).

El aumento en la frecuencia de eventos extremos asociados al cambio climático, como sequías, también se relaciona con un incremento en la

frecuencia de incendios y plagas, que ocasionan reducción en la edad y productividad de los ecosistemas forestales (Araiza-Olivare, 2020).

Ante esta situación, el estado de Puebla elabora el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2021-2030 y el Plan de Acción ante el Cambio climático del Estado de Puebla 2021-2030, un instrumento de planeación y gestión compartida entre las políticas de calidad del aire y de cambio climático, a efecto de generar sinergias para aumentar la eficiencia y eficacia de las acciones y potenciar los co-beneficios de la gestión integral y coordinada.

Este instrumento fortalece la agenda climática del Estado, en conjunto con la Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030 y el Programa Estatal de Cuidado Ambiental y Atención al Cambio Climático (Gobierno de Puebla, 2019).

La Estrategia Estatal considera seis estrategias y 20 líneas de acción para impulsar la mitigación y adaptación al cambio climático (SMADSOT, 2022). El manejo forestal sustentable forma parte de tres ejes estratégicos: Aprovechamiento Regenerativo de la Biodiversidad, Fortalecimiento de Conocimientos y Capacidades Climáticas y Disminución Integral de Riesgos y Vulnerabilidad (Figura 3).



FIGURA 3. EJES ESTRATÉGICOS Y LÍNEAS DE ACCIÓN DE LA ESTRATEGIA ESTATAL DE CAMBIO CLIMÁTICO QUE CONSIDERAN ASPECTOS DEL SECTOR FORESTAL.

Fuente: SMADSOT (2022). Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030.

El Programa Estatal considera dentro de la Temática 2: *Adaptación al cambio climático de las zonas rurales*, identificar la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales con escenarios de cambio climático, promover medidas que fortalezcan los mecanismos de prevención y atención de incendios forestales, y establecer esquemas participativos para el desarrollo de actividades económicas con enfoque de sustentabilidad (Figura 4).



Estrategia 1



Promover buenas prácticas para la atención de los efectos causados por el cambio climático.

Líneas de acción

1. Fortalecer mecanismos de prevención y atención oportuna para el control de incendios forestales causados por actividades agropecuarias.
2. Promover acciones para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero generados por las actividades pecuarias.

Estrategia 2



Promover el uso de tecnologías innovadoras para hacer eficiente el desarrollo productivo y la transición energética en el medio rural.

Líneas de acción

1. Impulsar esquemas de composta de residuos orgánicos con aprovechamiento de los subproductos para elaboración de fertilizante natural, contribuyendo a disminuir la necesidad de fertilizantes químicos.
2. Impulsar esquemas de captura de gases, emitidos durante el proceso de biodigestores, para utilizarlos en

la generación de energía eléctrica y gas natural, como fuentes limpias de energía.

Estrategia 3



Impulsar el desarrollo de tecnologías para la adaptación de las especies forestales y agropecuarias al cambio climático.

Líneas de acción

1. Impulsar la adopción de tecnologías para el establecimiento de especies forestales en ecosistemas naturales.
2. Utilizar las tecnologías disponibles para identificar las especies prioritarias con escenarios de cambio climático.

Estrategia 4



Preservar los servicios ecosistémicos y medios de vida en las zonas rurales.

Líneas de acción

1. Diseñar esquemas participativos que permitan el desarrollo de actividades económicas con criterios sostenibles basadas en la preservación de los servicios ambientales.

FIGURA 4. ESTRATEGIAS Y LÍNEAS DE ACCIÓN DE LA TEMÁTICA 2. ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LAS ZONAS RURALES

Fuente: Gobierno de Puebla (2019). Programa Estatal de Cuidado Ambiental y Atención al Cambio Climático.

A continuación, se describe la metodología seguida para el cálculo de la vulnerabilidad del sector forestal del estado de Puebla.

MÉTODOS

La vulnerabilidad al cambio climático es un concepto complejo que involucra diferentes factores. En la Ley General de Cambio Climático se define como el “nivel a que un sistema es susceptible, o no es capaz de soportar los efectos adversos del Cambio Climático, incluida la variabilidad climática y los fenómenos extremos.”³

La evaluación de la vulnerabilidad es un proceso esencial para comprender y abordar los riesgos asociados con el cambio climático, garantizar la adaptación y aumentar la resiliencia de las comunidades y ecosistemas. Existen diferentes marcos conceptuales y aproximaciones para evaluar la vulnerabilidad de diferentes sectores ante este fenómeno, cada una de los cuales enfatiza diferentes aspectos. Ya sea bajo una perspectiva biofísica, socioeconómica, o bajo un enfoque integrado, cada una sustentada en diferentes metodologías particulares para su análisis (Bruno Soares et al., 2012), las evaluaciones en general consideran tres atributos de los sistemas analizados: la exposición, como componente externo, representada por el cambio en el clima, la sensibilidad, y la capacidad adaptativa del sistema, como componentes internos de este (Foden et al., 2013; 2019; Thornton et al., 2014; Gumel, 2022).

Para el sector forestal se usó la aproximación que la define como una función del carácter, la magnitud, la tasa de cambio y variación climática a los que está expuesto un sistema, la sensibilidad y la capacidad de adaptación que presenta el sistema (Parry et al., 2007). De acuerdo con el marco teórico establecido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC, 2007), la vulnerabilidad se calculó considerando tres componentes: a) exposición, b) sensibilidad y c) capacidad adaptativa mediante la fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

La exposición se define como la magnitud, carácter y velocidad de las variaciones climáticas que afectan un sistema; la sensibilidad es el grado en que el sistema es afectado por la variabilidad climática y el cambio climático

³ Ley General de Cambio Climático, Art.3 fr. XLII (DOF, 2012 última reforma 11-05-2022)

debido a las características que lo definen, y la capacidad adaptativa como aquellos recursos, capital humano e instrumentos que representan una mayor posibilidad de adaptación (INECC y SEMARNAT, 2019 en: CONANP y PNUD, 2021). Esta aproximación ha sido usada en diferentes instrumentos en la materia, como el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC) y la Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030 de Puebla.

Una característica importante de las evaluaciones de vulnerabilidad realizadas en el presente Programa es la representación espacialmente explícita. El conocer la distribución espacial de los criterios y resultados de los análisis, así como su representación en mapas, resulta de suma importancia. Esto permite identificar regiones donde el sistema, o alguno de sus elementos, son particularmente vulnerables, apoya a la formulación de políticas públicas, y permite priorizar y eficientizar los esfuerzos de adaptación (Preston et al., 2011).

Conocer la vulnerabilidad al cambio climático de la vegetación permite, por un lado, proyectar la pérdida de superficie forestal por cambio en las condiciones climáticas, y por el otro identificar medidas que puedan atenuar los impactos del cambio climático en función de la sensibilidad y capacidad adaptativa de cada comunidad vegetal.

Para evaluar la vulnerabilidad actual y ante el cambio climático del sector forestal se consideraron 10 criterios para construir los tres elementos de la vulnerabilidad. En la tabla 3 se indican los componentes, los criterios, así como la contribución de los valores de estas para el cálculo de la vulnerabilidad, p.ej. -:+ indica que a menor valor de la variable, mayor es el aporte.

TABLA 3. VARIABLES CONSIDERADAS PARA CALCULAR LA VULNERABILIDAD DEL SECTOR FORESTAL.

COMPONENTE	CRITERIO	CONTRIBUCIÓN
Sensibilidad	Tamaño del parche	-:+
	Rango altitudinal del parche	-:+
	Índice de proximidad	-:+
	Índice de forma	+:+
	Riesgo de incendios	+:+
	Densidad de carreteras	+:+
Exposición	Pérdida de superficie de idoneidad ambiental	+:+
Capacidad adaptativa	Áreas Naturales Protegidas (ANP)	+:+
	Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC)	+:+
	Pago por Servicios Ambientales (PSA)	+:+

Fuente: Elaboración propia

Los Elementos Clave del Territorio (ECT) son elementos bióticos y abióticos considerados relevantes por su presencia y representatividad en el territorio, por la relevancia de los servicios ecosistémicos que proveen a la sociedad, las amenazas actuales a las que están expuestos y su estado de conservación, así como por los impactos que potencialmente tendrá el cambio climático sobre ellos (CONANP y PNUD, 2021). Como ECT representativos del sector forestal del estado se seleccionaron seis comunidades vegetales: a) bosque de oyamel (BA), b) bosque mesófilo de montaña (BM), c) bosque de pino, encino, pino-encino y encino-pino (BPQP), d) matorral crasicaule (MC), e) matorral desértico rosetófilo (MDR) y f) selva baja caducifolia (SBC). Su delimitación espacial corresponde a los polígonos (PDCV) de la carta de Uso del Suelo y Vegetación Serie VII del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2018), para cuya selección se consideraron todos los estadios sucesionales y estratos, i.e. primario, secundario, arbóreo, arbustivo, etc.

Estos ECT fueron validados de forma participativa en los talleres realizados en el marco del presente documento. En ellos, se hizo énfasis en su importancia desde la percepción local hasta regional para la población. Se realizó el ejercicio de identificar los elementos más relevantes para el socioecosistema por su valor cultural, ambiental y económico renombrándolos como Objetos de Conservación Socioambiental (OCSA) (CONANP-PNUD, 2021).

Durante esta identificación se tomó como eje rector el patrimonio biocultural basado en la coincidencia entre la riqueza lingüística, biológica, cultural y a aquellos elementos determina la identidad, sentido de pertenencia e interacciones con la naturaleza en el pueblo, y que fortalecen y conducen de forma natural el vínculo entre las localidades y su ambiente (Salafsky y Wollenberg, 2000; Maffi, 2005) que han derivado en el conocimiento local (ecological knowledge), el cual se abordó como las diversas formas de conocimientos, creencias y prácticas que son relevantes y transferidas a través de las generaciones a nivel local, no excluyendo conocimientos desarrollados de forma reciente o de grupos indígenas (op. cit.).

SENSIBILIDAD

La sensibilidad se calculó considerando seis variables; éstas se pueden agrupar, de forma general, en métricas del paisaje y elementos de perturbación, mismos que han sido usados como indicadores de la vulnerabilidad de ecosistemas forestales (Thorne et al., 2018; Kumar et al., 2021).

Criterio 1. Tamaño del parche

El área de la distribución de las especies se correlaciona con la sensibilidad al cambio climático (Thuiller et al., 2005). El tamaño de los parches de las comunidades vegetales está relacionado con su resiliencia, tasas de migración y la probabilidad de desaparecer por efecto del cambio climático (Collingham y Huntley, 2000; Xu et al., 2017). Los parches de menor tamaño podrían considerarse más sensibles que parches de mayores dimensiones. Esta variable se construyó calculando el área correspondiente a partir de los PDCV.

Criterio 2. Rango altitudinal del parche

Las especies han sobrevivido a períodos de climas más cálidos en el pasado cambiando sus distribuciones latitudinal o altitudinalmente (Senior et al., 2019), y en general, existe evidencia de cambios en los rangos altitudinales actuales como respuesta al cambio climático (Chen et al., 2011; Sheldon, 2019).

Las comunidades vegetales de paisajes topográficamente simples, i.e. planos y homogéneos pueden ser menos resilientes a los efectos del cambio climático (Graae et al., 2018). Una comunidad vegetal con un rango altitudinal amplio podría considerarse menos sensible que otra con un rango reducido, al tener más oportunidades para mover su distribución y migrar hacia altitudes mayores (Malakoutikhah et al., 2018). Esta variable se construyó calculando el rango de valores de altitud del modelo digital de elevación del Estado, a una resolución espacial de 1 km, intersectados por los PDCV.

Criterio 3. Índice de proximidad

Las especies tienen dos estrategias para sobrevivir a un clima cambiante; pueden permanecer en los sitios donde se distribuyen, adaptándose a las nuevas condiciones, o pueden moverse siguiendo sus nichos climáticos (Graae et al., 2018). La conectividad entre los parches de una clase de paisaje es un atributo relevante para la conservación de la diversidad biológica (Avon y Bergés, 2016), ya que está asociado a la dispersión y migración de los organismos y, cuyo mantenimiento o aumento, contribuye a contrarrestar los efectos de la fragmentación de los hábitats (Anderson y Jenkins, 2006) y a la adaptación a los efectos del cambio climático (Oliver et al., 2015; McGuire et al., 2016).

El índice de proximidad es una métrica de paisaje que permite distinguir entre distribuciones dispersas de parches pequeños y conglomerados de parches grandes (Gustafson y Parker, 1994), y se consideró como un indicador de la conectividad de los parches individuales. Esta variable se construyó a partir de los PDCV mediante el paquete spatialEco (Evans, 2021).

Criterio 4. Índice de forma

El índice de forma es una métrica de paisaje que mide la complejidad de la geometría de los parches, comparada con una forma estándar, p.ej. un círculo (McGarigal y Marks, 1995). Un parche de forma más compleja puede ser considerado más sensible debido al aumento de los efectos de borde, una menor compacidad (Weißhuhn, 2019), mayor fragmentación y pérdida de especies (Flowers et al., 2020). Esta variable se construyó a partir de los PDCV mediante la fórmula:

$$S = \frac{P_{ij}}{2\sqrt{\pi * a_{ij}}}$$

donde P es el perímetro del parche ij y a corresponde al área del parche ij (McGarigal y Marks, 1995).

Criterio 5. Riesgo de incendios

Amenazas no climáticas como los incendios forestales pueden tener efectos relevantes en la distribución de las especies y la composición de las comunidades biológicas (Regos et al., 2018). Se han registrado tendencias al aumento en las áreas afectadas por incendios debido al incremento de la aridez climática (Aragao et al., 2008; Williams et al., 2019) y, en general, se prevé un incremento en la frecuencia de esta amenaza asociado al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero (Wotton et al., 2017; Wu et al., 2018), por lo que ha sido considerada como indicador de la vulnerabilidad de ecosistemas forestales ante el cambio climático (Thorne et al., 2018).

Esta variable se construyó mediante la sobreposición cartografía entre los PDCV y la cartografía de riesgo por incendios forestales, obtenida de la Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR) de la CONAFOR.

Criterio 6. Densidad de carreteras

La densidad de carreteras tiene una serie de efectos detrimentales para la diversidad biológica, pudiendo conducir a la pérdida de hábitats, a la reducción de la permeabilidad del paisaje y al aumento de la fragmentación (Bennett, 2017). Si bien en algunos estudios ha sido considerada como un indicador de la capacidad adaptativa (Magness et al., 2011; Bouroncle et al., 2017), la densidad de carreteras se usó como un indicador de la sensibilidad de las comunidades vegetales (Pokhriyal et al., 2020).

Esta variable se construyó a partir de la cartografía de la Red Nacional de Caminos (INEGI, 2021). Se calculó la longitud total de las vialidades intersectadas por celdas de 1 km² y se dividió entre el área de la celda correspondiente. Posteriormente se calculó el promedio de los valores de densidad de las celdas intersectadas por los PDVC.

EXPOSICIÓN

Para construir los criterios de este componente de la vulnerabilidad se seleccionaron ocho proyecciones de cambio climático. Se seleccionaron dos SSP: a) el SSP 5-8.5 y b) el SSP 2-4.5. Esta selección comprende un escenario de altas emisiones y uno de estabilización media, respectivamente. Estos escenarios cubren el rango de posibles trayectorias (Lutz et al., 2016) y son de los más utilizados por la comunidad climática (Joyce y Coulson, 2020; San José et al., 2016).

Los horizontes temporales (HT) seleccionados son: a) el horizonte temporal cercano de 2021-2040 y b) el horizonte lejano 2061-2080. Para la toma de decisiones es necesario responder a problemáticas inmediatas o bien planificar el futuro a corto plazo, que pueden ser días, meses o algunos años. Una gestión a corto plazo es relevante, sobre todo en aquellos países en desarrollo, como México, por lo que es necesario generar capacidades adaptativas ante impactos en el contexto de cambio climático. Sin embargo, hay situaciones que necesitan una visión a largo plazo, por ejemplo, proyectos de infraestructura, como embalses de riego, desarrollos costeros y defensas contra inundaciones, entre otras (Nissan et al., 2019).

Los modelos globales de circulación general seleccionados son: a) el HADGEM3-GC31-LL y b) el MPI-ESM1-2-HR, ya que brindan un abanico de resultados en la región de Puebla.

La exposición de las comunidades vegetales al cambio climático se determinó identificando la superficie de pérdida de idoneidad ambiental proyectada a futuro (Thorne et al., 2016; Kling et al., 2019), de acuerdo con las ocho proyecciones de cambio climático seleccionadas, mediante modelos de distribución de especies (SDM por sus siglas en inglés).

Los modelos de distribución de especies se construyen extrapolando la distribución espacial y temporal, basándose en modelos estadísticos, a partir de la observación de la presencia de las especies y las variables ambientales (predictoras) que se presume influyen en la idoneidad del hábitat (Franklin, 2010). Aunque presenta ciertas limitaciones y asume diferentes supuestos, esta técnica ha sido ampliamente usada para evaluar los efectos del cambio climático en la diversidad biológica (Araújo et al., 2019; Srivastava et al., 2019) y en los ecosistemas forestales (Pecchi et al., 2019).

Como variables predictoras se usaron dos grupos de variables; 1) topográficas y 2) climáticas. Las variables topográficas consideradas fueron: 1.1) altitud, 1.2) la pendiente (Forzieri et al., 2021) y 1.3) el índice de rugosidad del terreno (Defossez et al., 2021). Si bien este tipo de variables no tienen efectos directos en la fisiología de las plantas (Austin, 2002), su uso puede aumentar el desempeño de los modelos generados (Sormunen et al., 2011; Mod et al., 2016).

El grupo de variables climáticas está conformado por las 19 variables bioclimáticas del conjunto de datos WorldClim 2.1 (Fick y Hijmans, 2017) a una resolución de 30 segundos de arco (~1km). Aunque existe evidencia de que la multicolinealidad tiene efectos pequeños en el desempeño de modelos ajustados con diferentes algoritmos (Brun et al., 2020), es aconsejable excluir aquellas variables altamente correlacionadas (Dormann et al., 2013).

Se identificaron y excluyeron las variables climáticas altamente correlacionadas mediante el cálculo del factor de inflación de varianza (VIF) (Naimi et al., 2014). De las 19 variables bioclimáticas iniciales, se mantuvieron 10 para ajustar los modelos: 2.1) bio2: promedio del rango de temperatura diurno, 2.2) bio3: isothermalidad, 2.3) bio5: temperatura máxima del mes más cálido, 2.4) bio8: temperatura media del trimestre más húmedo, 2.5) bio9: temperatura media del trimestre más seco, 2.6) bio13: precipitación del mes más húmedo, 2.7) bio14:

precipitación del mes más seco, 2.8) bio15: estacionalidad de la precipitación, 2.9) bio18: precipitación del trimestre más cálido, y 2.10) bio19: precipitación del trimestre más frío.

Para ajustar los modelos se extrajeron los valores de las celdas de $\sim 1\text{km}^2$ de las variables predictoras intersectados por los polígonos que delimitan a cada tipo de vegetación, hasta un límite máximo de 50,000; así como datos de celdas seleccionadas de forma aleatoria, localizadas a una distancia mayor de 0.1° (~ 11 km) a partir del límite de los polígonos, en cantidad tal que duplicara el número de celdas de presencia, hasta un límite máximo de 50,000 (Valavi et al., 2022).

Existen diferentes algoritmos para ajustar SDM. Los modelos de distribución ensamblados permiten reducir la incertidumbre y el error asociado (Araújo y New, 2007; Thuiller et al., 2005; Thuiller et al., 2009) al reflejar la tendencia central de los diferentes modelos individuales usados para construirlos (Zhu y Peterson, 2017).

Se ajustaron modelos individuales para cada tipo de vegetación con las áreas de entrenamiento respectivas con tres algoritmos: a) Boosted Regression Trees (GBM), b) Random Forest (RF) y c) MaxNet (MAX), seleccionados por su desempeño (Valavi et al., 2022).

El desempeño de los modelos se evaluó mediante la técnica de validación cruzada dividiendo los datos en 5 subconjuntos (k-folds) (Guisan et al., 2017), y usando el estadístico “true skill statistic” (TSS) (Allouche et al., 2006). Los modelos individuales se ensamblaron promediando los mejores modelos usando como métrica de desempeño el valor que maximiza la suma de la sensibilidad y la especificidad.

Los modelos se proyectaron al espacio geográfico correspondiente al estado de Puebla, para las condiciones actuales y para las ocho proyecciones de cambio climático. Posteriormente se transformaron a proyecciones binarias, i.e. zonas idóneas-no idóneas, usando el umbral que maximiza el valor del TSS (Allouche et al., 2006; Zhang et al., 2019).

Para cada tipo de vegetación se calculó la superficie de pérdida de idoneidad de acuerdo con las ocho proyecciones binarias a futuro y, mediante sobreposición cartográfica con los PDVC, se identificaron las zonas con pérdida de idoneidad ambiental proyectada, a las cuales, se les asignó un valor de 1.

CAPACIDAD ADAPTATIVA

Dado el papel que las áreas protegidas desempeñan en la conservación de ecosistemas y a los servicios ecosistémicos que éstos proveen (Hoffmann y Beierkuhnlein, 2020), son consideradas como elementos importantes para la adaptación de las especies y comunidades humanas al cambio climático (Mansourian et al., 2009).

La capacidad adaptativa se construyó uniendo los polígonos que delimitan a las Áreas Naturales Protegidas (ANP) de los ámbitos federal, estatal y municipal (Criterio 1), las Áreas Destinadas Voluntariamente para la Conservación (ADVC) (Criterio 2) y las zonas sujetas a Pago por Servicios Ambientales (PSA) (Criterio 3), e intersectándolos con los PDVC. A las geometrías resultantes se les asignó un valor de 1.

VULNERABILIDAD

Para hacerlas intercomparables, las variables se normalizaron mediante la fórmula:

$$x_n = \frac{x}{\max(x)}$$

Los valores obtenidos se invirtieron para aquellas variables cuya contribución al componente respectivo es negativa, i.e. el valor del componente aumenta mientras menor es el valor de la variable. Los tres componentes de la vulnerabilidad se construyeron mediante la agregación aditiva de los criterios que los conforman, sumando los valores normalizados de los criterios individuales para obtener un valor general (Birkmann et al., 2022).

La vulnerabilidad actual y ante al cambio climático de las comunidades vegetales se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad} = (\text{Exposición} + \text{Sensibilidad}) - \text{Capacidad adaptativa}$$

Esta aproximación no considera cambios proyectados en la sensibilidad y la capacidad adaptativa a futuro, las cuales mantienen los valores actuales. Dado que para cada comunidad vegetal se calcularon ocho versiones diferentes de

exposición, i.e. una por cada proyección de cambio climático, se obtuvieron ocho representaciones diferentes de vulnerabilidad por comunidad. Para calcular la vulnerabilidad actual, de acuerdo con la aproximación utilizada (IPCC, 2007), se asignó un valor constante de 0 al componente de exposición al cambio climático. Los valores cuantitativos de vulnerabilidad obtenidos se clasificaron mediante el método de k-medias para obtener tres clases de vulnerabilidad: 1=Baja, 2=Media 3=Alta.

Las proyecciones de cambio climático no son pronósticos, y cada una de ellas representa un escenario igualmente plausible y válido que el resto, con diferentes niveles de incertidumbre asociada. Esto imposibilita el uso directo de una sola proyección como insumo para los análisis o la toma de decisiones (Hallegatte, 2009). Existen diferentes métodos para agregar múltiples proyecciones de cambio climático, así como los análisis derivados, como las proyecciones consenso, en el que se combinan los resultados de diferentes modelos de distribución de especies y proyecciones de cambio climático en un solo resultado (Coetzee et al., 2009), o ensamblajes multi-escenario, en los que se promedian diferentes modelos de circulación por escenario de emisiones (Russell et al., 2015; Fitzpatrick y Dunn, 2019).

Para facilitar la interpretación y visualización de los resultados, se construyó una vulnerabilidad integrada, en la cual, la exposición está representada por la unión de los valores de pérdida de idoneidad climática de las ocho proyecciones consideradas; i.e. una zona es considerada como de pérdida de idoneidad cuando así resulte en al menos una de las ocho proyecciones (pérdida de idoneidad integrada) (Figura 5). Esta vulnerabilidad integrada, que puede ser considerada como apegada a un principio precautorio, se usó para agregar los resultados en forma tabular y gráfica a nivel estatal y regional. En la figura 6 se muestra un resumen gráfico del cálculo de la vulnerabilidad de los ECT del sector forestal.

Todos los análisis se realizaron en el lenguaje y ambiente de programación estadístico R (R Core Team, 2022).

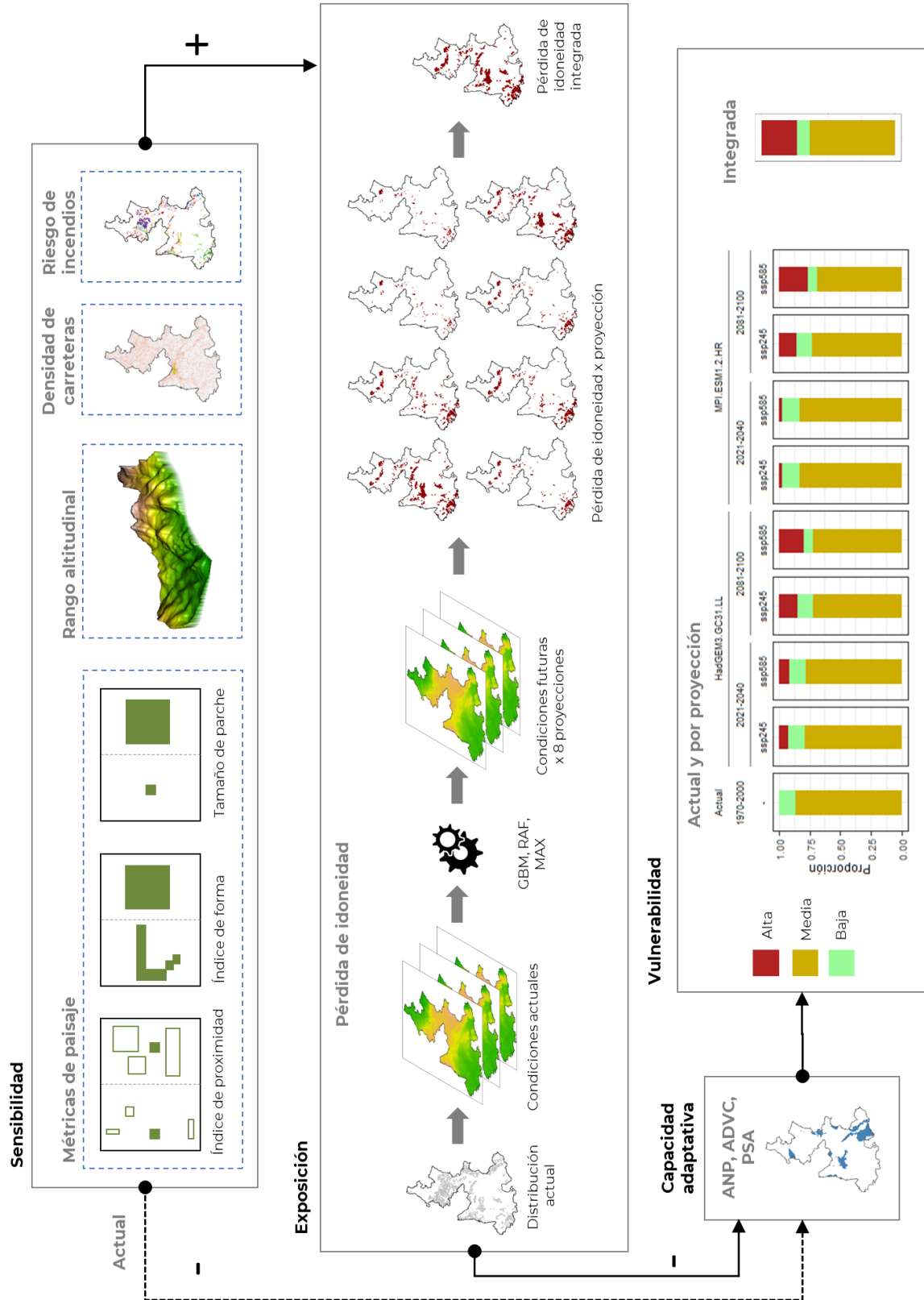


FIGURA 5. RESUMEN GRÁFICO DEL PROCESO PARA CALCULAR LA VULNERABILIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

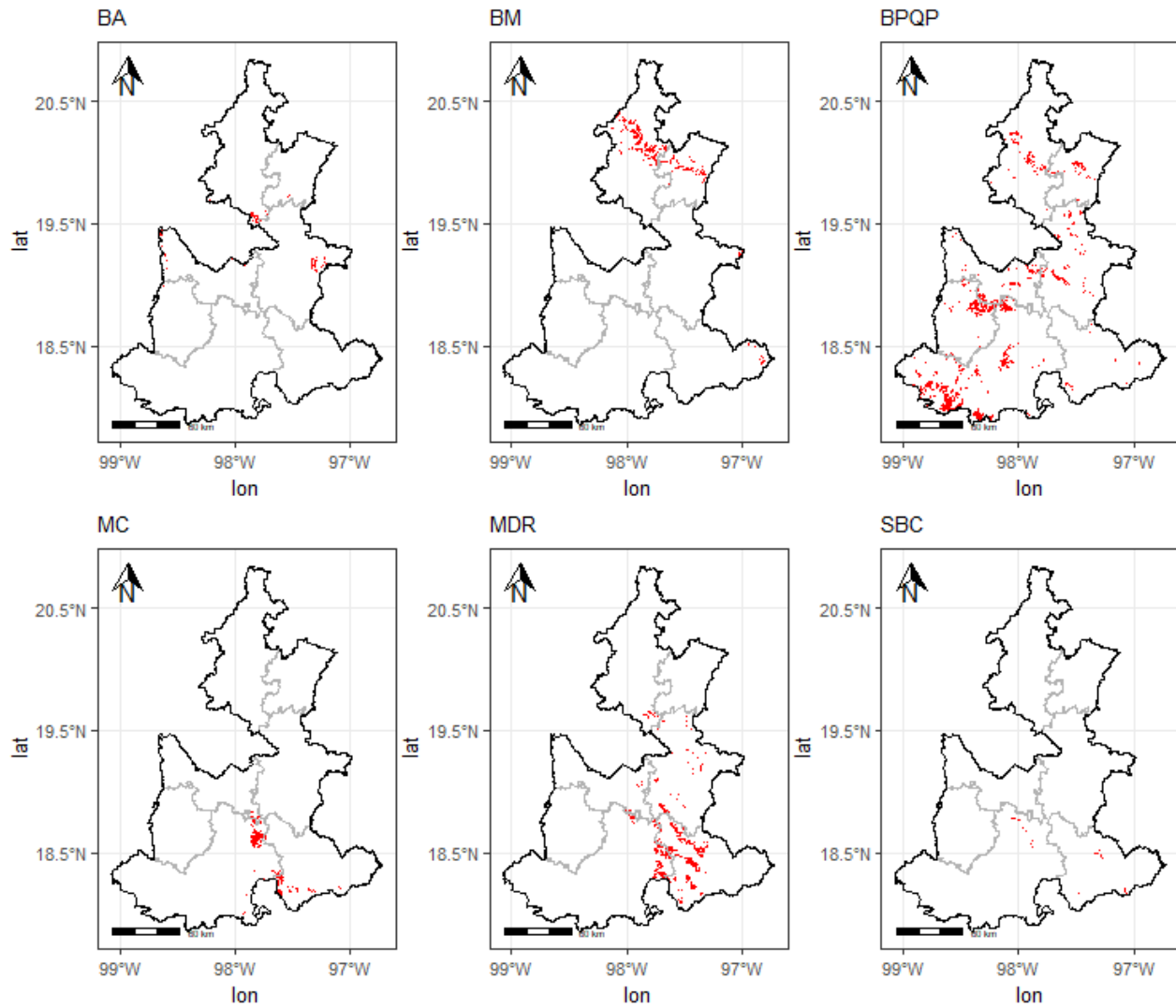


FIGURA 6. ZONAS DE PÉRDIDA DE IDONEIDAD CLIMÁTICA INTEGRADA DE ACUERDO CON LAS 8 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA CADA COMUNIDAD VEGETAL.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

En la Figura 7 se muestra la proporción de la superficie de las comunidades vegetales por clase de vulnerabilidad actual, y de acuerdo con las ocho proyecciones de cambio climático.

A excepción del matorral crasicaule, la mayoría de la superficie de las comunidades vegetales está representada por vulnerabilidad media, de acuerdo con todas las proyecciones de cambio climático. La mayoría de la superficie del matorral crasicaule está representada por vulnerabilidad baja en todas las proyecciones consideradas, lo que la posiciona como la comunidad menos vulnerable ante el cambio climático.

Las selvas bajas caducifolias presentan un nivel de exposición muy bajo en todas las proyecciones consideradas, por lo que el aporte de este componente para la vulnerabilidad por proyección es negligible al momento de clasificar los valores continuos en las tres clases. Por ello, es la única comunidad vegetal que no presenta vulnerabilidad alta en ninguna de las proyecciones, y mantiene la misma proporción de las clases media y baja en todas las proyecciones.

El matorral desértico rosetófilo prácticamente no presenta vulnerabilidad alta de acuerdo con la proyección MPI-ESM1-2-HR_ssp585_2021-2040, mientras que una tercera parte de su superficie es considerada de alta vulnerabilidad bajo la proyección HadGEM3-GC31-LL_ssp585_2081-2100.

Los bosques de pino, encino, encino-pino y pino-encino presentan vulnerabilidad alta en todas las proyecciones; para el ssp585 y horizonte temporal lejano (2081-2100) los dos modelos de circulación proyectan que aproximadamente una quinta parte de su superficie tendrá vulnerabilidad alta.

En general, la mayoría de la superficie del bosque mesófilo está representada por un nivel de vulnerabilidad medio, a pesar de que en la proyección HadGEM3-GC31-LL_ssp585_2081-2100 se prevé la mayor proporción de vulnerabilidad alta (37%).

Los bosques de *Abies* son la comunidad vegetal con mayor proporción de superficie altamente vulnerable, alcanzando los mayores valores (~48 y 81 %) para el horizonte temporal lejano y la SSP 585.

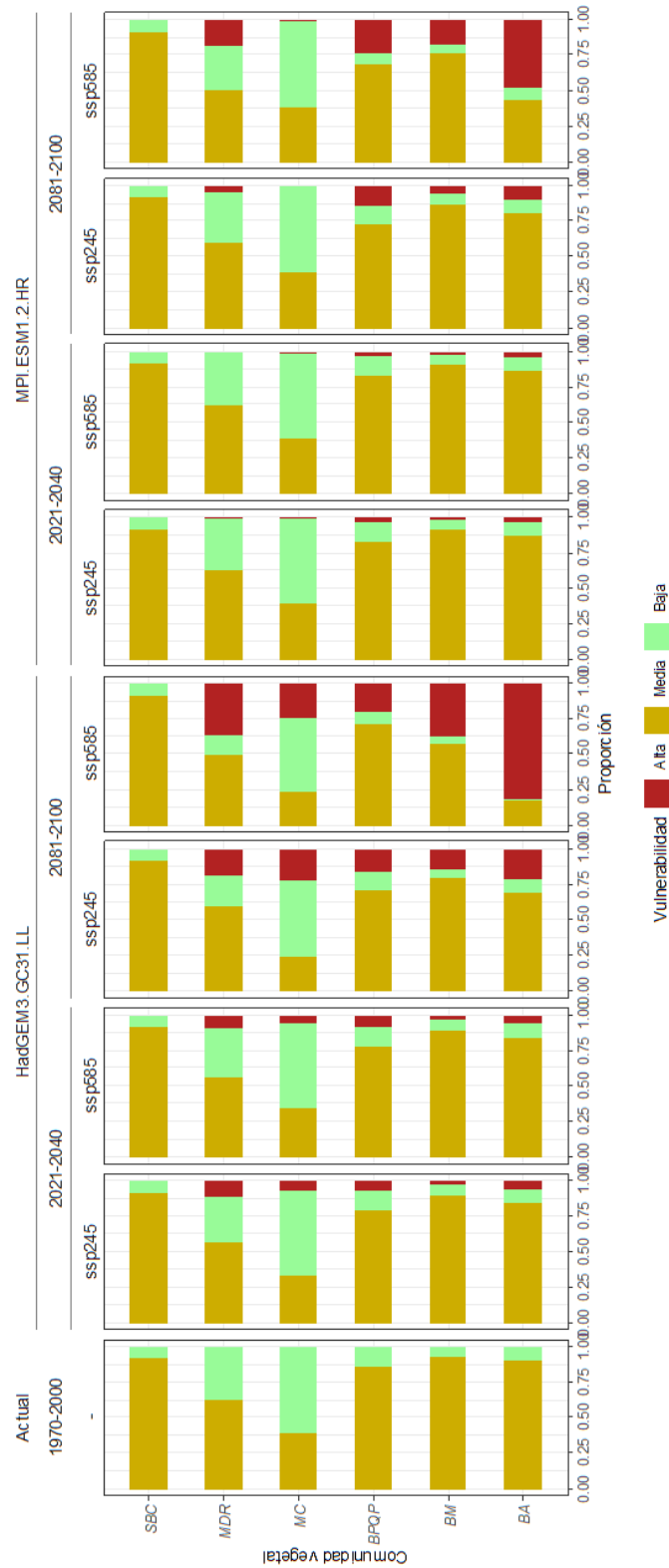


FIGURA 7. PROPORCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR CLASE DE VULNERABILIDAD Y PROYECCIÓN.

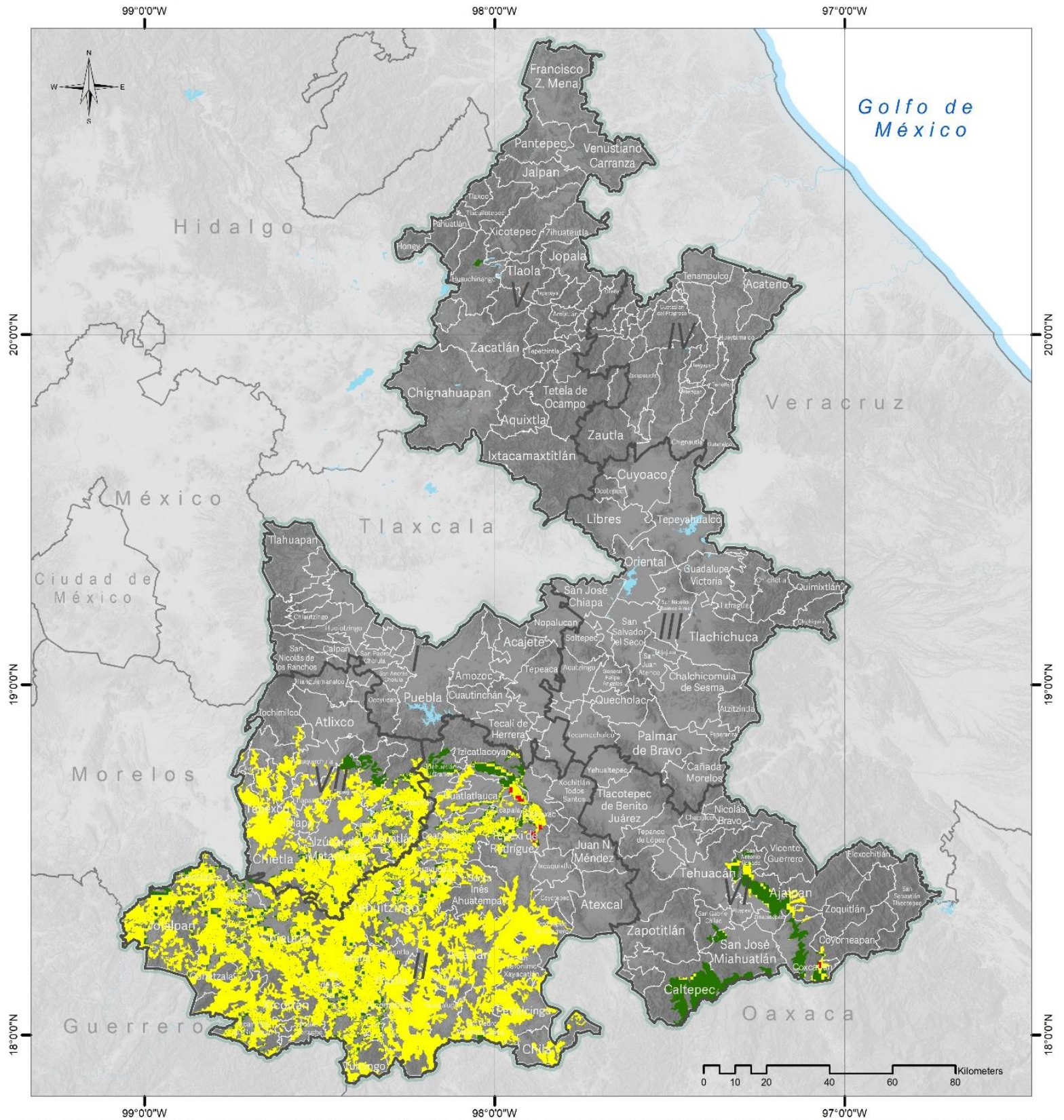
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los resultados de la vulnerabilidad integrada, el 68% de las comunidades vegetales tiene una vulnerabilidad media, 18% una vulnerabilidad alta y 14% una vulnerabilidad baja.

Las selvas bajas caducifolias (SBC) son la comunidad vegetal con mayor superficie y menor proporción con valores de vulnerabilidad alta. La conectividad de las SBC es muy alta, lo que en parte explica que 86% de la superficie tenga vulnerabilidad media y 13% vulnerabilidad baja. En la Sierra Norte, esta comunidad presenta la menor proporción de superficie con vulnerabilidad alta, contrario a la región de Angelópolis que presenta la mayor proporción de vulnerabilidad alta.

De acuerdo con los resultados, las SBC no proyectan tener impactos significativos en cuanto a pérdida de superficie por cambio en las condiciones climáticas, sin embargo, el aumento de la temperatura puede incrementar la incidencia de incendios y, por lo tanto, la emisión de GEI, la pérdida de biomasa aérea y stock de carbono. Esta comunidad vegetal es altamente sensible a incendios, por lo que es recomendable incrementar su vigilancia y monitoreo, particularmente en años con pronóstico de sequía, estableciendo brigadas permanentes contra incendios y campañas periódicas de prevención de incendios forestales (Mapa 188).

En segundo lugar, de acuerdo con su superficie, se encuentran los bosques de pino, encino, pino-encino y encino-pino (BPQP). Los árboles de pino son la base de la producción forestal de la entidad, y una fuente importante de suministro de leña para los hogares rurales, por lo que disminuir su vulnerabilidad al cambio climático debe ser una prioridad. Esta comunidad se encuentra distribuida en todas las regiones del Estado, aunque su mayor extensión se ubica en la Sierra Norte, seguida por la región Mixteca y Valle Serdán. La mayor parte de superficie de BPQP presenta valores de vulnerabilidad media, a excepción de los BPQP de la región Mixteca que presentan valores altos de vulnerabilidad (Mapa 185).



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Vulnerabilidad**
- Baja
- Media
- Alta

Regiones Puebla

- I, Angelópolis
- II, Mixteca
- III, Serdán y Valles Centrales
- IV, Sierra Nororiental
- V, Sierra Norte
- VI, Tehuacán y Sierra Negra
- VII, Valle Atlixco y Matamoros



M188 Vulnerabilidad de las Selvas Bajas Caducifolias (SBC).

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

Estos bosques están fuertemente amenazados por el cambio de uso de suelo, principalmente hacia la agricultura, la ganadería y la expansión urbana, si a esto añadimos el factor clima, podemos asegurar que **los BPQP son los más vulnerables de la entidad**. Como medidas generales se recomienda seguir impulsando los sistemas agrosilvopastoriles, así como establecer campañas de reforestación, control de incendios y plagas (principalmente de descortezadores) en zonas de alta vulnerabilidad.

En la región Sierra Norte y Sierra Nororiental esta vegetación cubre las zonas alta y media de la cuenca del Río Tecolutla, a pesar de los servicios ambientales que proporcionan no hay instrumentos de protección que aseguren la conservación y el manejo sustentable de estos bosques, por lo que una medida recomendada para disminuir su vulnerabilidad es el establecimiento de sistemas compensatorios como Pagos por Servicios Ambientales, o el establecimiento de áreas protegidas gubernamentales o privadas.

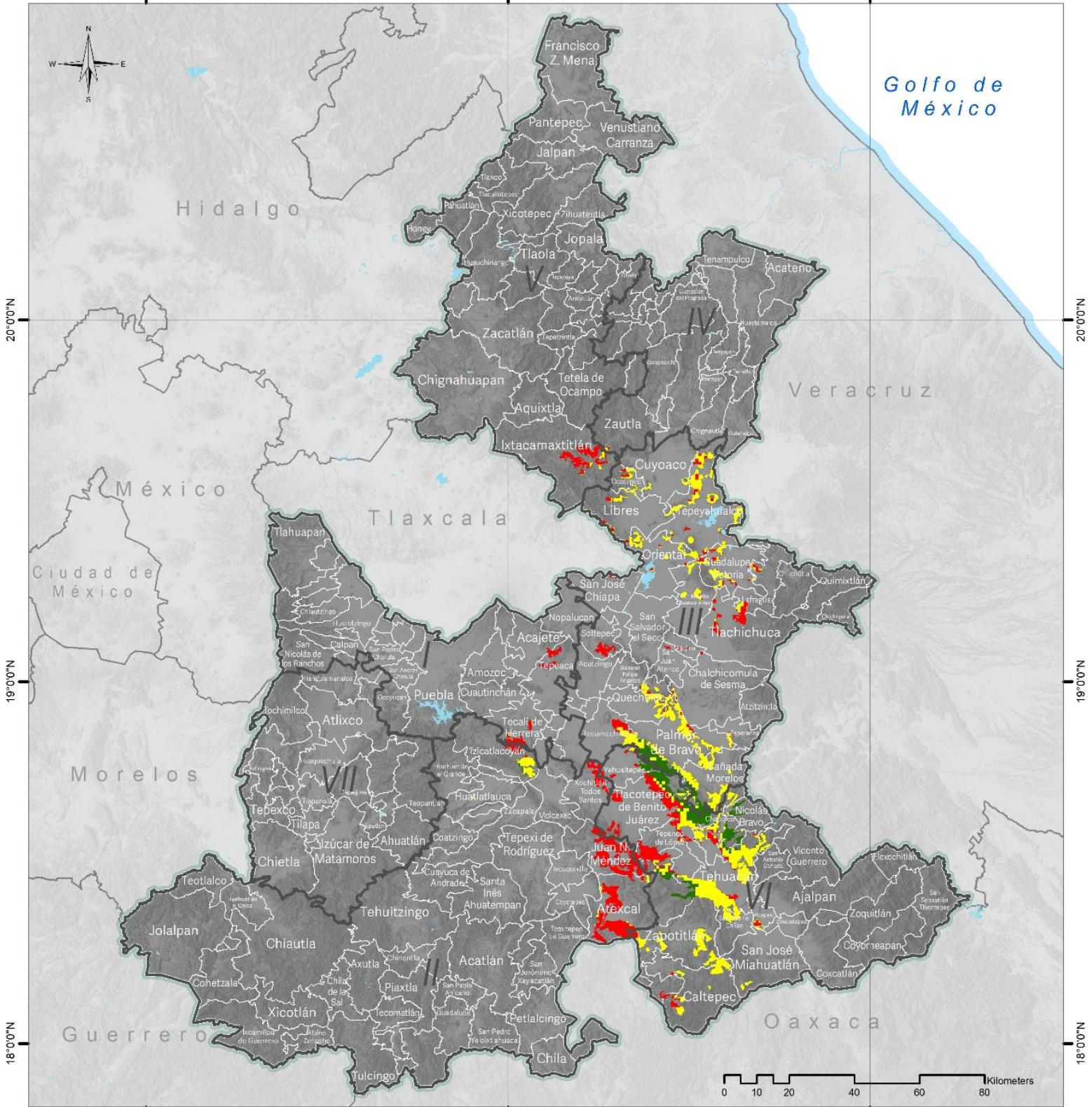
Por otro lado, en la región Angelópolis, más de 11,000 ha. de BPQP tienen alta vulnerabilidad al cambio climático, se suma a esta condición la expansión urbana de la capital poblana y su área conurbada, la cual representa una fuerte amenaza hacia los bosques no solo por el cambio de uso de suelo, también por la contaminación ambiental y atmosférica y los impactos que esta tiene en la salud, crecimiento y capacidad de almacenamiento de CO₂ de los bosques. Controlar las emisiones del parque vehicular, supervisar las emisiones y contaminación de las industrias, así como el establecimiento de bosques urbanos e infraestructura verde son algunas medidas sugeridas para esta región.

El matorral desértico rosetófilo (MDR) se distribuye en seis de las siete regiones del Estado, solo ausente en el Valle de Atlixco (Mapa 187). Aproximadamente la mitad de su superficie presenta valores de vulnerabilidad media; en las regiones Angelópolis, Mixteca y Sierra Norte presenta la mayor proporción de superficie con vulnerabilidad alta. Como con el matorral crasicaule (MC) o las SBC, el aumento en la incidencia de incendios y plagas representa la amenaza por cambio climático más importante para este tipo de vegetación, por lo que las medidas a adoptar tienen que ir dirigidas a atender estos fenómenos. Adicionalmente, se debe trabajar en medidas que frenen el sobrepastoreo, impulsando sistemas silvopastoriles sostenibles y la reconversión a sistemas menos agresivos con el suelo.

99°00'W

98°00'W

97°00'W



99°00'W

98°00'W

97°00'W

Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Vulnerabilidad**
- Baja
- Media
- Alta

Regiones Puebla

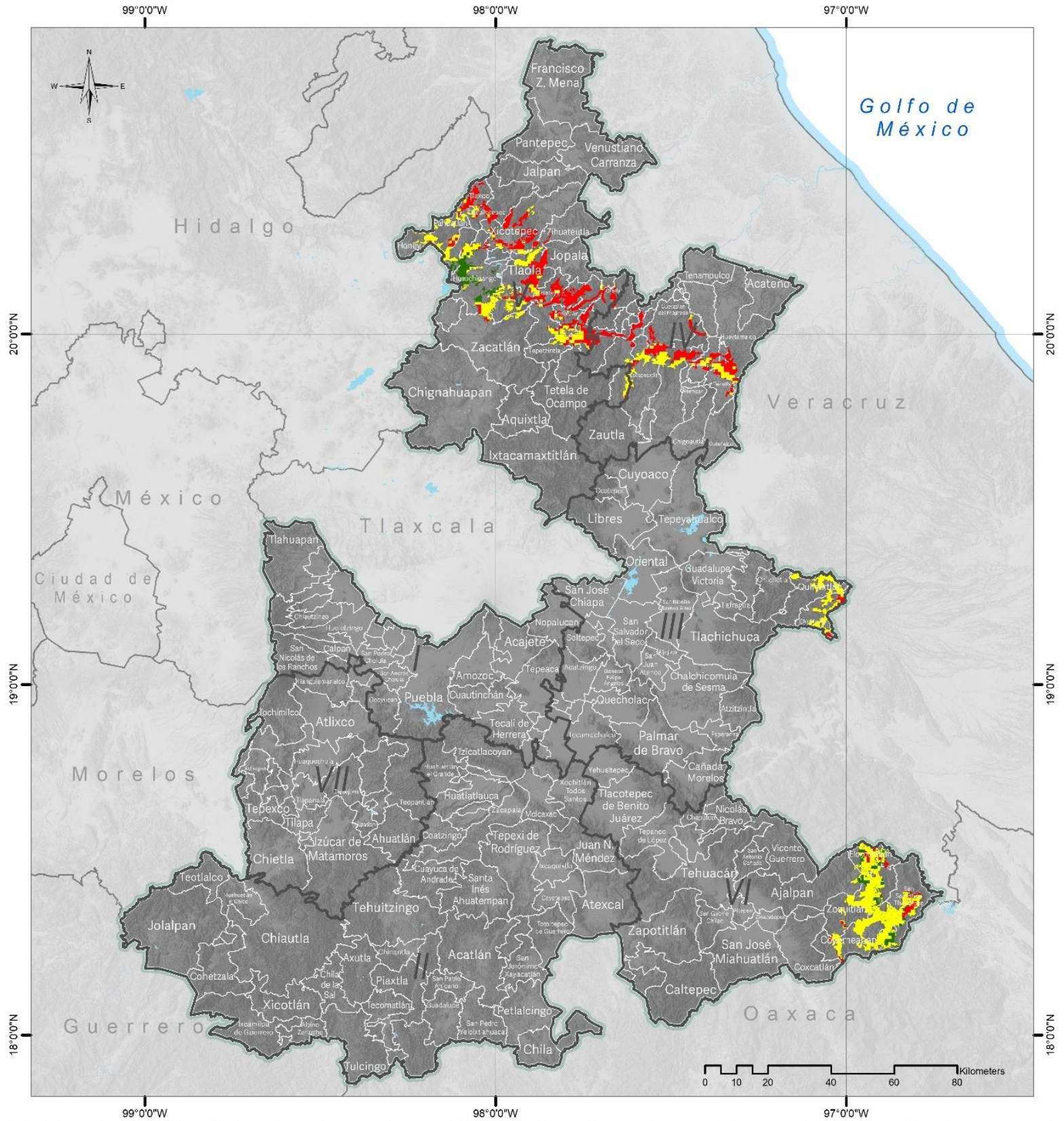
- I, Angelópolis
- II, Mixteca
- III, Serdán y Valles Centrales
- IV, Sierra Nororiental
- V, Sierra Norte
- VI, Tehuacán y Sierra Negra
- VII, Valle Atlixco y Matamoros



M187 Vulnerabilidad del Matorral Desértico Rosetófilo (MDR).

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Vulnerabilidad**
- Baja
- Media
- Alta

- Regiones Puebla**
- I, Angelópolis
- II, Mixteca
- III, Serdán y Valles Centrales
- IV, Sierra Nororiental
- V, Sierra Norte
- VI, Tehuacán y Sierra Negra
- VII, Valle Atlixco y Matamoros



M183. Vulnerabilidad del bosque mezofilo de montaña (BM).

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

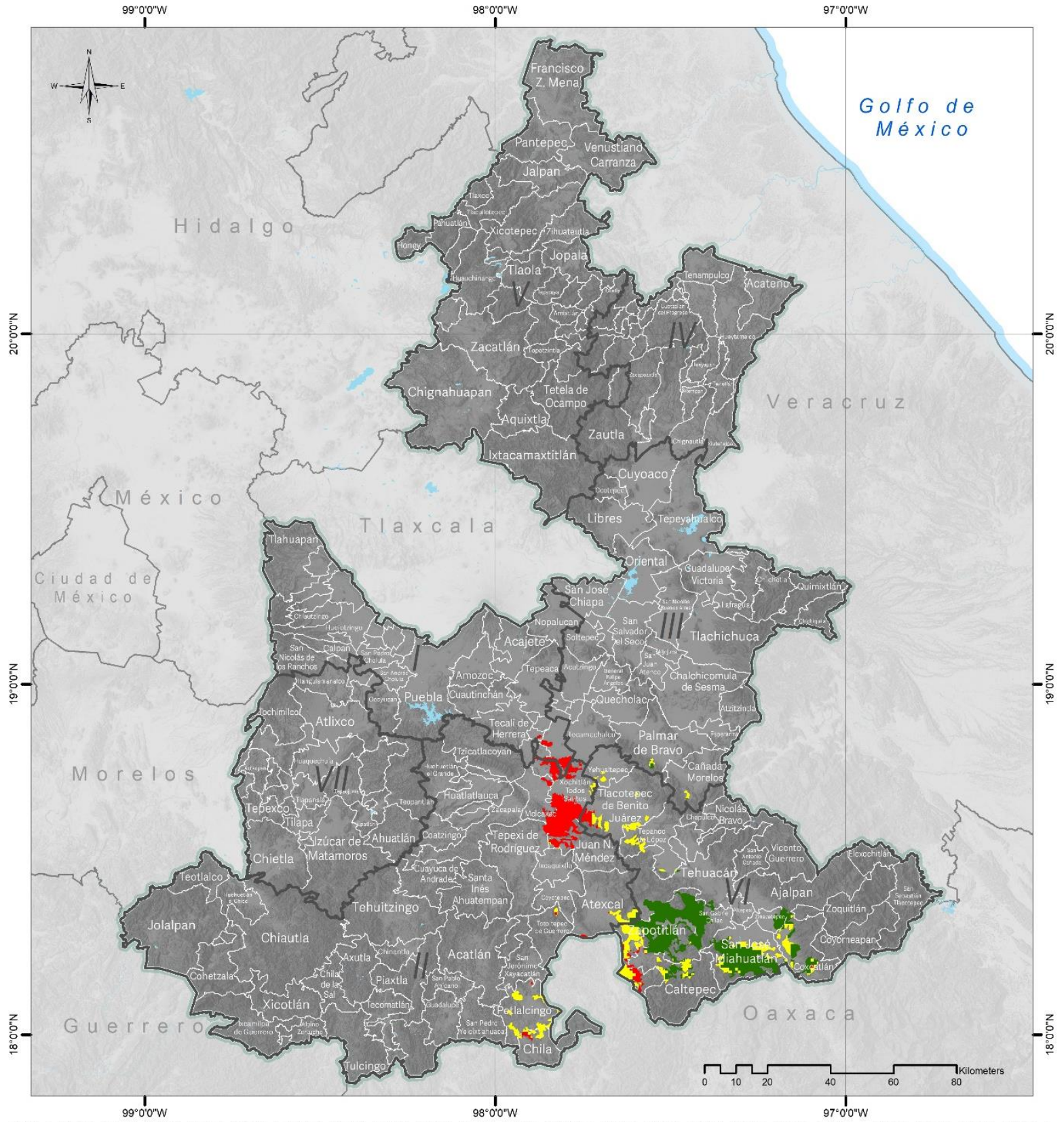
El bosque mesófilo de montaña (BM) se distribuye en cuatro regiones del Estado, presentando las mayores extensiones en la Sierra Norte y la Sierra Negra. Un poco más de la mitad de la superficie de BM presenta valores de vulnerabilidad media. La mayor proporción de superficie con vulnerabilidad alta se localiza en la Sierra Nororiental y la Sierra Norte (Mapa 186).

Esta comunidad representa menos del 8% de los bosques de la entidad. En general, es considerado uno de los ecosistemas terrestres más susceptibles al cambio climático debido a lo restringido de su distribución y las condiciones climáticas tan particulares que requiere para su establecimiento y supervivencia. Es un ecosistema altamente diverso que aporta importantes servicios ambientales, sin embargo, no cuenta con suficientes instrumentos de protección, en la entidad los BM bajo algún esquema de protección y manejo están en la Zona Protectora Forestal Vedada de la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, un Área Natural Protegida Federal que conserva menos del 1% del total de la superficie de BM.

Para aumentar la capacidad adaptativa de este tipo de vegetación es necesario promover e instaurar áreas de protección avaladas por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), así como restaurar las zonas degradadas más susceptibles de ser recuperadas. Para las zonas donde el bosque mesófilo de montaña presenta vulnerabilidad media y baja, una medida recomendable sería el impulso de sistemas agroforestales de café, así como el diseño de una estrategia de aprovechamiento sostenible de recursos forestales maderables y no maderables.

El matorral crasicuale (MC) se distribuye en cuatro regiones del Estado: Sierra Negra, Mixteca, Angelópolis y Valle Serdán; la primera es la que presenta la mayor superficie (Mapa 186). Los matorrales ocupan poco menos del 18% de la superficie del estado, de ese porcentaje, el MC ocupa el 6%. Si bien es la comunidad vegetal con mayor proporción de valores de vulnerabilidad baja, la totalidad de la superficie localizada en la región Angelópolis presenta vulnerabilidad alta.

En estas zonas de MC, al igual que con las SBC, es importante mantener una vigilancia constante y consolidar una brigada permanente contra incendios y plagas. Los matorrales de la región Selva Negra se encuentran dentro de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, la cual cuenta con un Programa de Adaptación al Cambio Climático (CONANP, 2020), como parte de las recomendaciones está el establecer mecanismos efectivos de coordinación interinstitucional para poder operativizar e implementar las medidas de adaptación diseñadas exprofeso para esta Área Natural Protegida.



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Vulnerabilidad**
- Baja
- Media
- Alta

Regiones Puebla

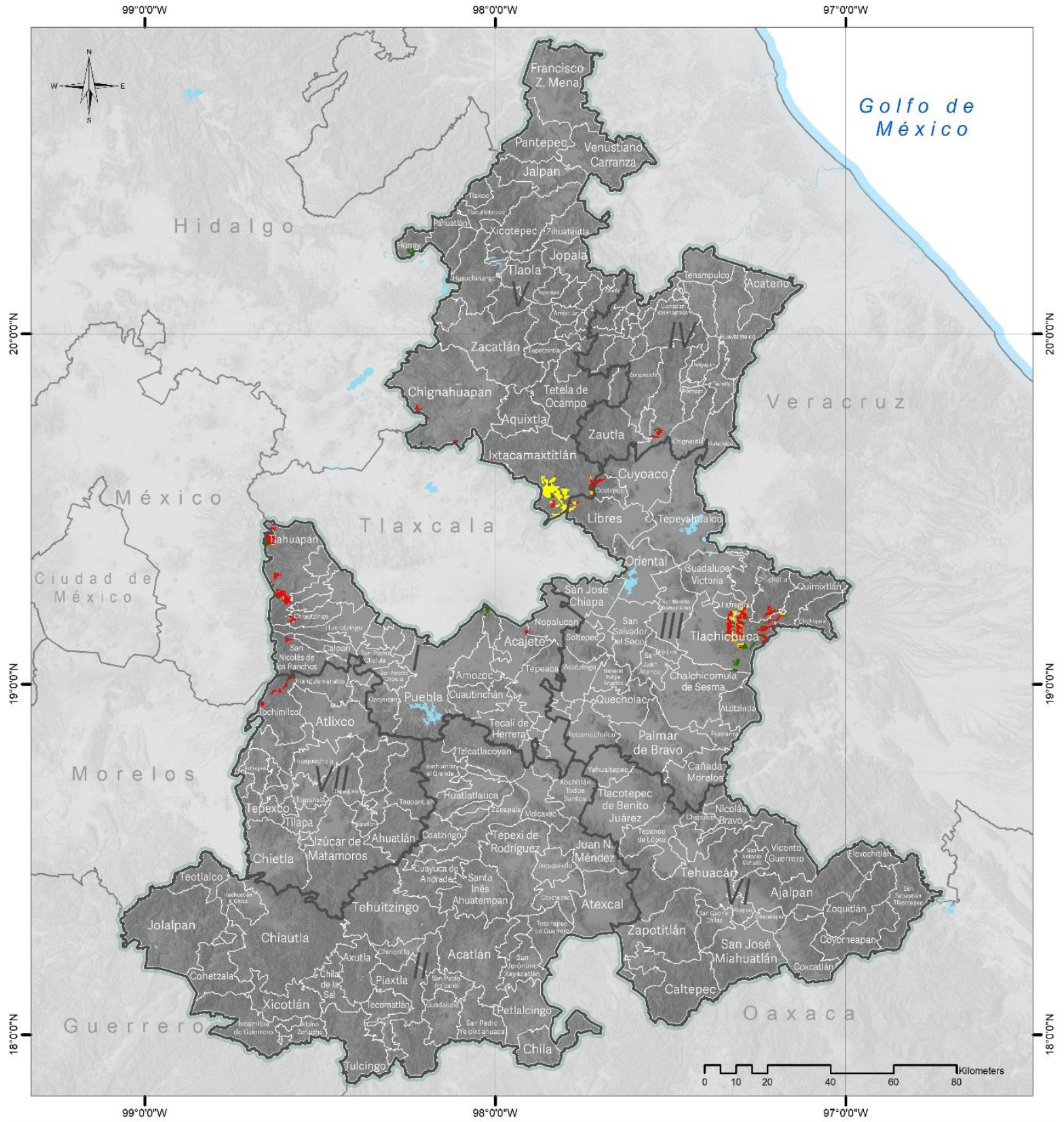
- I, Angelópolis
- II, Mixteca
- III, Serdán y Valles Centrales
- IV, Sierra Nororiental
- V, Sierra Norte
- VI, Tehuacán y Sierra Negra
- VII, Valle Atlixco y Matamoros



M186 Vulnerabilidad del Matorral Casicaule (MC).

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008



Simbología

- Límite municipal
- Cuerpos de agua
- Límite del Estado de Puebla
- Límite estatal
- Vulnerabilidad**
- Baja
- Media
- Alta

Regiones Puebla

- I, Angelópolis
- II, Mixteca
- III, Serdán y Valles Centrales
- IV, Sierra Nororiental
- V, Sierra Norte
- VI, Tehuacán y Sierra Negra
- VII, Valle Atlixco y Matamoros



M183. Vulnerabilidad del Bosque de Oyamel (BA).

Fuente: Elaboración Propia
Mapa Base: Marco Geoestadístico diciembre 2021, Estado de Puebla, INEGI.

Coordinate System: MEXICO ITRF 2008 LCC
Projection: Lambert Conformal Conic 2SP
Datum: ITRF 2008

El bosque de oyamel (BA) es la comunidad vegetal con menor superficie, sin embargo 54% tiene una vulnerabilidad alta al cambio climático. Esto podría significar la pérdida de más de 9,000 ha de BA, la segunda madera más importante a nivel estatal para la producción maderable (CONAFOR, 2019). (Figura 8).

Los BA de la región Angelópolis se localizan dentro de predios con certificación forestal, lo que implica que si bien no hay instrumentos gubernamentales que aseguren la protección de estos bosques, sí existen capacidades locales para la protección, restauración y conservación de estos ecosistemas y los servicios ambientales que proveen, disminuyendo así su vulnerabilidad.

En contraste, los BA de la región Valle Serdán no cuentan con esquemas gubernamentales de protección, ni de certificación por parte de los dueños de la tierra, lo que aumenta su vulnerabilidad respecto a los BA de otras regiones. En esta región se recomienda establecer medidas que protejan o den seguimiento a la salud y productividad de los BA en aras de mantener su estructura y funcionalidad, así como la diversidad forestal del estado de Puebla.

En las figuras y tablas siguientes se muestran la superficie y proporción de las comunidades vegetales por clase de vulnerabilidad integrada para el estado y a nivel regional.

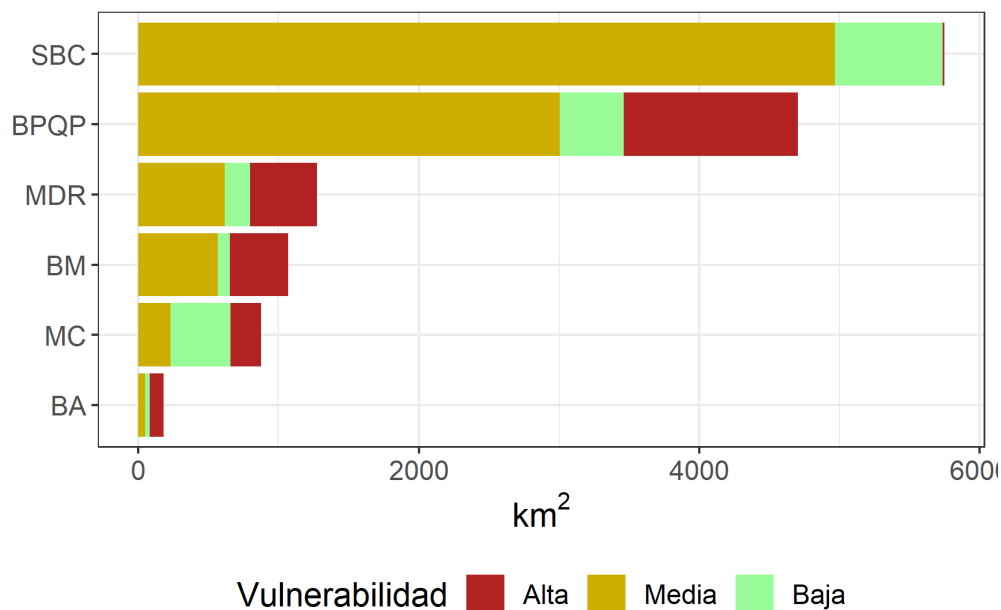


FIGURA 8. SUPERFICIE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR CLASE DE VULNERABILIDAD.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

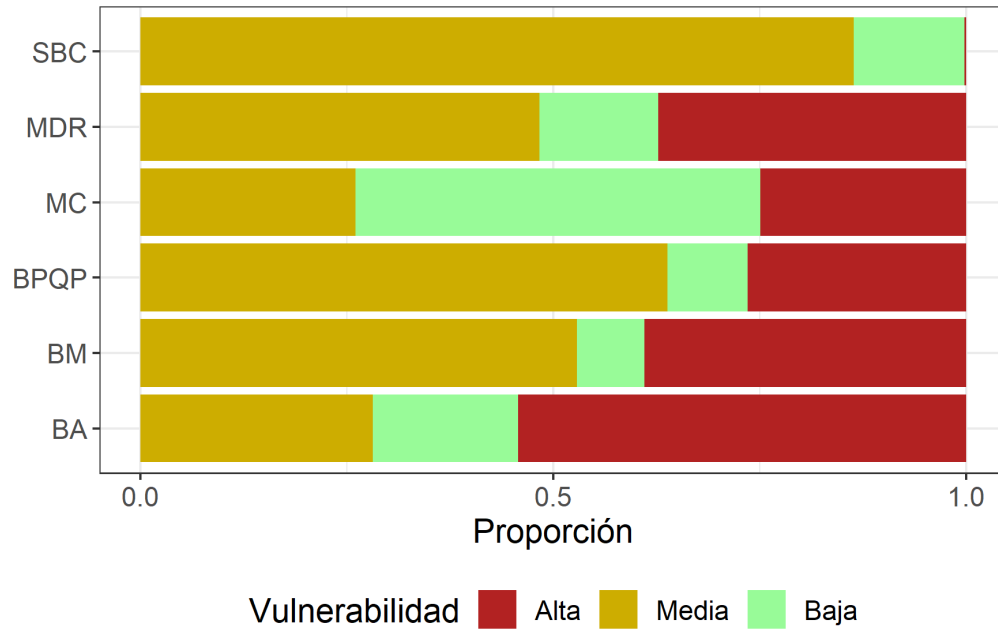


FIGURA 9. PROPORCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR CLASE DE VULNERABILIDAD.

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.

TABLA 4. SUPERFICIE Y PORCENTAJE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR CLASE DE VULNERABILIDAD.

COMUNIDAD	VULNERABILIDAD						TOTAL km ²
	ALTA		MEDIA		BAJA		
	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
BA	97.44	54	50.59	28	31.59	18	179.63
BPQP	1,242.71	26	3,003.33	64	456.53	10	4,702.57
BM	416.57	39	5,64.97	53	87.35	8	1,068.88
SBC	11.74	0	4,964.95	86	770.85	13	5,747.55
MC	218.41	25	228.35	26	429.14	49	8,75.90
MDR	475.15	37	614.97	48	183.22	14	1,273.34

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 5. SUPERFICIE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR REGIÓN Y CLASE DE VULNERABILIDAD.

REGIÓN	COMUNIDAD	VULNERABILIDAD [km ²]		
		ALTA	MEDIA	BAJA
Angelópolis	BA	30.3	0.3	7.5
	BM	-	-	-
	BPQP	111.4	343.2	103.0
	MC	23.1	0.0	0.0
	MDR	25.8	0.3	0.0
	SBC	0.2	2.0	0.2
Mixteca	BA	-	-	-
	BM	-	-	-
	BPQP	666.6	140.6	4.6
	MC	162.0	59.4	4.4
	MDR	184.1	24.3	1.4
	SBC	10.0	3878.6	333.2
Sierra Negra	BA	-	-	-
	BM	25.1	246.2	43.3
	BPQP	15.2	400.5	70.4
	MC	33.4	164.8	423.0
	MDR	140.2	285.3	127.1
	SBC	1.6	62.6	328.4
Sierra Nororiental	BA	3.2	0.0	0.9
	BM	124.5	65.7	1.5
	BPQP	92.4	389.8	31.6
	MC	-	-	-
	MDR	0.7	1.1	0.0
	SBC	-	-	-
Sierra Norte	BA	10.9	37.0	6.3
	BM	257.9	194.1	42.6
	BPQP	102.8	982.6	168.8
	MC	-	-	-
	MDR	35.9	4.6	0.0
	SBC	0.0	0.0	3.4
Valle Atlixco	BA	6.6	0.0	0.8
	BM	-	-	-
	BPQP	77.7	284.4	8.6
	MC	-	-	-
	MDR	-	-	-
	SBC	0.0	1021.8	105.6
Valle Serdán	BA	46.4	13.3	16.2
	BM	9.0	59.0	0.0
	BPQP	176.7	462.2	69.5
	MC	0.0	4.1	1.8
	MDR	88.4	299.4	54.7
	SBC	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

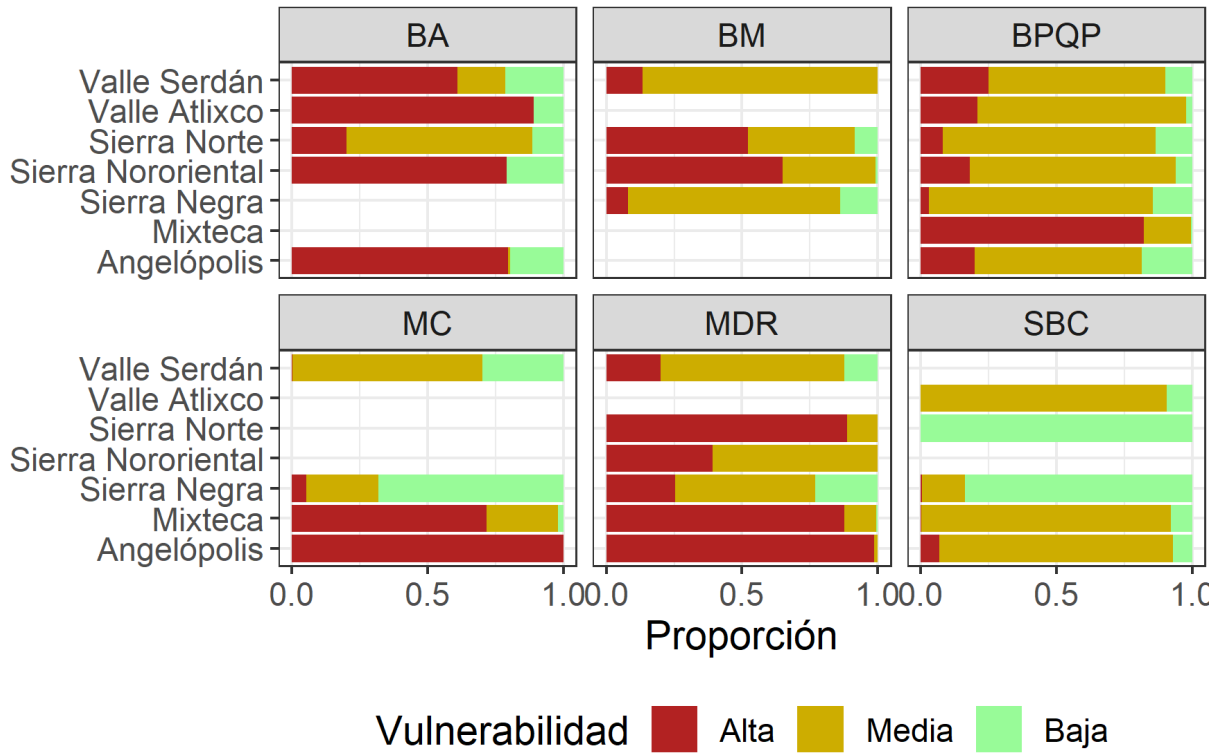


FIGURA 10. PROPORCIÓN DE LA SUPERFICIE DE LAS COMUNIDADES VEGETALES POR REGIÓN Y CLASE DE VULNERABILIDAD.

Fuente: Elaboración propia.

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se emiten algunas recomendaciones para el diseño e implementación de medidas adaptación al cambio climático, dirigidas a disminuir la vulnerabilidad del sector forestal del estado de Puebla, mismas que se enlistan a continuación:

- Impulsar la restauración de ecosistemas vulnerables para aumentar la resistencia y resiliencia de las comunidades vegetales ante los impactos del cambio climático.
- Fortalecer y diversificar los sistemas agrosilvopastoriles, promoviendo Soluciones basadas en la Naturaleza y Soluciones basadas en las Comunidades.
- Mantener la diversidad genética vegetal del estado de Puebla estableciendo un nuevo banco de germoplasma vegetal.
- Fortalecer el Programa Estatal de Manejo del Fuego, consolidando la relación interinstitucional e intermunicipal y otorgando más recursos para capacitación y adquisición de nuevos equipos y tecnología para la detección oportuna de incendios.
- Aumentar la superficie bajo esquemas de Pago por Servicios Ambientales.
- Impulsar el manejo forestal sostenible fortaleciendo la gestión y organización comunitaria.
- Establecer a nivel estatal un sistema permanente de monitoreo de la salud de los bosques, selvas y matorrales.
- Establecer campañas de reforestación, control de incendios y plagas en zonas de alta vulnerabilidad.

REFERENCIAS

Allouche, O., Tsoar, A., y Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of applied ecology*, 43(6), 1223-1232.

Anderson A., Jenkins C.N. (2006). *Applying nature's design. Corridors as a strategy for biodiversity conservation*. New York, University of Columbia Press, X + 231 p.

Aragao, L. E. O., Malhi, Y., Barbier, N., Lima, A., Shimabukuro, Y., Anderson, L., y Saatchi, S. (2008). Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the Brazilian Amazonia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1498), 1779-1785.

Araiza-Olivare, Gabriel Alexis (2020). Efectos del cambio climático en la distribución del bosque de Oyamel. *Revista Geográfica de América Central*, (65), 263-282. <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.65-2.11>.

Araújo, M. B., Anderson, R. P., Márcia Barbosa, A., Beale, C. M., Dormann, C. F., Early, R., ... y Rahbek, C. (2019). Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances*, 5(1), eaat4858.

Araújo, M. B., y New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in ecology & evolution*, 22(1), 42-47.

Austin, M. P. (2002). Spatial prediction of species distribution: an interface between ecological theory and statistical modelling. *Ecological modelling*, 157(2-3), 101-118.

Avon, C., & Bergès, L. (2016). Prioritization of habitat patches for landscape connectivity conservation differs between least-cost and resistance distances. *Landscape Ecology*, 31(7), 1551–1565. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0336-8>.

Bennett, V. J. (2017). Effects of road density and pattern on the conservation of species and biodiversity. *Current Landscape Ecology Reports*, 2(1), 1-11.

Birkmann, J., Jamshed, A., McMillan, J. M., Feldmeyer, D., Totin, E., Solecki, W., ... y Alegría, A. (2022). Understanding human vulnerability to climate change: A global perspective on index validation for adaptation planning. *Science of The Total Environment*, 803, 150065.

Bouroncle, C., Imbach, P., Rodríguez-Sánchez, B., Medellín, C., Martínez-Valle, A., y Läderach, P. (2017). Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. *Climatic Change*, 141(1), 123-137.

Brun, P., Thuiller, W., Chauvier, Y., Pellissier, L., Wüest, R. O., Wang, Z., y Zimmermann, N. E. (2020). Model complexity affects species distribution projections under climate change. *Journal of Biogeography*, 47(1), 130-142.

Bruno Soares, M., S. Gagnon, A., y M. Doherty, R. (2012). Conceptual elements of climate change vulnerability assessments: a review. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 4(1), 6-35.

Castellanos-Acuña, D., R. Lindig-Cisneros, and C. Sáenz-Romero (2015). Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6(1):2.

Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., y Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026.

Coetzee, B. W., Robertson, M. P., Erasmus, B. F., Van Rensburg, B. J., y Thuiller, W. (2009). Ensemble models predict Important Bird Areas in southern Africa will become less effective for conserving endemic birds under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 18(6), 701-710.

Collingham, Y. C., y Huntley, B. (2000). Impacts of habitat fragmentation and patch size upon migration rates. *Ecological Applications*, 10(1), 131-144.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2021). Herramienta para la elaboración de Programas de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas, Segunda Edición. México.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), s/f. *Pinus cembroides* Zucc. Comisión Forestal Nacional Recuperado de: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/955Pinus%20cembroides.pdf>.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT) (2022). Programa Estatal de Manejo del Fuego 2022. Comisión Nacional Forestal, Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Sistema Estatal de Protección Civil. 50 páginas.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Estado que Guarda el Sector Forestal en México 2019. Comisión Forestal Nacional. 414 páginas.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Diagnóstico Fitosanitario del Estado de Puebla. Comisión Nacional Forestal. 23 páginas.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). Programa Anual de Trabajo 2021. Comisión Nacional Forestal. 222 páginas. Recuperado de: https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2021/PAT_2021_CONAFOR.pdf.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). Sitio web Datos del inventario. Principales Indicadores Forestales (Ciclo 2015-2020). Comisión Forestal Nacional <https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/>.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022a). Programa Anual de Trabajo 2022. Comisión Nacional Forestal. 196 páginas. Recuperado de: https://www.conafor.gob.mx/transparencia/docs/2022/Programa_Anual_de_Trabajo_2022.pdf.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022b). Listado de Predios con certificaciones forestales. Comisión Nacional Forestal. Recuperado de: <https://snif.cnf.gob.mx/download/listado-de-predios-con-certificaciones-forestales/>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2022). Sitio web Ecosistemas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex>.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (2011). La Biodiversidad en Puebla: Estudio de Estado. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Gobierno del Estado de Puebla, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 440 páginas.

CONANP y PNUD México (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2020). Resumen Ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático de la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/579938/PACC_RB_Tehuac_n-Cuicatlán.pdf.

Consejo Estatal de Población (COESPO), (2022). Perfil sociodemográfico de los Pueblos Indígenas en Puebla. Consejo Estatal de Población-Gobierno del Estado de Puebla-Secretaría de Gobernación del Estado de Puebla-Dirección General de Tenencia de la Tierra y Población. Puebla, México. 30 páginas.

Defosse, E., Pitteloud, C., Descombes, P., Glauser, G., Allard, P. M., Walker, T. W., ... y Rasmann, S. (2021). Spatial and evolutionary predictability of phytochemical diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(3), e2013344118.

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... y Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46.

Evans, J., S. (2021). spatialEco. R package version 1.3-6.

Fick, S. E., y Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International journal of climatology*, 37(12), 4302-4315.

Fitzpatrick, M. C., & Dunn, R. R. (2019). Contemporary climatic analogs for 540 North American urban areas in the late 21st century. *Nature communications*, 10(1), 1-7.

Flowers, B., Huang, K. T., y Aldana, G. O. (2020). Analysis of the habitat fragmentation of ecosystems in Belize using landscape metrics. *Sustainability*,

Foden, W. B., Butchart, S. H., Stuart, S. N., Vié, J. C., Akçakaya, H. R., Angulo, A., ... y Mace, G. M. (2013). Identifying the world's most climate change vulnerable

species: a systematic trait-based assessment of all birds, amphibians and corals. PloS one, 8(6), e65427. 12(7), 3024.

Foden, W. B., Young, B. E., Akçakaya, H. R., Garcia, R. A., Hoffmann, A. A., Stein, B. A., ... y Huntley, B. (2019). Climate change vulnerability assessment of species. Wiley interdisciplinary reviews: climate change, 10(1), e551.

Forzieri, G., Girardello, M., Ceccherini, G., Spinoni, J., Feyen, L., Hartmann, H., ... y Cescatti, A. (2021). Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. Nature communications, 12(1), 1-12.

Gobierno de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). México: Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 1990-2019. Publicado por Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, CDMX, México. pág 122-124. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/737226/156_2022_INEGYCEI_1990-2019_NIR.pdf.

Gobierno de Puebla, 2019. Programa Estatal de Cuidado Ambiental y Atención al Cambio Climático. Gobierno de Puebla. Páginas 145-146. Recuperado de: <https://planeader.puebla.gob.mx/pdf/ProgramasEspeciales2020/05%20Programa%20Especial%20Cuidado%20Ambiental%20y%20Atenci%C3%B3n%20al%20Cambio%20Climatico.pdf>.

Graae, B. J., Vandvik, V., Armbruster, W. S., Eiserhardt, W. L., Svenning, J. C., Hylander, K., ... y Lenoir, J., (2018). Stay or go—how topographic complexity influences alpine plant population and community responses to climate change. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 30, 41-50.

Guisan, A., Thuiller, W., y Zimmermann, N. E., (2017). Habitat suitability and distribution models: with applications in R. Cambridge University Press.

Guitérrez, E., y Trejo, I., (2014). Efecto del cambio climático en la distribución potencial de cinco especies arbóreas de bosque templado en México. Revista mexicana de biodiversidad, 85(1), 179-188.

Gumel, D. Y. (2022). Assessing climate change vulnerability: A conceptual and theoretical review. *Journal of Sustainability and Environmental Management*, 1(1), 22-31.

Gustafson, E. J., y Parker, G. R., (1994). Using an index of habitat patch proximity for landscape design. *Landscape and urban planning*, 29(2-3), 117-130.

Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global environmental change*, 19(2), 240-247.

Hoffmann, S., y Beierkuhnlein, C. (2020). Climate change exposure and vulnerability of the global protected area estate from an international perspective. *Diversity and Distributions*, 26(11), 1496-1509.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). Red Nacional de Caminos (RNC) 2021. Sistema Nacional de Estadística y Geográfica. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IPCC. (2007). *Climate Change. Impact, Adaptation and Vulnerability. Fourth Assessment Report (AR4)*.

Joyce, L. A., y Coulson, D. P. (2020). *Climate scenarios and projections: A technical document supporting the USDA Forest Service 2020 RPA Assessment*.

Kling, M. M., Auer, S. L., Comer, P. J., Ackerly, D. D., y Hamilton, H. (2020). Multiple axes of ecological vulnerability to climate change. *Global Change Biology*, 26(5), 2798-2813.

Kumar, M., Kalra, N., Singh, H., Sharma, S., Rawat, P. S., Singh, R. K., ... y Ravindranath, N. H. (2021). Indicator-based vulnerability assessment of forest ecosystem in the Indian Western Himalayas: An analytical hierarchy process integrated approach. *Ecological Indicators*, 125, 107568.

Lutz, A. F., ter Maat, H. W., Biemans, H., Shrestha, A. B., Wester, P., y Immerzeel, W. W. (2016). Selecting representative climate models for climate change

impact studies: an advanced envelope-based selection approach. *International Journal of Climatology*, 36(12), 3988-4005.

LX Legislatura del Honorable Congreso del Estado de Puebla (2019). Acuerdo ÚNICO.- Se exhorta respetuosamente al Titular del Poder Ejecutivo del Estado Libre y Soberano de Puebla para que a través de las Secretaría de Desarrollo Rural y la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial, realicen un Programa Estatal Integral de Reforestación, con el propósito de incluir en dicho programa la selección de árboles padre; la recolección de semillas nativas de la región correspondiente; la creación de un banco de germoplasma; la instalación de viveros con capacidad mínima de un millón de especies; la creación de cortinas forestales; la selección de áreas de exclusión; mismas que se deberán llevar a cabo en cada una de las 22 Regiones para el desarrollo planteado por el Gobierno del Estado con el objeto de contribuir al Desarrollo Rural Regional Sustentable. LX Legislatura del Honorable Congreso del Estado de Puebla a 28 de octubre de 2019. Recuperado de: https://www.congresopuebla.gob.mx/index.php?option=com_k2&view=item&task=download&id=32201.

Maffi, Luisa, (2005). Linguistic, Cultural and Biological Diversity. *Annu. Rev. Anthropol.* 2005.34:599-617.

Magness, D. R., Morton, J. M., Huettmann, F., Chapin III, F. S., y McGuire, A. D. (2011). A climate-change adaptation framework to reduce continental-scale vulnerability across conservation reserves. *Ecosphere*, 2(10), 1-23.

Malakoutikhah, S., Fakheran, S., Hemami, M. R., Tarkesh, M., y Senn, J. (2018). Altitudinal heterogeneity and vulnerability assessment of protected area network for climate change adaptation planning in central Iran. *Applied geography*, 92, 94-103.

Mansourian, S., Belokurov, A., y Stephenson, P. J. (2009). The role of forest protected areas in adaptation to climate change. *Unasylva*, 60(231-232), 63-69.

McGarigal, K., y Marks, B. J. (1995). Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351*. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1-122.

McGuire, J. L., Lawler, J. J., McRae, B. H., Nuñez, T. A., Theobald, D. M., (2016), 'Achieving climate connectivity in a fragmented landscape', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113: 7195-7200.

Mod, H. K., Scherrer, D., Luoto, M., y Guisan, A. (2016). What we use is not what we know: environmental predictors in plant distribution models. *Journal of Vegetation Science*, 27(6), 1308-1322.

Naimi, B., Hamm, N. A., Groen, T. A., Skidmore, A. K., y Toxopeus, A. G. (2014). Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling?. *Ecography*, 37(2), 191-203.

Nissan, H., Goddard, L., de Perez, E. C., Furlow, J., Baethgen, W., Thomson, M. C., y Mason, S. J. (2019). On the use and misuse of climate change projections in international development. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(3), e579.

Oliver, T.H.; Heard, M.S.; Isaac, N.J.B.; Roy, D.B.; Procter, D.; Eigenbrod, F.; Freckleton, R.; Hector, A.; Orme, D.L.; Petchey, O.L.; Proença, V.; Raffaelli, D.; Suttle, K.B.; Mace, G.M.; Martín-López, B.; Woodcock, B.A.; Bullock, J.M. (2015). Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol.30, Issue11, Pages 673-684. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2015.08.009>

Parry, M., Parry, M. L., Canziani, O., Palutikof, J., Van der Linden, P., y Hanson, C. (Eds.). (2007). *Climate change 2007-impacts, adaptation and vulnerability: Working group II contribution to the fourth assessment report of the IPCC*. Cambridge University Press.

Pecchi, M., Marchi, M., Burton, V., Giannetti, F., Moriondo, M., Bernetti, I., ... y Chirici, G. (2019). Species distribution modelling to support forest management. A literature review. *Ecological Modelling*, 411, 108817.

Pokhriyal, P., Rehman, S., Areendran, G., Raj, K., Pandey, R., Kumar, M., ... y Sajjad, H. (2020). Assessing forest cover vulnerability in Uttarakhand, India using analytical hierarchy process. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 821-831.

Preston, B. L., Yuen, E. J., y Westaway, R. M. (2011). Putting vulnerability to climate change on the map: a review of approaches, benefits, and risks. *Sustainability science*, 6, 177-202.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Regos, A., Clavero, M., D'Amen, M., Guisan, A., y Brotons, L. (2018). Wildfire–vegetation dynamics affect predictions of climate change impact on bird communities. *Ecography*, 41(6), 982-995.

Russell, D. J., Wanless, S., Collingham, Y. C., Huntley, B., y Hamer, K. C. (2015). Predicting future European breeding distributions of British seabird species under climate change and unlimited/no dispersal scenarios. *Diversity*, 7(4), 342-359.

Sáenz-Romero, Cuauhtémoc, Lindig-Cisneros, Roberto A., Joyce, Dennis G., Beaulieu, Jean, St. Clair, J. Bradley, & Jaquish, Barry C., (2016). Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 22(3), 303-323.

Salafsky, N. and Wollenberg, E. (2000) Linking Livelihoods and Conservation: A Conceptual Framework and Scale for Assessing the Integration of Human Needs and Biodiversity. *World Development*, 28, 1421-1438. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-750X\(00\)00031-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-750X(00)00031-0)

San José R., Pérez J.L., González R.M., Pecci J., Garzón A., y Palacios M. (2016). Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Volume 293. 192-207 pp. ISSN 0377-0427. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.024>

Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial (SMADSOT). (2022). Estrategia Estatal de Cambio Climático 2021-2030. Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial, Gobierno del Estado de Puebla, Secretaría de Gobernación. 117 páginas. Recuperado de: <https://smadsot.puebla.gob.mx/cambio-climatico-y-ciudades-inteligentes/2-uncategorised/31-estrategia-estatal-de-cambio-climatico-2021-2030>.

Senior, R. A., Hill, J. K., y Edwards, D. P. (2019). Global loss of climate connectivity in tropical forests. *Nature Climate Change*, 9(8), 623-626.

Sheldon, K. S. (2019). Climate change in the tropics: ecological and evolutionary responses at low latitudes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50(1), 303-333.

Sormunen, H., Virtanen, R., y Luoto, M. (2011). Inclusion of local environmental conditions alters high-latitude vegetation change predictions based on bioclimatic models. *Polar Biology*, 34(6), 883-897.

Srivastava, V., Lafond, V., y Griess, V. C. (2019). Species distribution models (SDM): applications, benefits and challenges in invasive species management. *CABI Reviews*, (2019).

Thorne, J. H., Boynton, R. M., Holguin, A. J., Stewart, J. A., y Bjorkman, J. (2016). A climate change vulnerability assessment of California's terrestrial vegetation. California Department of Fish and Wildlife, Sacramento, CA.

Thorne, J. H., Choe, H., Stine, P. A., Chambers, J. C., Holguin, A., Kerr, A. C., y Schwartz, M. W. (2018). Climate change vulnerability assessment of forests in the Southwest USA. *Climatic Change*, 148(3), 387-402.

Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., y Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: a review. *Global change biology*, 20(11), 3313-3328.

Thuiller, W., Lafourcade, B., Engler, R., y Araújo, M. B. (2009). BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 32(3), 369-373.

Thuiller, W., Lavorel, S., y Araújo, M. B. (2005). Niche properties and geographical extent as predictors of species sensitivity to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 14(4), 347-357.

Valavi, R., Guillera-Aroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., y Elith, J. (2022). Predictive performance of presence-only species distribution models: a benchmark study with reproducible code. *Ecological Monographs*, 92(1), e01486.

Weißhuhn, P. (2019). Indexing the vulnerability of biotopes to landscape changes. *Ecological Indicators*, 102, 316-327.

Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Gershunov, A., Guzman-Morales, J., Bishop, D. A., Balch, J. K., y Lettenmaier, D. P. (2019). Observed impacts of anthropogenic climate change on wildfire in California. *Earth's Future*, 7(8), 892-910.

Wotton, B. M., Flannigan, M. D., y Marshall, G. A. (2017). Potential climate change impacts on fire intensity and key wildfire suppression thresholds in Canada. *Environmental Research Letters*, 12(9), 095003.

Wu, C., Venevsky, S., Sitch, S., Mercado, L., y Huntingford, C. (2018). Modelled global wildfire patterns induced by climate change. In EGU General Assembly Conference Abstracts 20, 3942.

Xu, C., Liu, H., Anenkhonov, O. A., Korolyuk, A. Y., Sandanov, D. V., Balsanova, L. D., ... y Wu, X. (2017). Long-term forest resilience to climate change indicated by mortality, regeneration, and growth in semiarid southern Siberia. *Global Change Biology*, 23(6), 2370-2382.

Zhang, L., Huettmann, F., Liu, S., Sun, P., Yu, Z., Zhang, X., y Mi, C. (2019). Classification and regression with random forests as a standard method for presence-only data SDMs: A future conservation example using China tree species. *Ecological Informatics*, 52, 46-56.

Zhu, G. P., y Peterson, A. T. (2017). Do consensus models outperform individual models? Transferability evaluations of diverse modeling approaches for an invasive moth. *Biological Invasions*, 19(9), 2519-2532.