

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Análisis Multitemporal de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Por:

ALONDRA LIZBETH PALACIOS CARRILLO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Análisis Multitemporal de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca.

Por:

ALONDRA LIZBETH PALACIOS CARRILLO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

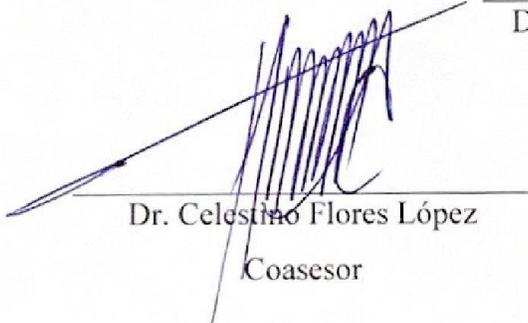
INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría



Dr. Rufino Sandoval García

Asesor Principal



Dr. Celesino Flores López
Coasesor



Dr. Jorge Méndez González
Coasesor



Dr. Alberto Sandoval Rangel
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Junio, 2024

DECLARACIÓN NO PLAGIO

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante



Palacios Carrillo Alondra Lizbeth
Matricula: 41193483
Carrera: Ingeniero Forestal

En el presente estudio de tesis llamado Análisis Multitemporal De La Reserva De La Biosfera mariposa Monarca no fue financiado por la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, el proyecto estuvo a cargo del profesor investigador Dr. Rufino Sandoval García.

DEDICATORIA

A mis padres:

A mis queridos padres, al señor Juan Manuel Palacios Lázaro †, por darme la vida y transmitirme los valores que han forjado mi fortaleza interior; a la señora Teresa Carrillo Cortés, en especial, por su amor incondicional, su constante apoyo y su comprensión infinita. Con su dedicación, esfuerzo y entrega, ha sido mi roca y mi guía a lo largo de toda mi carrera académica, siendo la principal inspiración detrás de este logro.

A mis amados hermanos, Horacio Manuel Palacios Carrillo, Juan Carlos Palacios Carrillo y Cornelio Palacios Carrillo, quienes me han brindado su apoyo incondicional y han compartido conmigo este camino lleno de retos y aprendizajes.

Dedico este logro a mis amadas tías, Brígida Gloria Palacios Lázaro y Martha Carrillo Cortés, Luz María Carillo Cortes cuyo constante apoyo y aliento han sido una luz guía en mi vida. Gracias por estar siempre a mi lado, por compartir sus sabias palabras y por brindarme su amor incondicional. Este logro es también suyo, y lo celebro con profundo agradecimiento por todo lo que han hecho por mí.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por su constante aliento y por ser mi fuente inagotable de inspiración. Este logro también les pertenece, pues han sido parte fundamental de mi trayectoria. Con todo mi amor y gratitud, esta tesis está dedicada a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A Dios: En primer lugar, deseo expresar mi profunda gratitud a Dios por haberme brindado la oportunidad de venir a este mundo y por permitirme disfrutar de buena salud. Agradezco por haberme otorgado una familia maravillosa, quienes han sido el pilar fundamental en mi vida y quienes siempre me han motivado a alcanzar mis sueños.

A mis padres: Quiero dedicar un agradecimiento especial a mis queridos padres, cuya dedicación, amor y sacrificio han sido fundamentales en mi formación como persona. Gracias por inculcarme valores sólidos y por guiarme con sabiduría en cada paso que he dado. Su ejemplo y apoyo incondicional han sido mi mayor inspiración y fortaleza a lo largo de este camino.

A la universidad: Agradezco profundamente a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por proporcionarme un entorno educativo enriquecedor y estimulante. Los recursos, instalaciones y programas académicos ofrecidos por esta institución han sido de gran valor para mi formación personal como profesional a lo largo de mi carrera, de la misma manera porque, he tenido la fortuna de abrir puertas hacia nuevas oportunidades y de explorar lugares que nunca imaginé conocer. Su compromiso con la formación integral de sus estudiantes me ha permitido expandir mis horizontes, tanto a nivel académico como personal, y ha enriquecido mi vida de innumerables maneras.

En particular, deseo destacar el invaluable aporte del Dr. Rufino Sandoval Gracia, mi asesor de tesis. Su experiencia, sabiduría y guía experta han sido indispensables para el desarrollo y culminación de este proyecto. Agradezco su paciencia, sus consejos y su constante apoyo, que han sido cruciales en cada etapa del proceso de investigación y redacción de esta tesis.

También quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis estimados maestros, especialmente a mis coasesores de tesis el Dr. Celestino Flores López y Dr. Jorge Méndez Gonzáles, cuya dedicación, conocimiento y orientación han sido fundamentales en mi

formación académica. Gracias a su compromiso y apoyo, he podido adquirir los conocimientos necesarios para alcanzar mis metas y enfrentar los desafíos que se me han presentado en el camino.

A mis amigos: De la misma manera con gratitud y aprecio hacia aquellos que me acompañaron en este viaje de descubrimiento y aprendizaje, dedicó esta tesis por su constante apoyo y comprensión; a mis profesores, por su guía y sabiduría impartida; y a mis compañeros hermanos de la casa #851 B principalmente a Alan Alejandro Loyola Rincón, Dilan Nieves Juárez, Johan Rafael Cruz, Luz Elena Soto Vargas, Sergio Armando Bonilla Jiménez †, Natividad Carrizosa Velasco por su aliento y ánimo inquebrantable, por esas desveladas. Este trabajo es el fruto de esfuerzo colectivo y refleja el compromiso y dedicación de todos aquellos que han sido parte de mi camino académico. Gracias por ser parte de este logro.

Asimismo, quiero expresar mi reconocimiento a todos mis familiares, Gloria María Guadalupe Galindo Hernández, Claudia Lázaro Palacios, Celene Guadalupe Huerta Vázquez, Jazmín Cruz Aguilar, Alicia Jocelyn Chávez Gonzales, quienes han estado presentes en cada momento importante de mi vida, brindándome su cariño y aliento. Su apoyo ha sido invaluable y ha contribuido en gran medida a mi crecimiento personal y académico.

Índice de contenido

Índice de figuras.....	x
Índice de tablas	xi
Resumen.....	xii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Áreas Naturales protegidas	5
2.2. Reserva de la Biosfera mariposa Monarca.....	6
2.3. Ecosistemas presentes en la RBMM.....	6
2.4. Importancia ecológica de la RBMM.....	6
2.5. Amenazas de la RBMM.....	7
2.6. Tala ilegal.....	8
2.7. Incendios Forestales.....	8
2.8. Plagas y enfermedades.....	9
2.9. Sistemas de Información Geográfica	11
2.10. Análisis multitemporal.....	11
2.11. Imágenes de alta resolución	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1. Ubicación del área de estudio	14
3.2. Adquisición de imágenes	15
3.3. Pre-procesamiento de las imágenes	16
3.4. Clasificación digital	16
3.5. Validación de información.....	17

3.6.	Tasa de deforestación anual.	17
3.7.	Tasa de cambio.....	18
4.	RESULTADOS	19
4.1.	Ortomosaicos de la Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca.	19
4.2.	Clasificación del uso de suelo y vegetación de la RBMM en el año 1994, año 2008, año 2014, año 2023.....	20
4.3.	Detección de deforestación anual de cobertura y uso de suelo agricultura y vegetación secundaria.	21
4.4.	Tasas de cambio, aumento o pérdida de cobertura vegetal y de uso de suelo, Agricultura y vegetación secundaria.....	23
4.5.	Pérdida de cobertura Forestal en ecosistemas de la RBMM durante el periodo de 1994 a 2023.....	25
4.6.	Distribución de las especies de importancia ecológica de la mariposa Monarca. .	28
5.	DISCUSIÓN.....	30
6.	CONCLUSIONES.....	35
7.	RECOMENDACIONES	37
8.	LITERATURA CITADA.....	38

Índice de figuras

Figura 1. Localización de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca (RBMM).....	14
Figura 2. Ortofotos de la RBMM en los años 1994 (A), 2008 (B), 2014 (C), 2023 (D).....	19
Figura 3. Uso de suelo y vegetación de la RBMM en los periodos 1994 (A), 2008 (B), 2014 (C), 2023 (D)	20
Figura 4. Tasa de cambio, Agricultura (A) Vegetación secundaria (B)	24
Figura 5. Superficie pérdida total en % en los años 1994 a 2023.....	27

Índice de tablas

Tabla 1. Cambios en la cobertura del suelo de agricultura del 1994 al 2023 en la RBMM.	21
Tabla 2. Cambios en la cobertura del suelo de vegetación secundaria del 1994 al 2023 en la RBMM	22
Tabla 3. Superficie total de vegetación forestal en hectáreas, pérdida en el periodo de 1994 al 2023.....	25
Tabla 4. Provincias y Áreas Naturales protegidas donde hay presencia de las especies de importancia ecológica.....	29

Resumen

La Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca (RBMM) se caracteriza por ser una región boscosa con microecosistemas mixtos de Bosque de Encino, Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque Mesófilo de Montaña, Encino-Pino, Pastizal y Pino-Encino, los cuales generan bienes y servicios ambientales, como el almacenamiento de agua, la captura de carbono y el refugio crucial para la migración anual de millones de mariposas Monarca; sin embargo, está sujeto a impactos preocupantes con patrones de cambio en la cobertura forestal, con fines de agricultura y deforestaciones alarmantes, convirtiéndose en ecosistemas cruciales para la biodiversidad. El objetivo de la presente investigación, fue determinar la dinámica del cambio de uso de suelo y vegetación, mediante un análisis multitemporal con imágenes satelitales de alta resolución, se empleó una metodología basada en la adquisición de imágenes para generar cuatro ortomosaicos, seguidos de la rectificación con de puntos de control y corrección geométrica utilizando la proyección WGS84 Zona 14 N. Para cálculo de la concordancia y precisión de los resultados, se clasificaron las imágenes satelitales de alta resolución utilizando el módulo r.kappa, obteniendo una matriz de error y se determinó el índice de Kappa. Para estimar la tasa de deforestación, se aplicó la ecuación propuesta por Puyravaud (2003), mientras que la tasa de cambio se calculó utilizando la ecuación de la FAO (1996) adaptada por Palacio-Prieto *et al.* (2004). Estos métodos permitieron una evaluación precisa y confiable de los cambios en la cobertura forestal. Los resultados indican que los ecosistemas presentes en la RBMM están experimentando cambios altamente relevantes. Por una parte, los Bosques de Pino perdió más del 50%, el Bosque Mesófilo de Montaña más del 25 % de su cobertura original, no obstante, el Bosque de Encino, ha perdido más del 60%, que posee una pérdida de cobertura total de 86.68 % en relación al porcentaje por ecosistema, pero a nivel reserva el que ha perdido mayor cobertura es el Bosque de Oyamel, y Bosque de Pino-Encino. En cuanto a las Áreas críticas para priorizar son; El Tepozteco, La Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, Corredor Biológico Chichinautzin, Sierra de Manantlán, Sierra Gorda. Esta situación se agrava por los disturbios en tendencia, comprometiendo su integridad ecológica y poniendo en riesgo su sostenibilidad en las próximas décadas, por esta razón recomiendo la reforestación a gran escala, complementada con redes de niebla, la mezcla de especies que desempeñan funciones complementarias, sembrar suelo y la micorrización entre especie.

Palabras clave: microecosistemas, cobertura forestal, deforestación, ecosistemas, Áreas prioritarias.

Abstract

The Monarch Butterfly Biosphere Reserve (RBMM) is characterized by being a forested region with mixed microecosystems of Oak Forest, Oyamel Forest, Pine Forest, Mountain Cloud Forest, Oak-Pine, Grassland and Pine-Oak. which generate environmental goods and services, such as water storage, carbon sequestration, and crucial refuge for the annual migration of millions of Monarch butterflies; However, it is subject to worrying impacts with patterns of change in forest cover, for agricultural purposes and alarming deforestations, becoming crucial ecosystems for biodiversity. The objective of this research was to determine the dynamics of land use and vegetation change, through a multi-temporal analysis with high-resolution satellite images. A methodology based on image acquisition was used to generate four orthomosaics, followed by rectification. with control points and geometric correction using the WGS84 Zone 14 N projection. To calculate the agreement and precision of the results, the high resolution satellite images were classified using the r.kappa module, obtaining an error matrix and determining the Kappa index. To estimate the deforestation rate, the equation proposed by Puyravaud (2003) was applied, while the rate of change was calculated using the FAO equation (1996) adapted by Palacio-Prieto et al. (2004). These methods allowed an accurate and reliable assessment of changes in forest cover. The results indicate that the ecosystems present in the RBMM are experiencing highly relevant changes. On the one hand, the Pine Forests lost more than 50%, the Mountain Cloud Forest more than 25% of its original coverage, however, the Oak Forest has lost more than 60%, which has a loss of total coverage. of 86.68% in relation to the percentage by ecosystem, but at the reserve level the one that has lost the most coverage is the Oyamel Forest, and the Pino-Encino Forest. Regarding the critical areas to prioritize are; El Tepozteco, The Necaxa River Hydrographic Basin, Chichinautzin Biological Corridor, Sierra de Manantlán, Sierra Gorda. This situation is aggravated by the disturbances in trend, compromising its ecological integrity and putting its sustainability at risk in the coming decades, for this reason I recommend large-scale reforestation, complemented with mist nets, the mixture of species that perform complementary functions, sowing soil and mycorrhization between species.

Keywords: microecosistemas, forest cover, deforestation, ecosystems, priority areas

1. INTRODUCCIÓN

La mariposa Monarca (*Danaus plexippus L.*) es una especie lepidóptera que atraviesa parte del continente americano dos veces al año como parte de su ciclo reproductivo, recorre extensas distancias de más de 4,000 km, migrando desde el sur Canadá, a través de los Estados Unidos de América, hasta llegar a territorios de Mexicanos, (Casas-Fernández 2009), debido a que los días se acortan y sus temperaturas aumentan, buscando sus sitios de reproducción se dirigen y se establecen en los bosques situados en el estado de México y Michoacán (Alonso y Arellano 1989).

Desde tiempos remotos, su comportamiento ha sido objeto de interés y admiración por parte de los habitantes de las regiones por las que transita, quienes han observado con asombro y respeto su almirante travesía (Pérez y Hernández-Apolinar, 2004).

En nuestro país, desde la década de 1930 se comenzó a inspirar el tema de la mariposa Monarca, gracias al Dr. Urquhart siendo el pionero de las primeras consultas en estudios para comprender cuál era el ciclo de migración de la mariposa Monarca (Casas-Fernández 2009), es crucial destacar que la mariposa Monarca en el 2010 se declaró en estatus de riesgo por la (SEMARNAT, 2010) a través de la NOM-059-SEMARNAT.

Sin embargo, fue en 1980 cuando las autoridades decretaron la protección de la mariposa Monarca sin registrar la superficie a resguardar, en 1986 se decretó la Reserva Especial de la Biosfera mariposa Monarca (REBMM), decretaron 16,110 ha incluyendo cinco áreas de conservación, en 1996 se suspendió la REBMM posterior a esto paso a nombrarse Área Natural Protegida de la mariposa Monarca, finalmente a partir del año 2000 se decretó como Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca considerándose así hasta la actualidad (López-García, 2013; Góngora-Sansón, 2020)

Esta especie tiene un ciclo de reproducción que comprende de 4 etapas; las cuales son (huevos, larvas, pupas y adultos), estas etapas evolutivas progresan con mayor celeridad en ambientes templados en donde encuentran las condiciones óptimas de temperatura y

humedad para sobrevivir al invierno (Rendón-Salinas y Tavera-Alonso, 2013) en este sentido, los Bosques Mesófilos de Montaña, ubicados en cañadas y laderas, son especialmente relevantes debido a la presencia de materiales como ceniza volcánica y pumíticos, los cuales tienen la capacidad de retener numerosas cantidades de agua, estas características son esenciales para la mariposa Monarca, los factores determinantes de esta especie son; los Bosques de Oyamel que se caracteriza por la predominancia de *Abies religiosa* para su hibernación (López- García, 2013) y algodoncillo (*Asclepia curassavica*) para su alimentación, estas deben de estar en las mejores condiciones para el invierno (Islas-Báez *et al.*, 2015)

Durante su migración al centro de México, la mariposa Monarca se distribuye en diferentes regiones, incluyendo el noreste en las Sierras de San Andrés y Mil Cumbres en Michoacán, el norte, en el cerro de Altamirano y en el centro en las Sierra Chincua y Campanario (CONABIO, 2023), sin embargo, donde existe mayor distribución es en la zona Núcleo de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca.

Esta es una región boscosa que posee microecosistemas mixtos de Oyamel, Pino, Mesófilo de Montaña, Encino-Pino, Pastizal, y Pino-Encino, se observan áreas fragmentadas algunas de las cuales están presentando procesos de deterioro significativos, estos ecosistemas son de gran importancia, de manera que en sus partes más altas de estos predios se encuentran Bosques de Oyamel (Pérez y Hernández-Apolinar, 2004)

La RBMM cuenta con zona núcleo y zona de amortiguamiento, en la primera no se permite la intervención humana, con excepción de actividades de investigación científica y ecoturismo, en la zona de amortiguamiento puede haber manejo forestal controlado, lo cual permite a las comunidades locales aprovechar sus recursos naturales (CONANP, 2001).

Sin embargo, a pesar de que la RBMM es un área protegida, presenta altas tasas de degradación de sus bosques, de 1986 a 2012, los bosques densos disminuyeron más del 70 % de cobertura de copa, fueron perturbados a tasas entre -0.2 hasta -2.4 % anualmente (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

Existen factores los cuales son causantes del deterioro de los ecosistemas alrededor del mundo; por una parte, estos impactos son originados principalmente por actividades antropogénicas, como la tala ilegal, cambio de uso de suelo, incendios intencionados entre otros, (Carlón-Allende *et al.*, 2015) atribuyendo a esto malas prácticas de manejo forestal o agrícola, desorganización, desigualdades sociales, acuerdos, que impactan de manera negativa los recursos naturales (Salas-Canela, 2013).

Por otro lado, otros factores que intervienen son eventos climáticos, un ejemplo claro es el cambio climático, vientos fuertes y sequias que afecta los ecosistemas en ocurrencia menor pero no dejan de alterar, sobre todo cuando afectan directamente al hombre, por tal motivo se requiere que se aborden estudios que permitan identificar las causas principales de los procesos de cambio en la cobertura forestal, en escalas de mayor visualización de los espacios geográficos que comprende la RBMM (Carrillo y Gómez, 2001).

Es por ello, que para abordar este tipo de problemáticas, el análisis multitemporal constituye una herramienta importante que permite llevar a cabo el diseño de estrategias y posibilidades de acciones encaminadas a la conservación de la vegetación y los servicios ecosistémicos (Paula *et al.*, 2018), ayuda a dar enfoque específico según el caso del área destinada, teniendo un análisis, reflejando el grado de fragmentación del área por categorías y atributos (Ruiz *et al.*, 2013)

1.1. Objetivo e hipótesis

Objetivos específicos

La presente investigación tiene como objetivo determinar las tasas de cambio de cobertura forestal en La Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, durante el periodo de 1994 al 2023

Determinar la superficie actual de los ecosistemas de la RBMM.

Determinar las tasas de cambio de los ecosistemas de la RBMM durante los años 1994, 2008, 2014 y 2023.

Priorizar áreas de restauración en los ecosistemas de la RBMM.

Establecer estrategias de conservación y restauración del hábitat de la mariposa Monarca.

Hipótesis

Ho: la RBMM ha disminuido más del 50% de su superficie del año 1994 al 2023 de acuerdo a los escenarios predichos de cambio.

Ho: El hábitat de la mariposa Monarca se encuentra fragmentada, poniendo en riesgo su conservación.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Áreas Naturales protegidas

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) son áreas del territorio nacional, sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad humana o que requieren ser preservadas y restauradas, estas áreas están reguladas por el régimen establecido en la ley vigente, con el propósito de garantizar la protección y restauración de sus valores naturales y ecológicos LEGEPA (2024).

A diferencia de otros autores, Paz-Salinas (2008) considera que las ANP son regiones naturales, pero también, regiones sociales y culturales, que comprenden en su interior diversos territorios históricamente construidos a través de distintos procesos y que no han sido perturbados por las actividades humanas.

Estas áreas se dividen en diferentes categorías las cuales son: Reservas de la Biosfera, Parques Nacionales, Áreas de Protección de Flora y Fauna, Áreas de Protección de Recursos Naturales, Monumentos Naturales, Santuarios y Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (CONANP, 2023).

Sin embargo, las ANP se enfrentan una serie de amenazas que comprometen tanto su integridad como la conservación de la biodiversidad que alberga, considerando que los principales factores que afectan son: la deforestación, la urbanización no planificada, la fragmentación del hábitat, la contaminación, la introducción de especies exóticas y el cambio climático, teniendo efectos devastadores en los servicios ecosistémicos que proporcionan las ANP, impactando negativamente la flora y fauna que dependen de ellos (Brenner, 2006).

2.2. Reserva de la Biosfera mariposa Monarca.

La RBMM cuenta con una extensión territorial total de 56, 259 ha, organizadas en tres zonas núcleo que abarcan una superficie conjunta de 13,551 ha. Además, se dispone de una zona de amortiguamiento que cubre un área total de 42,707 ha, este diseño espacial estratégico busca garantizar la protección y conservación adecuada del entorno natural, al tiempo que se promueve un equilibrio entre la preservación ecológica y las actividades humanas (DOF, 2024).

2.3. Ecosistemas presentes en la RBMM.

Los ecosistemas presentes en la RBMM incluyen Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque Mesófilo de Montaña, Bosque de Encino-Pino, Pastizal, y Bosque de Pino-Encino, sin embargo, otros estudios se encontraron Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque de Encino, Bosque de Cedro (CONANP, 2001)

No obstante estos ecosistemas son aprovechados, debido a que está autorizado por la ley forestal con permisos de aprovechamiento en la zona de amortiguamiento (López García, 2013); sin embargo, estudios recientes muestran que más de la mitad de la cobertura forestal conservada que son las zonas núcleo, se ha degradado o perdido y que el remanente de bosque se ha fragmentado, reduciendo de manera significativa la masa forestal, de 27,000 a solo 5,000 ha, (CONANP, 2001) la deforestación se presenta en ejidos y comunidades agrarias, donde ha quedado en manos de contratistas particulares y la venta de los productos forestales, no obstante, uno de los factores que más afecta y se presenta con mayor fragmentación es la tala ilegal (Bray *et al.*, 2007)

2.4. Importancia ecológica de la RBMM

Los Bosques de Oyamel tienen una distribución reducida en México, de forma que estos son importantes, siendo estos los bosques que permiten la migración e hibernación de la mariposa Monarca, despliegan gran importancia en el país debido a sus características

ecológicas, florísticas y por su belleza escénica y los servicios ambientales que proporcionan, destacando su función en la captación y abastecimiento de agua para la población humana (Benítez-Pineda, 2019).

Como lo afirma Araiza-Olivares (2020), estos bosques están experimentando una disminución notable en su extensión, siendo las actividades humanas las principales responsables de este fenómeno, en particular, la extracción ilegal de madera con propósitos comerciales y la conversión de tierras para la agricultura son las dos razones principales que contribuyen a esta reducción.

Además, es importante destacar que estas masas forestales poseen una alta concentración de carbono (C), lo cual resalta la importancia de su conservación (Bolaños-González *et al.*, 2017).

Sin embargo, debido a la acelerada tasa de deforestación que se ha experimentado en los últimos años en México, así como el cambio climático y el aumento de la temperatura de forma global, es muy posible que estos bosques se encuentren en peligro (Benítez-Pineda, 2019).

Estos bosques han captado la atención de diversas formas, ya sea por su llamativo follaje o su presencia en las altas montañas, además, su valor económico derivado de la madera, las resinas y el follaje, así como la variabilidad de especies que ha experimentado el grupo en distintos refugios geográficos, han sido motivos de interés, del mismo modo, se ha despertado atención hacia el potencial impacto del cambio climático en esta comunidad vegetal (Cuevas-Guzmán *et al.*, 2011).

2.5. Amenazas de la RBMM.

Las amenazas en RBMM son factores de ocurrencia de un fenómeno físico, natural o provocado por el hombre (Cardona, 1993) que ponen en peligro la integridad del ecosistema y la supervivencia de las mariposas, estas amenazas incluyen actividades antropogénicas

como la deforestación, la agricultura intensiva, el cambio climático, incendios forestales, plagas y enfermedades, el turismo no regulado, y la expansión urbana (Báez Islas, 2012).

2.6. Tala ilegal

Como lo menciona Vidal *et al.* (2013) hasta el 2009 la tala ilegal tuvo un impacto significativo en las zonas centrales de la RBMM, teniendo como principal causa la tala a gran escala, enfocando la mayoría de los esfuerzos de aplicación de la ley y vigilancia por parte de las autoridades federales y estatales, entre 2001 y 2012, un total de 2179 ha de bosque en las zonas núcleo sufrieron afectadas, con 1254 hectáreas deforestadas y 925 hectáreas degradadas.

Entre 2001 y 2009, la tala ilegal a gran escala se concentró en varias comunidades, incluyendo Crescencio Morales, Nicolás Romero en el ejido, en la comunidad indígena Francisco Serrato en Michoacán, así como en el ejido La Mesa en el Estado de México, la deforestación y degradación total en las zonas centrales fue particularmente significativa en Crescencio Morales, representando el 45% (Rendón-Salinas 2012).

Es por ello que la tala es la posible principal causa de la reducción de las poblaciones de mariposas Monarca en la Reserva, No obstante, la tala ilegal en pequeña escala y sin control, destinada a subsistir, afecta una gran parte de los bosques teniendo un impacto grave en las zonas centrales (Vidal *et al.*, 2013).

Es por ello que los riesgos a largo plazo asociados con este efecto incluyen una mayor susceptibilidad a los incendios forestales (Broadbent *et al.*, 2008) debido a que la tala ilegal puede llevar a una mayor vulnerabilidad a los incendios (Cochrane, 2001).

2.7. Incendios Forestales.

Los incendios forestales son uno de los siniestros que más afectan los servicios ecosistémicos, los recursos naturales y las poblaciones de flora y fauna silvestre, además a la

arquitectura del paisaje (Farfán-Gutiérrez *et al.*, 2018) cabe destacar que las entidades federativas con mayor cantidad de incendios son; México, Ciudad de México, Michoacán, Chihuahua, Jalisco, es decir los estados que comparte la RBMM se encuentra en Top 5 de ocurrencia de incendios en el país (CONAFOR, 2024).

La superficie afectada durante la última década, se estiman alrededor de 7,928 ha en el área total de la Reserva, aproximadamente el 27% corresponde a árboles adultos, mientras que el 20% está representado por el renuevo, por otro lado, el 53% restante está compuesto por hierbas, arbustos y pastizales, de tal manera que la mayor incidencia de incendios se presenta en la zona de amortiguamiento (CONANP, 2001).

En las regiones elevadas de la Reserva, donde la mariposa Monarca hiberna, la ocurrencia de incendios es mínima, esto se debe a que los Bosques de Oyamel retienen una gran cantidad de humedad (CONANP, 2001), lo que contribuye a su protección del fuego, sin embargo, el área de amortiguamiento es donde se registra una mayor frecuencia de incendios forestales (Martínez-Meza, 2020) estos efectos ocasionan perturbaciones significativas en el equilibrio natural de los ecosistemas, lo que contribuye al deterioro de los bosques y debilita la salud de los recursos forestales (Martínez-Meza, 2020) es decir debilitan los árboles, facilitando el ataque de plagas y enfermedades y conducen a su muerte, acumulándose así más combustible (Cantú-Fernández, 2013).

2.8. Plagas y enfermedades.

Son factores que provocan daños mecánicos o fisiológicos en los árboles, como deformaciones, reducción en el crecimiento, debilitamiento o incluso la muerte, estos daños generan un impacto considerable en los niveles ecológico, económico y social, afectando los ecosistemas y convirtiéndose en una de las principales causas de desequilibrio en los bosques templados (FAO, 1993).

Sin embargo, entre las principales plagas que llegan a presentarse en toda la RBMM se encuentran: los insectos descortezadores del pino *Dendroctonus mexicanus*, *D. adjunctus*, *D.*

parallelocollis, *D. Valens* e *Ips* spp; el descortezador del Oyamel *Scolytus aztecus* y *Pseudohylesinus variegatus*; los barrenadores de brotes y yemas *Eucosoma sonomana* y, *Rhyacionia frustrana*; la mariposa resinera *Synanthedon cardinalis*; el defoliador del pino *Neodiprion vallicola*; el barrenador del cono *Conophthorus sp.* y plantas parásitas como el muérdago enano *Arcenthobium globosum* y el muérdago verdadero *Psittacanthus spp* (CONANP, 2001).

Los insectos descortezadores, presentes en la RBMM son especies nativas que tienen como hospederos las especies de coníferas dominantes (CONAFOR, 2009), no obstante, los principales organismos que han causado su deterioro son los escarabajos descortezadores: *Scolytus mundus* y *Pseudohylesinus spp.* (Coleoptera: Curculionidae) (Leautaud-Valenzuela y López-García, 2013).

Los factores climáticos tiene bastante correlación en estos aspectos, de manera que los ambientes cálidos y con baja humedad aumentan la probabilidad de infestación y el avance de los insectos en los bosques, al favorecer la actividad, el desarrollo y la supervivencia de estos organismos, sobre todo de los que se alimentan del follaje de las plantas (López-Gómez *et al.*, 2015), sin embargo, citando a López-Gómez *et al.* (2018), se analizaron varios factores ambientales y características del arbolado en distintos sitios, incluyendo temperatura, humedad, precipitación, altitud, exposición, pendiente, altura, cobertura media, edad, densidad y diámetro de los árboles. encontrando una relación poco significativa entre la salud de los árboles y las condiciones meteorológicas, indicando una mínima influencia de estos factores, concluyendo que actividades humanas o interacciones ecológicas con otros organismos podrían tener una relevancia mayor en los Bosques de Oyamel.

Debido a su gran importancia en el país se ha despertado la inquietud por analizar los Bosques de Oyamel, por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Araiza-Olivares, 2020) de manera que se encuentran mapas actuales de la distribución de las comunidades vegetales mexicana, que se encuentran disponibles en formatos digitales a una escala de 1:250.000 (Gámez, 2011).

2.9. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta esencial para relacionar datos con las mismas ubicaciones geográficas, integran hardware, software y datos geográficos para representar visualmente la distribución de recursos y poblaciones, su función principal es capturar, almacenar, manipular, analizar y visualizar información de manera coordinada (SIGSE, 2024).

Los SIG tienen un campo amplio de aplicación, mediante un conjunto de procedimientos sobre una base gráfica o descriptiva, con representaciones reales y gráficas donde puedes obtener mediciones ya sea de su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la Tierra, con esta herramienta se realizan estudios de análisis multitemporal, ya sea de distribución de agua, suelo, planificación urbana y rural, gestión de desastres naturales, cartografía y navegación, seguimiento de poblaciones y movimientos migratorios, estudios ambientales para conservación de biodiversidad, entre muchos más (Rosero-Mier, 2018).

2.10. Análisis multitemporal

Se refiere a un estudio nos permite comparar un periodo para poder determinar uno o más factores, interpretados en imágenes satelitales facilitadas por sitios web gratuitos (Paula *et al.*, 2018), como ortofotos o mapas de un mismo sitio en diferentes tiempos, las cuales nos brinda los cambios de acuerdo a la situación de las coberturas que han sido clasificadas, es decir información cronológica real (Calvo-Obando y Ortiz-Malavassi, 2012) lo que posibilita la identificación y evaluación de cambios tomando en cuenta las principales causas y efectos en los ecosistemas que han sido expuestos a impactos naturales (Paula *et al.*, 2018) obteniendo evolución del medio natural y daños de la acción humana (Chuvieco, 1996).

Sin embargo, los análisis multitemporales más recurrentes se centran en el uso de imágenes Landsat, ya que tienen la ventaja de que abarcan una amplia cobertura histórica, global y multiespectral, sin embargo, también presenta algunas limitaciones en la resolución y algunas presentan cobertura nublada (Rosales-Malpartida y Apaza-Mamani, 2022) para

imágenes Landsat 8 maneja una resolución de: 30 m/píxel; bandas 7, 5, 4; Sentinel 2; 10, 20 y 60 m/ pixel; 13 bandas.

Tal como se evidencia en el estudio titulado "Estimación de la cobertura del dosel en bosques de miombo de Zambia: comparación de imágenes Landsat 8 OLI versus RapidEye utilizando métodos paramétricos, no paramétricos y semiparamétricos" por (Halperin *et al.* 2016), así como en la investigación "Abriendo el archivo: Cómo los datos gratuitos han hecho posible la promesa científica y de monitoreo de Landsat" por Wulder *et al.* (2012).

Las imágenes Landsat dan una valiosa serie de datos que se remonta a 1972, fecha del lanzamiento del primer satélite Landsat 1, y continúa con los siguientes satélites Landsat 7 y 8 (Solórzano *et al.*, 2020). Sin embargo, implementan la continuidad en la obtención de información con el lanzamiento del Landsat 9 en 2023, para mantener y mejorar esta importante fuente de datos (NASA, 2023).

Estas imágenes están compuestas por un conjunto específico de 7 u 8 bandas espectrales, para la evolución de la vegetación, y los recursos naturales (Alonso, 2015). Debido a su registro contienen información de las características de la superficie terrestre lo cual permite evaluar su registro histórico (Campbell y Wynne., 2013)

Son imágenes satelitales disponibles de forma gratuita de las cuales cada píxel de una escena Landsat tiene 30 x 30 metros, la resolución espacial es lo suficientemente fina como para detectar y monitorear cambios antropogénicos en la cobertura del suelo (Wulder *et al.*, 2012) Landsat Next busca mejorar esto a diez metros (NASA, 2023) sin embargo existen otras imágenes que cumplen con ciertos criterios que aseguran la mejor calidad (Solórzano *et al.*, 2020)

Por tal motivo, el uso de las imágenes de alta resolución espacial como, mejora la estimación del porcentaje de cobertura en comparación con imágenes Landsat (Halperin *et al.*, 2016) las cuales se consideran de baja resolución, de manera que estas presentan una serie de limitantes que generan un margen de sesgo y clasificación errónea entre 14% y 20 % por ser una imagen tan grande (Halperin *et al.*, 2016; Astola *et al.*, 2019).

2.11. Imágenes de alta resolución

Las imágenes de alta resolución como Quirkybird, Sentinel-2A y 2B, WorldView-3 y 4, GeoEye-1, SPOT 6 y 7 entre otros, permite obtener mejores resultados (Gorelick *et al.*, 2017), debido a que esta acorta enormemente el tiempo de procesamiento, que gracias a su enorme capacidad de cómputo, pone a disposición de cualquier usuario ya que pone disponible imágenes Landsat, imágenes MODI (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) entre muchas fuentes (Hansen *et al.*, 2013).

Como ya fue mencionado estas imágenes están disponibles de manera gratuita que comúnmente son utilizadas para la realización de estudios de multitemporales con fin de generar insumos importantes para la planificación cuál sea el motivo, tal es el caso de la vegetación. En este sentido Flores-Yepes *et al.*, (2017), realizaron un estudio con imágenes de Google Earth analizando cambios en la vegetación de una zona impactada por ganadería y minería de diferentes años. Se identificaron efectos de estas actividades en los bosques y se observaron áreas de recuperación y pérdida de vegetación a lo largo del tiempo.

Por otro lado, los drones llegan a generar imágenes con mayor resolución de 2 cm donde se puede obtener mejor visibilidad de la vegetación, pero los costos básicamente son elevados, pero estos varían según la marca y las características específicas (Bayona y Arboleda-Díaz, 2023).

Por lo anterior, es importante considerar esta desventaja, así como las posibles implicaciones éticas sobre las especies al momento de realizar estudios con drones. En vista de lo antes mencionado, resulta crucial tener en cuenta esta limitación, así como las posibles implicaciones éticas que puedan surgir para las especies durante la realización de estudios utilizando drones (Christie *et al.*, 2016).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del área de estudio

La RBMM, se encuentra entre las coordenadas: 19° 59' 42'' a 19° 57' 07'' Norte y 100° 09' 54'' a 100° 06' 39'' Oeste para Altamirano y 19° 44' 27'' a 19° 18' 32'' Norte y 100° 22' 26'' a 100° 09' 07'' Oeste para el corredor Chincua-Cerro Pelón. Dentro de los municipios de Temascalcingo, San José del Rincón, Donato Guerra y Villa de Allende en el Estado de México, y Contepec, Senguio, Angangueo, Ocampo, Zitácuaro, y Aporo en el estado de Michoacán (CONANP, 2001).

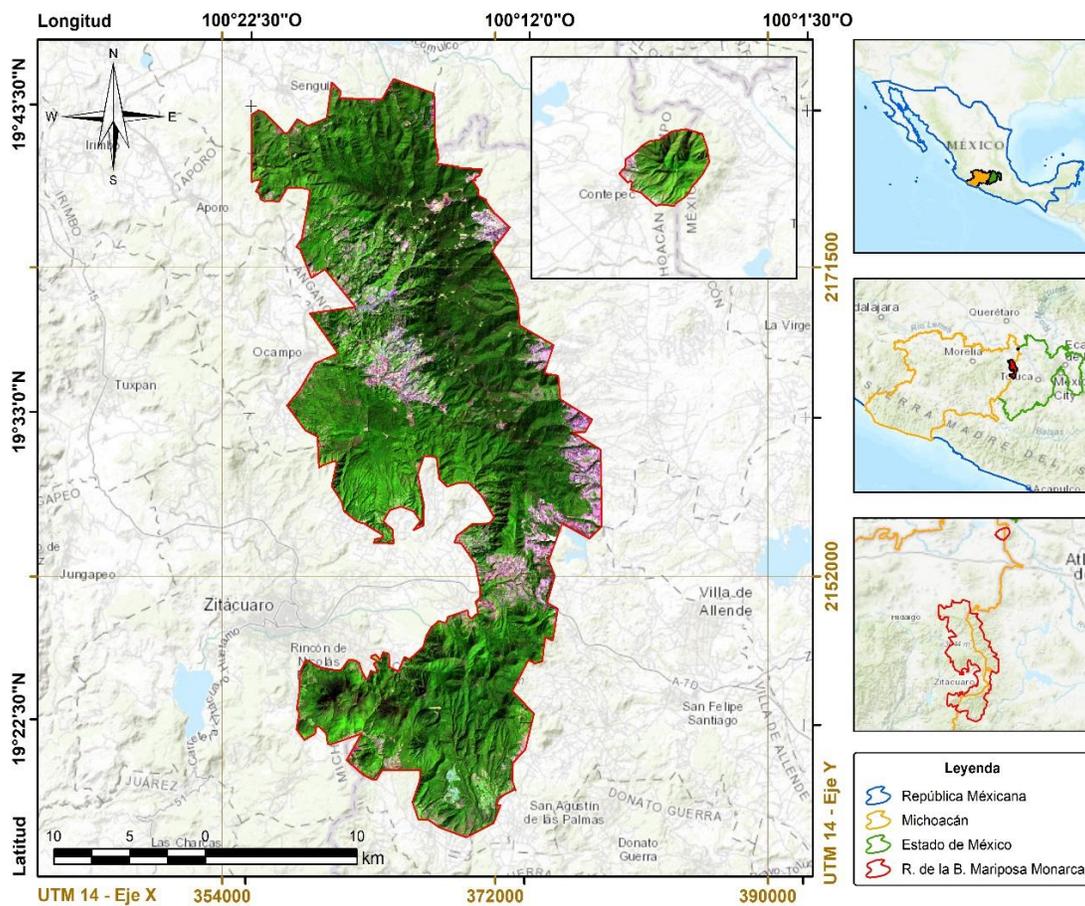


Figura 1. Localización de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca (RBMM).

El clima de la Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca básicamente es caracterizada porque destacan bosques de paisaje templado de altura, presenta en general un clima Cw, templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas medias anuales de 8 a 22 °C, precipitaciones promedio desde 700 mm. hasta 1 250 mm. y temperaturas mínimas para el mes más frío de entre -3 °C y 18 °C) cabe mencionar que en áreas donde la topografía es marcada por montañas y relieves abruptos, el clima exhibe una notable variabilidad en distancias cortas (Giménez *et al.*, 2003).

La creación de esta metodología empleada primeramente fue crear el mosaico que conforma la RBMM en seguida procedimos a la obtención de las ortofotos por medio de la plataforma de INEGI, también se descargaron las imágenes satelitales de alta resolución en Airbus Defence and Space, GeoEye-1 y Birdseye del software SASPlanet las cuales cada una de estas descargas fue un periodo a discutir.

Se utilizó el método automatizado de clasificación de imágenes satelitales (Sandoval-García *et al.*, 2021), es decir fue una clasificación supervisada, lo cual de esta manera se pudo obtener la cobertura vegetal presente, y con ello llevar a cabo los cálculos necesarios de la presente investigación.

3.2. Adquisición de imágenes

Las ortofotos se obtuvieron de la plataforma Espacios y Datos de México (<https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes/#Descargas>) y las imágenes satelitales de alta resolución de Airbus Defence and Space, GeoEye-1 y Birdseye del software SASPlanet (<http://www.sasgis.org/download/>), ambas herramientas son de código abierto y permite realizar la visualización y descarga de las imágenes de manera gratuita. Se generaron cuatro ortomosaicos de 2 m/pixel (año 1994), Airbus Defence and Space de 0.57 m/pixel (año 2008), GeoEye-1 de 0.28 m/pixel (año 2014) y Birdseye 0.28 m/pixel (año 2023).

3.3. Pre-procesamiento de las imágenes

Para preparar las imágenes satelitales previo a su procesamiento y utilización en el análisis, se realizó una corrección geométrica a través de la toma de un punto de control identificable en cada una de las imágenes a trabajar, que consistieron en sitios distribuidos de forma sistemática en áreas con alto grado de confusión por la reflectancia de las imágenes, la exposición, el ruido y la nubosidad.

Las imágenes satelitales tuvieron una corrección radiométrica del sensor, siendo georreferenciada usando la proyección WGS84 Zona 14 N, como lo dicen algunos autores (Pérez y Muñoz, 2006; Mendoza-Chichipe *et al.*, 2017) este tipo de ajustes se realizan especialmente para acoplar dos o más imágenes de geometría semejante que abarca el mismo sitio geográfico y con ello poder hacer concordar los elementos geográficos que presenta la imagen, ya que al no realizarlo no es posible que los resultados obtenidos entre las imágenes sean correctos.

3.4. Clasificación digital

Primeramente, se realizó una clasificación no supervisada la cual permitió la identificación de las categorías, que sirvió para identificar la vegetación y las áreas construidas. Sin embargo, se observó que algunas coberturas tendrían que modificarse, por tal razón, para la buena clasificación de las imágenes, se utilizó el método de clasificación supervisada a partir de la generación de ortomosaicos.

La corrección atmosférica a las imágenes de cada período de tiempo se realizó recortando y sometiendo la imagen al algoritmo de clasificación no supervisada K-Means, que agrupa los valores de celda en clases con el método de análisis de conglomerados de datos multivariados; posteriormente para la detección de cambios se realiza la conversión de los archivos de formato ráster a vectorial, para una clasificación supervisada, utilizando el software de código abierto (QGIS 3.36.1 Maidenhead, 2024) con la herramienta de tabla de

atributos, gridcode con solo 4 variables de ellas, con la herramienta de Add Field se nombraron Forestal (<=2), Pastizal (3) Agricultura (4).

Se realizó una interacción con la herramienta de Geoprocessing intersect para calcular la superficie la cual es la que necesitamos para el presente estudio y así proseguir con los siguientes cálculos. Se llevó a cabo una selección basada en la necesidad de la investigación y así poder calcular la deforestación anual, la pérdida de cobertura vegetal y la superficie total de cobertura pérdida en los periodos analizados.

3.5. Validación de información.

Para el cálculo de la concordancia y precisión de los resultados de clasificación de las imágenes satelitales de alta resolución se utilizó el módulo r.kappa en GRASS 7.6.0 (QGIS Development Team 2024), en el cual se generó una matriz de error y se determinó el índice de Kappa, mediante la siguiente ecuación (Quezada *et al.* 2022).

$$K = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

Donde:

K= Tasa de concordancia.

Po = Concordancia observada.

Pe = Concordancia esperada por azar.

1 – Pe = Máxima concordancia potencial no correspondida a la casualidad.

Los criterios utilizados para la interpretación del coeficiente de Kappa son los propuestos Landis y Koch (1977).

3.6. Tasa de deforestación anual.

Los cambios en la cobertura del suelo se identificaron mediante la comparación del conjunto de 2 mapas de cobertura vegetal y de uso de suelo y creando nuevos mapas que indicaron la transición existente entre los años 1994, 2008, 2014 y 2023. Con los datos

obtenidos en el procesamiento de las imágenes se calculó la tasa de deforestación anual, la cual consiste en comparar la cobertura del suelo de un mismo sitio en dos períodos de tiempo diferentes, para lo cual se utilizó la ecuación propuesta por Puyravaud (2003):

$$r = \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \right) \times \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \times 100$$

Donde:

r: Tasa de deforestación (%).

A₁: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo inicial (ha).

A₂: Cobertura vegetal o uso de suelo en el tiempo final (ha).

t₁: Período inicial (años).

t₂: Período final (años).

ln: Logaritmo natural

Un valor “r” positivo indica aumento de la cobertura vegetal, mientras que un valor negativo demuestra una pérdida de cobertura.

3.7. Tasa de cambio.

Para calcular la tasa de cambios (aumento o pérdida) de cobertura vegetal y de uso de suelo, se generó una tabulación cruzada entre cinco períodos de tiempo diferentes: 1994-2008, 2008-2014, 2014-2023 y 1994-2023. Se calcularon los cambios porcentuales, el cambio neto, la tasa de cambio y el cambio relativo para cada tipo de cobertura vegetal a lo largo del tiempo, utilizando la ecuación creada por la FAO (1996) y adaptada por Palacio-Prieto *et al.* (2004).

$$\delta n = [((s_2/s_1)^{(1/n)}) - 1] * 100$$

Donde:

δn = Tasa de cambio (%)

s₁ = Superficie de la fecha 1 (ha)

s₂ = Superficie de la fecha 2 (ha)

2n = Número de años entre las dos fechas (años)

4. RESULTADOS

4.1. Ortomosaicos de la Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca.

Se obtuvo el recorte de los cuatro ortomosaicos los cuales están compuestos por 13 ortofotos de 2 m/píxel (año 1994) (Figura 2A), 19 imágenes de Airbus Defence and Space de 0.57 m/píxel (año 2008) (Figura 2B), 18 imágenes de GeoEye-1 de 0.28 m/píxel (año 2014) (Figura 2C) y 18 imágenes Birdseye 0.28 m/píxel (año 2023) (Figura 2D).

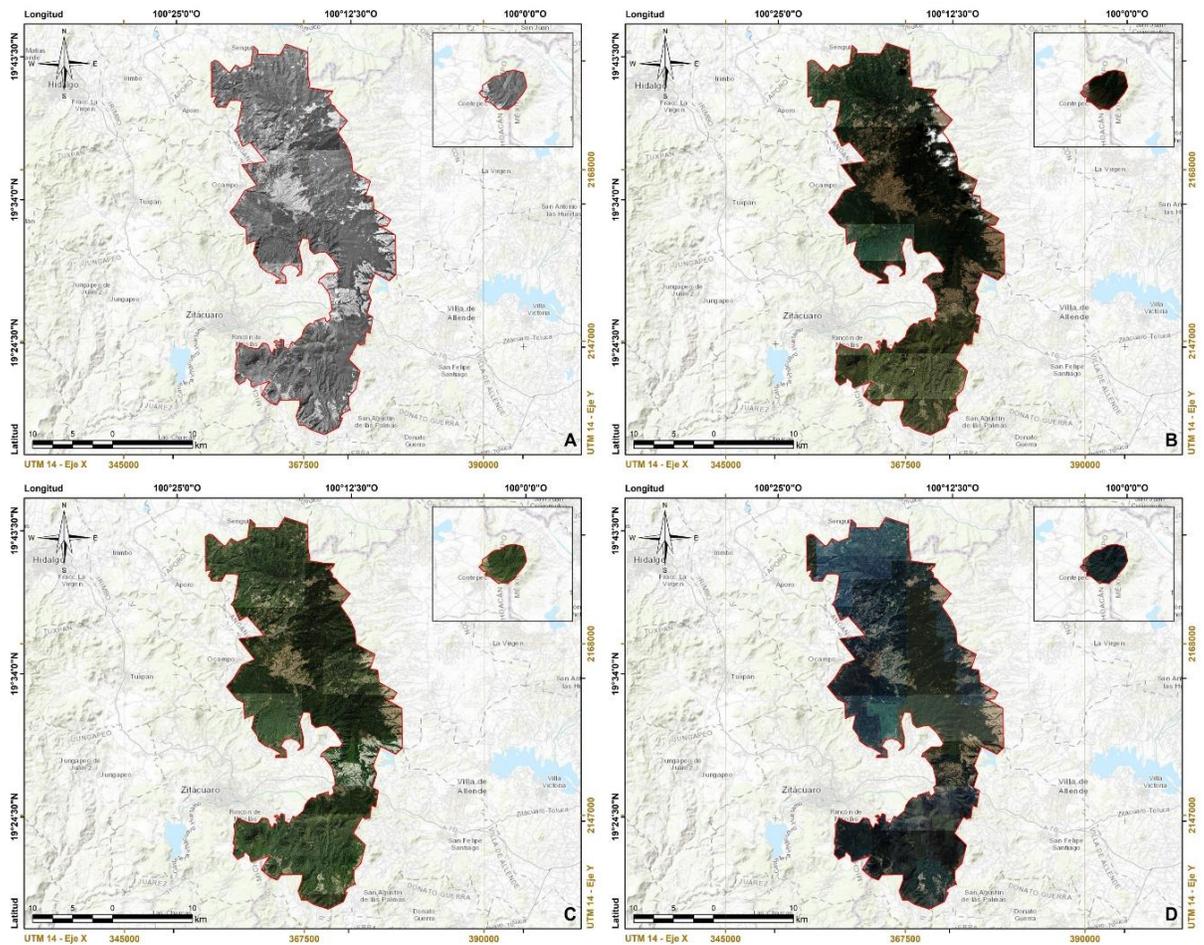


Figura 2. Ortofotos de la RBMM en los años 1994 (A), 2008 (B), 2014 (C), 2023 (D)

4.2. Clasificación del uso de suelo y vegetación de la RBMM en el año 1994, año 2008, año 2014, año 2023.

Se muestran los ortomosaicos de la información obtenida y relacionada con los distintos usos de suelo como lo muestra en la (Figura 3), cobertura vegetal y tipo de vegetación, la cual se comparó con la desarrollada por INEGI, obteniendo una clasificación de diferentes usos de suelo: Bosque de Encino, Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino, Bosque Mesófilo de Montaña, Pastizal, Vegetación secundaria, Agricultura, Caminos y Asentamientos humanos, distribuidos en la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca. De las diez clases obtenidas, se emplearon siete para focalizar la dinámica en los ecosistemas forestales.

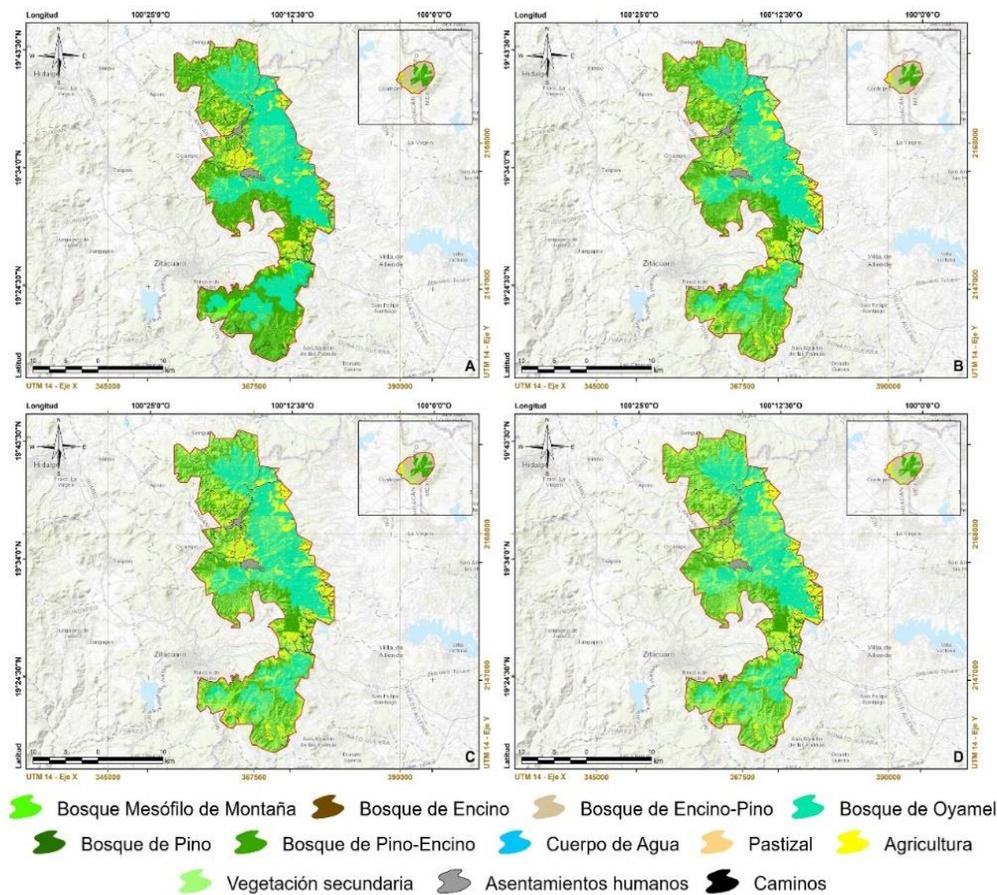


Figura 3. Uso de suelo y vegetación de la RBMM en los periodos 1994 (A), 2008 (B), 2014 (C), 2023 (D)

4.3. Detección de deforestación anual de cobertura y uso de suelo agricultura y vegetación secundaria.

La RBMM presenta tendencias de cambio en la cobertura forestal en relación con la expansión de la actividad agrícola, comparando los siguientes periodos, 1994-2008, 2008-2014, 2014-2023, 1994-2023, durante el primer periodo estudiado de 1994-2008, el Bosque de Encino experimentó la mayor deforestación anual con un 11.62%, seguido por el Bosque de Pino con un 6.35% (Tabla 1).

De igual manera se observa que, durante el periodo 2008-2014, el Bosque Mesófilo de Montaña mostró más alta con un 9.77%, mientras que el pastizal tuvo la tasa más baja con 1.69%. Durante el periodo más reciente, del 2014-2023, el Encino-Pino experimentó la mayor tasa con un 6.16%, y el Bosque de Pino 4.74%.

Mientras que generalmente, el Bosque de Encino ha experimentado una disminución significativa en la tasa de deforestación a lo largo de los periodos analizados, ya que de 11.62% de deforestación que presentaba en el primer periodo bajo hasta un 0.50% en el 2023. Sin embargo, a diferencia de la demás vegetación para áreas donde se encuentra el Bosque Mesófilo de Montaña y el encino-pino han mostrado aumentos marcados en la deforestación (Tabla 1).

Tabla 1. Cambios en la cobertura del suelo de agricultura del 1994 al 2023 en la RBMM.

Tasa de deforestación anual en cuestión de la agricultura				
Periodos	1994-2008	2008-2014	2014-2023	1994-2023
Tipo de vegetación				
Bosque de Encino	11.62	2.09	0.50	6.00
Bosque de Oyamel	4.67	5.34	1.62	3.83
Bosque de Pino	6.35	3.35	4.74	5.19
Bosque Mesófilo de Montaña	1.64	9.77	3.66	4.03
Encino-Pino	1.29	7.10	6.16	4.10
Pastizal	0.19	1.69	1.91	1.06
Pino-Encino	1.00	1.57	1.15	1.17

Se observa la tasa de cambio de deforestación anual en caso de la vegetación secundaria durante los mismos periodos, cabe mencionar que en la comparación del periodo de 1994 a 2023. Los valores indican el porcentaje medio de pérdida de cobertura vegetal por año para cada tipo de vegetación (Tabla 2).

Se observa que durante el periodo 2008-2014, el Bosque de Encino, la vegetación secundaria experimentó un incremento significativo, alcanzando un 6.37%, en comparación con el periodo anterior de 1994-2008 donde fue de 4.42%.

Por otro lado, en el Bosque de Pino se mostró un aumento notable de vegetación secundaria en comparación de su cobertura original en su tasa de deforestación durante el periodo 2014-2023, registrando un valor del 5.21%, en contraste con el periodo anterior de 2008-2014 donde fue de 2.83%. No obstante, los datos resaltan las transformaciones temporales en la dinámica del cambio de los bosques a la vegetación secundaria en la RBMM.

Tabla 2. Cambios en la cobertura del suelo de vegetación secundaria del 1994 al 2023 en la RBMM

Tasa de deforestación anual en cuestión de la vegetación secundaria				
Periodos	1994-2008	2008-2014	2014-2023	2023-1994
Tipo de vegetación				
Bosque de Encino	4.42	6.37	4.06	3.42
Bosque de Oyamel	2.02	0.39	1.92	1.02
Bosque de Pino	2.95	2.83	5.21	1.98
Bosque Mesófilo de Montaña	2.59	1.01	3.07	1.42
Encino-Pino	0.76	2.19	1.25	0.82
Pastizal	2.02	0.76	1.72	1.10
Pino-Encino	1.48	1.21	0.86	0.95

4.4. Tasas de cambio, aumento o pérdida de cobertura vegetal y de uso de suelo, Agricultura y vegetación secundaria.

En este caso de la pérdida de cobertura vegetal de uso de suelo a lo largo del tiempo del periodo de 1994 a 2023. Se observa una variabilidad significativa en los cambios de uso de suelo en la superficie (Figura 4).

Se observa como el Bosque de Encino y el Bosque de Pino, experimentó un gran cambio en aumento de superficie de agricultura en el periodo de 1994-2008 aunque el Bosque de Pino aumento 6.56 % el Bosque de Encino le doblo la superficie presentando un aumento de 12.32%, (Figura 4A).

Sin embargo, estos no son los únicos que han aumentado en agricultura, también presenta cambio significativo el Bosque Mesófilo de Montaña y el Encino- Pino en el periodo del 2008- 2014, mostrando un porcentaje de 10.27 % para el Bosque Mesófilo de Montaña y un 7.36 % para el Encino- Pino

Mientras que el Bosque de Encino sigue perdiendo cobertura, aumentando así en la vegetación secundaria para el periodo de 2008-2014 con un 4.52%. No obstante, para el periodo de 2014-2023 mostro un aumento de vegetación secundaria en el Bosque de Pino mostrando un 5.32% (Figura 4B)

Estos datos muestran una visión detallada de la dinámica de cambio en la cobertura del suelo de la RBMM a lo largo del tiempo teniendo cambios por agricultura y vegetación secundaria lo que puede ser alarmante para la reserva ya que se observan cambios variables.

Por lo tanto, se destaca que el Bosque de Encino y el Bosque Mesófilo de Montaña son los más perturbado por la presencia del mayor aumento en superficie de agricultura, mientras que en Bosque de Encino y Bosque de Pino lo que más ha afectado es el incremento en superficie de la vegetación secundaria en diferentes periodos. Sin embargo, el Bosque de Encino mostraron las mayores perturbaciones significativas de agricultura y vegetación secundaria.

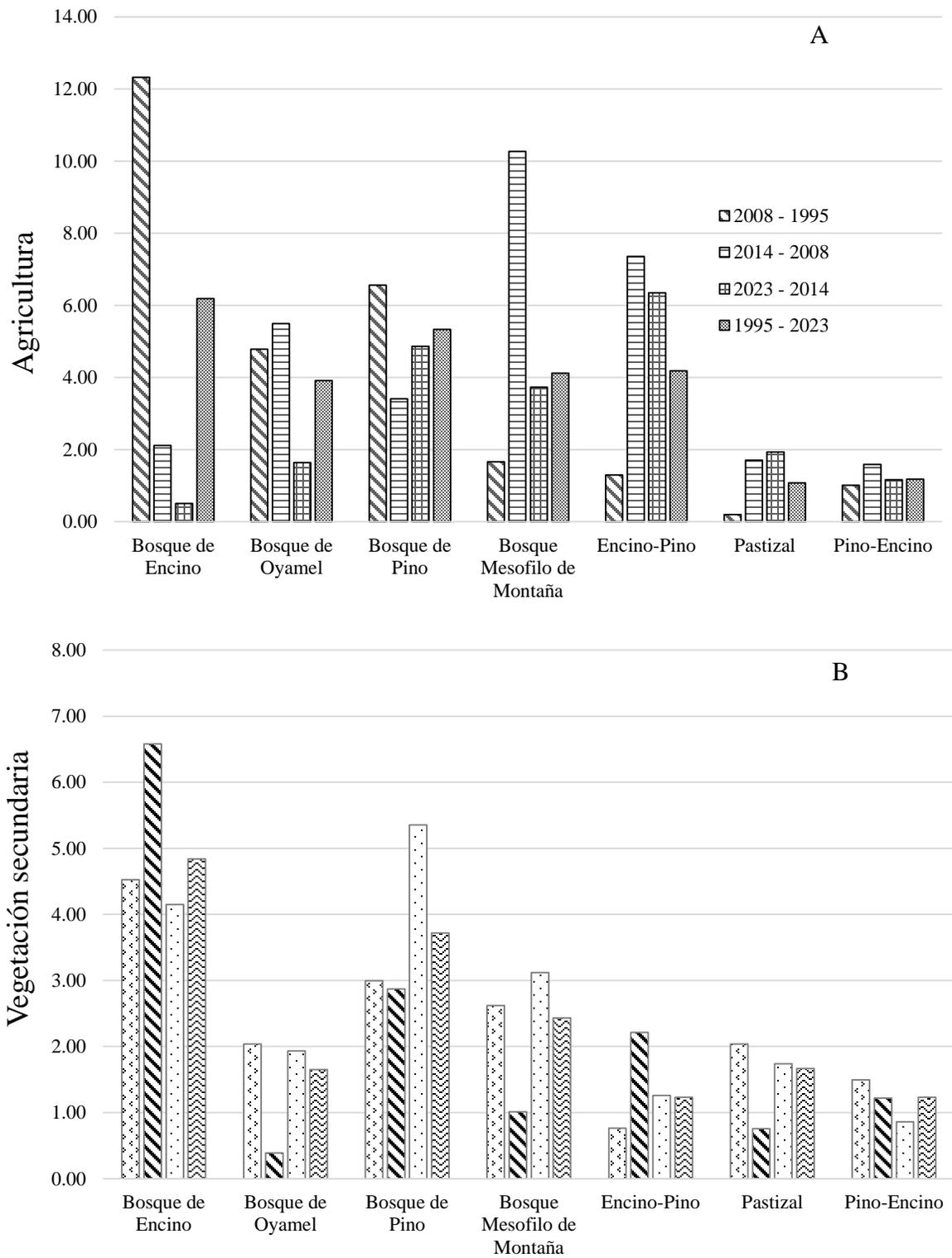


Figura 4. Tasa de cambio, Agricultura (A) Vegetación secundaria (B) en la RBMM

4.5. Pérdida de cobertura Forestal en ecosistemas de la RBMM durante el periodo de 1994 a 2023.

Presenta los cambios de cobertura vegetal en la superficie durante el periodo de 1994 hasta 2023 (ha). En primer lugar, se observa una tendencia general de pérdida significativa en la superficie de la mayoría de los tipos de vegetación a lo largo de los años 1994, 2008, 2014 y 2023 (Tabla 3).

Por un lado, el Bosque de Encino experimentó una pérdida significativa en su superficie, pasando de (20.91 ha) en el periodo inicial a (26.39 ha) en el periodo 2008. Sin embargo, el Bosque de Pino también disminuyó de manera más significativa con rangos de (6.87 ha) en el periodo de 2023. Por lo tanto, estos datos muestran el gran impacto de los cambios en el uso y la deforestación en la RBMM.

Tabla 3. Superficie total de vegetación forestal en hectáreas, pérdida en el periodo de 1994 al 2023 en la RBMM.

Vegetación	Inicial	Superficies 1994		2008		2014		2023		1994-223	
		(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
BE	94.25	20.91	22.18	26.39	35.99	16.49	35.12	20.69	67.93	63.57	86.68
BO	21735.96	2370.13	10.90	867.52	4.48	267.52	1.45	637.00	3.49	1772.03	9.15
BP	25.06	5.67	22.61	4.42	22.79	2.05	13.72	6.87	53.19	13.35	68.82
BMM	683.48	197.85	28.95	77.17	15.89	28.02	6.86	98.44	25.88	203.63	41.93
EP	1026.76	141.43	13.77	15.61	1.76	27.18	3.13	34.47	4.09	77.26	8.73
P	398.49	224.04	56.22	26.54	15.21	20.83	14.08	48.93	38.50	96.29	55.20
PE	31551.49	10377.49	32.89	1896.81	8.96	1040.74	5.40	1225.46	6.72	4.4163.01	19.66

Bosque de Encino (VBE), Bosque de Oyamel (BO), Bosque de Pino (BP), Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), Pino-Encino (PE), Pastizal (P), Pino-Encino (PE).

Para comprender mejor la magnitud de la pérdida de cobertura vegetal en la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, se presenta un gráfico que ilustra el porcentaje de superficie total pérdida a lo largo de cuatro periodos analizados.

Este gráfico revela que las mayores pérdidas de cobertura vegetal se concentran en los Bosques de Encino ya que ha perdido más del 60% de su cobertura original en el periodo del 2023, no obstante, el y Bosque de Pino ha perdido más del 50% de su cobertura en el mismo periodo, observándose una tendencia en todos los periodos. Sin embargo, es importante señalar que, si bien se registran pérdidas en todos los tipos de vegetación, estos son de menor magnitud en comparación con los mencionados (Figura 5)

A pesar de que se observan pérdidas en todos los tipos de vegetación, estas son de menor magnitud en comparación con las de los bosques de encino y pino. La figura 5 del estudio ilustra que, entre 1994 y 2023, el bosque de encino ha sufrido una reducción de más del 80% de su cobertura total, mientras que el bosque de pino ha perdido más del 60%. Estos ecosistemas son particularmente importantes para la conservación debido a su biodiversidad y los servicios ecosistémicos que proporcionan.

Sin embargo, los impactos más significativos a nivel de la RBMM se han registrado en el Bosque de Oyamel y el Bosque de Pino-Encino, estos ecosistemas han mostrado una disminución de más del 40% de su cobertura a lo largo de los cuatro periodos analizados. La pérdida en estos bosques es preocupante, ya que son esenciales para la supervivencia de diversas especies, incluidas las mariposas monarca, que dependen de estos hábitats durante su migración.

La continua degradación de estos ecosistemas subraya la urgencia de implementar estrategias efectivas de restauración ecológica. Estas estrategias deben centrarse en mitigar la pérdida de cobertura vegetal y promover la recuperación de estos hábitats críticos.

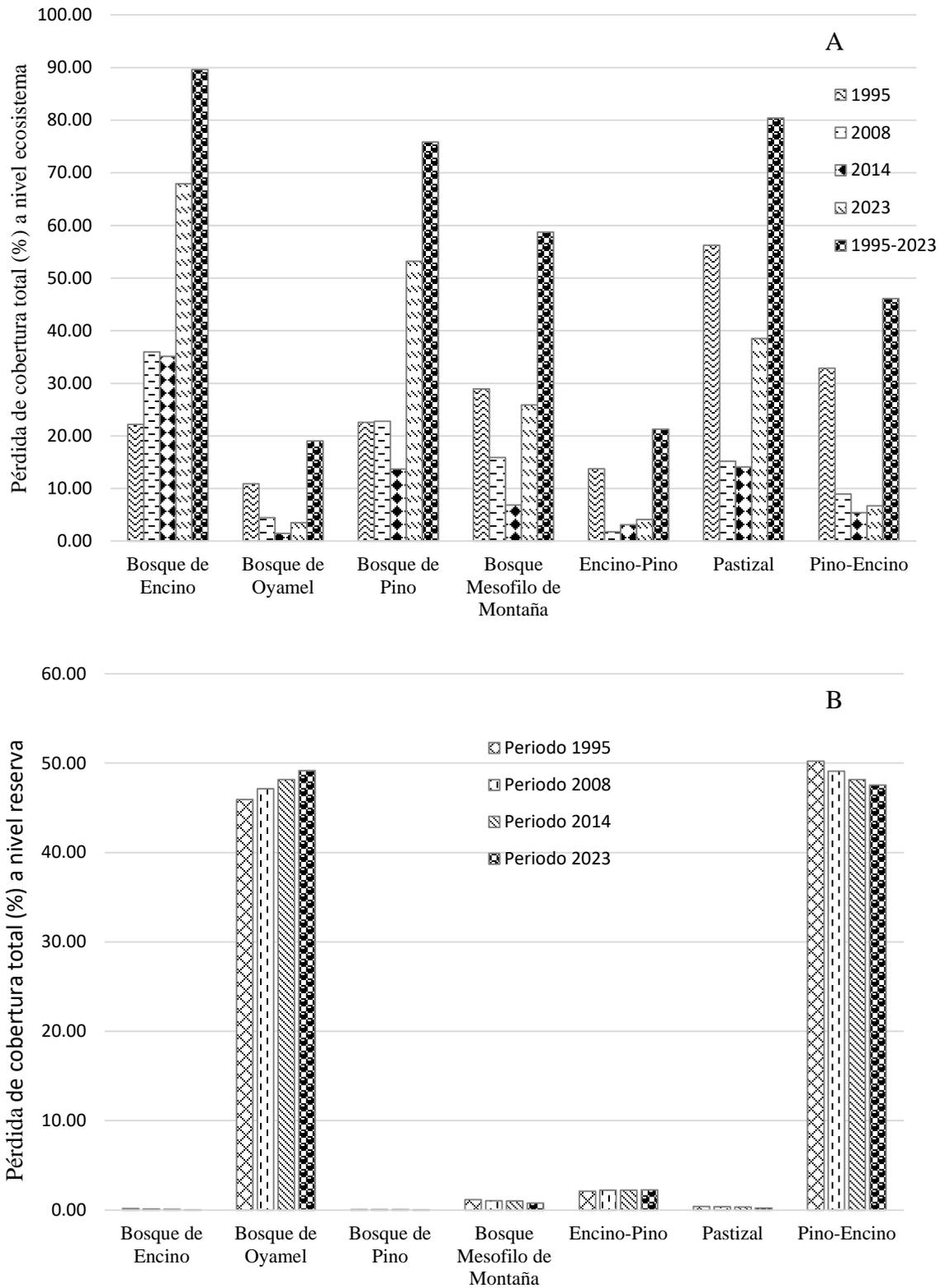


Figura 5. Superficie pérdida total en la RBMM del año 1994 a 2023, Nivel Ecosistema (A) Nivel Reserva (B).

4.6. Distribución de las especies de importancia ecológica de la mariposa Monarca.

Debido a la detección de la alta fragmentación de los ecosistemas, se procedió a identificar otras Áreas Naturales que potencialmente albergaran especies de importancia ecológica. Para ello, se utilizaron capas descargadas de la página del INEGI referentes a Subprovincias y Áreas Naturales Protegidas, así como datos de distribución de especies descargados de Enciclovida (<https://enciclovida.mx/>). Las especies de interés incluyeron la mariposa Monarca, el Oyamel y la *Asclepia curassavica*, evaluando sus distribuciones para identificar áreas de coincidencia.

Se procesaron todas las capas descargadas, separando las subprovincias y las Áreas Naturales Protegidas. Posteriormente, se realizó un recorte de las Áreas Naturales Protegidas para cada una de las especies de interés. Este recorte permitió la intersección entre las capas de las especies y las Áreas Naturales Protegidas, facilitando la identificación de los nombres de las áreas donde se distribuyen las especies. Este procedimiento se aplicó para las tres especies seleccionadas, asegurando una evaluación precisa de su distribución en relación con las Áreas Naturales Protegidas y las Sub provincias.

Este análisis se llevó a cabo con el fin de establecer medidas de seguridad en caso de pérdida de la Reserva actual, asegurando así la preservación de estas especies clave y sus hábitats. La metodología aplicada permite una planificación estratégica para la conservación, considerando áreas alternativas que puedan ofrecer su habitad a estas especies.

Se muestra el registró de la distribución de las especies de importancia ecológica, *Danaus plexippus* (mariposa Monarca), *Abies religiosa* (árbol de oyamel) y *Asclepias curassavica* (planta de algodoncillo) en las provincias de México, de las cuales se encontró su distribución solo en veinte de ellas, (Tabla 4).

Sin embargo, al considerar las Áreas Naturales protegidas, se observa que la presencia de las tres especies de importancia solo se registra en cinco.

Tabla 4. Provincias y Áreas Naturales protegidas donde hay presencia de las especies de importancia ecológica.

Presencia de Especies de Importancia Ecológica			
Provincias de México	<i>Danaus plexippus</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Asclepia curassavica</i>
Chapala	X	X	X
Chiconquiaco	X	X	X
Cordillera costera del sur	X	X	X
Costas del sur	X	X	X
Depresión del balsas	X	X	X
Escarpa limítrofe del sur	X	X	X
Karst huasteco	X	X	X
Lagos y volcanes del Anáhuac	X	X	X
Llanura costera veracruzana	X	X	X
Llanuras y sierras de Querétaro e hidalgo	X	X	X
Mesetas y cañadas del sur	X	X	X
Mil cumbres	X	X	X
Mixteca alta	X	X	X
Sierras de la costa de Jalisco y colima	X	X	X
Sierras orientales	X	X	X
Sierras y bajíos michoacanos	X	X	X
Sierras y llanuras del norte de Guanajuato	X	X	X
Sur de puebla	X	X	X
Volcanes de colima	X	X	X

Presencia de Especies de Importancia Ecológica			
Áreas Naturales Protegidas	<i>Danaus plexippus</i>	<i>Abies religiosa</i>	<i>Asclepia curassavica</i>
El Tepozteco	X	X	X
Z.P.F.V. la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa	X	X	X
Corredor Biológico Chichinautzin	X	X	X
Sierra de Manantlán	X	X	X
Sierra Gorda	X	X	X

5. DISCUSIÓN

Considerando los resultados, revelan patrones preocupantes en relación con el porcentaje por ecosistema, teniendo un cambio en la cobertura forestal. Muestra que la tasa de deforestación anual de Bosque Mesófilo de Montaña ha pasado de 1.64% a 4.03% y el Encino Pino de 1.29% a 4.10%.

Pero a nivel de la RBMM quienes presentan mayor pérdida de cobertura son el Bosque de Oyamel y el Bosque de Pino-Encino, de forma que es un ecosistema crucial para la biodiversidad, por lo que la tasa de deforestación es significativamente alta, lo que sugiere una presión considerable por parte de la expansión agrícola de la RBMM, al igual que Loya-Carrillo y Mass-Causel (2020) concluye que los principales focos de deforestación se encuentran fuertemente relacionados con actividades agrícolas.

Sin embargo, el análisis llevado a cabo por otros investigadores señala que, en Michoacán, el proceso de deforestación ha sido impulsado por el incentivo económico que favorece el desmonte de los bosques, para cultivar aguacate o convertirlo en huertos frutícolas de mayor valor económico (Chávez-León *et al.*, 2012; Morales y Cuevas, 2011)

Esta tendencia de pérdida es preocupante debido a los importantes servicios ambientales que proporcionan los bosques, tal como la conservación del suelo y la regulación del ciclo del agua, lo que podría tener implicaciones importantes para la conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad de los ecosistemas forestales en la región (Champo-Jiménez *et al.*, 2012)

Juegan un papel vital como principal fuente de recarga del manto acuífero Sistema Hidrológico de Cutzamala, siendo la principal fuente de recarga, esto se debe a las precipitaciones que ocurren en las cuencas altas de, el bosque, Valle de Bravo y Villa Victoria, (Pinto-Argel, 2022) que colectan y almacenan el agua de lluvia, que se encuentran en los estados que comparten la RBMM, y las precipitaciones en estas áreas son esenciales

para mantener los niveles de agua en las presas, garantizando así el suministro de agua a la Ciudad de México (CONAGUA, 2005)

Los resultados de vegetación secundaria, muestran que de la misma manera un aumento en la vegetación secundaria, encontrando mayor incremento en el Bosque de Encino con más del 6% y en el Bosque de Pino más del 5%, de tal manera que estos cambios pueden ser atribuidos a una variedad de factores que van desde disturbios antropogénicos y naturales como cambios en el clima, incendios forestales y disturbios forestales, además las interacciones de estos factores pueden tener efectos más preocupantes teniendo más pérdida de cobertura de suelo original (Martínez-Torres, 2018).

Los incendios en bosques de coníferas en el centro de México han sido severamente modificados por el cambio de uso de la tierra y las actividades de manejo de incendios, por lo cual son los factores antrópicos y ambientales que impulsan la ocurrencia de incendios en estos bosques, siendo los incendios un factor de pérdida de cobertura forestal convirtiéndose estos en vegetación secundaria (Farfán-Gutiérrez et al., 2018).

Además, que estos ecosistemas forestales de la RBMM son el hogar de 132 especies de aves, 56 de mamíferos, 432 de plantas vasculares y 211 de hongos, una de ellas es la mariposa Monarca, que es un fenómeno migratorio único en la naturaleza, que contribuye a mantener la salud y la diversidad de los ecosistemas terrestres cuando las mariposas llevan polen de unas plantas a otras WWF (2023).

De acuerdo a la tasa de cambio, aumento o pérdida de cobertura vegetal y de uso de suelo representado en la Figura 5, esos resultados revelan un caso preocupante en la RBMM, ya que los cambios significativos son principalmente en el Bosque de Encino y el Bosque de Pino, en contraste con López-García (2007) su análisis realizado reportó la afectación de 329.08 ha de bosques en diferentes estados de conservación, siendo las coberturas Cerradas las más alteradas con 196.27 ha (59.64% de los cambios) y las Semicerradas con 59.63 ha (18.12% de los cambios), además la vegetación refleja que es atacada frecuentemente por tala e incendios forestales.

Por lo tanto, esta pérdida de cobertura puede deberse a que, A nivel nacional, la madera de encino ocupa el segundo lugar de aprovechamiento (Pérez Olvera, 2000), paralelamente a esto la WWF (2023) detectó que el saneamiento (28.73 ha) fue la principal causa en la degradación en la zona núcleo, seguida de los incendios (15.12 ha), mientras que la tala clandestina (13.406 ha) disminuyó ligeramente en relación con el reporte anterior (13.936 ha).

Sin embargo, en el presente estudio sus resultados revelan que el Bosque de Encino experimentó una pérdida significativa en su superficie total, (84.48(ha), es decir más del 80% de su cobertura original, No obstante, el y Bosque de Pino ha perdido más del 70% en el periodo del 1994 al 2023, a diferencia de otro estudios muestran que durante el período de 2001 a 2012, se registró un total de 2179 hectáreas de bosque en las zonas núcleo que fueron afectadas, de estas, 1254 hectáreas experimentaron deforestación, mientras que 925 hectáreas fueron degradadas. La mayor parte de esta afectación, con 2057 hectáreas, fue atribuida a la tala ilegal, dividida en 1503 hectáreas por tala a gran escala y 554 hectáreas por tala a pequeña escala. Adicionalmente, 122 hectáreas fueron afectadas por fenómenos naturales como inundaciones, fuertes vientos, sequías e incendios (Vidal *et al.*, 2013).

Otros estudios mencionan que la mayor parte de la pérdida de bosques densos se ha dado dentro de los límites de la reserva. En lo que es la actual zona núcleo, de 1993 a 2000 la superficie ocupada por estos bosques disminuyó en 870 hectáreas, principalmente de Oyamel, situación que se intensificó a partir del decreto de 2000, ya que de esa fecha al 2003 se perdieron otras 500 ha más. Por consiguiente, se presentó un aumento de la superficie de bosques abiertos, pastizales y, sobre todo, zonas de vegetación secundaria arbustiva (Ramírez, 2005).

Por esta razón, se procedió a identificar otras Áreas Naturales que registran la presencia de estas especies de importancia ecológica y considerarlas como áreas críticas, se registró la distribución de *Danaus plexippus* (mariposa Monarca), *Abies religiosa* (árbol de oyamel) y *Asclepias curassavica* (planta de algodoncillo) en las provincias de México y en las Áreas Naturales protegidas.

Se encontró la misma distribución de las 3 en veinte Sub provincias; Chapala, Chiconquiaco, Cordillera costera del sur, Costas del sur, Depresión del balsas, Escarpa limítrofe del sur, Karst huasteco, Lagos y volcanes del Anáhuac, Llanura costera veracruzana, Llanuras y sierras de Querétaro e hidalgo, Mesetas y cañadas del sur, Mil cumbres, Mixteca alta, Sierras de la costa de Jalisco y colima, Sierras orientales, Sierras y bajíos michoacanos, Sierras y llanuras del norte de Guanajuato, Sur de Puebla, Volcanes de colima, sin embargo, en Áreas Naturales Protegidas solo se registró la presencia en 5; El Tepozteco, Z.P.F.V. la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, Corredor Biológico Chichinautzin, Sierra de Manantlán, Sierra Gorda Tabla 4. Las cuales tienen implicaciones significativas para la conservación de la biodiversidad en el país y subrayan la importancia de implementar estrategias de protección efectivas (Cornejo-Tenorio *et al.*, 2003)

Esta Áreas y provincias se consideran como una de las áreas prioritarias para la conservación y restauración de forma que si existen las tres especies necesarias para la mariposa Monarca estas podrán migrar ampliamente a su habitat para seguir teniendo su conservación, de manera que esta especie oposita en la *Asclepia curassavica* comúnmente conocida como algodoncillo (Alonso y Arellano, 1989) por consiguiente el *Abies religiosa* (Oyamel) es donde la mariposa Monarca (*Daanaus plexippus*) hacen sus colonias de hibernación (Domínguez, 2023).

Por tal motivo, la combinación de diferentes estrategias de restauración ecológica son un punto clave para poder seguir conservando estas especies presentes a pesar de los disturbios en los ecosistemas presentes que se están degradando en la RBMM, como lo menciona Sandoval-García (2022), permiten aumentar el porcentaje de supervivencia en 92%, mejoran la capacidad de infiltración y reducen el estrés hídrico, la malla atrapa niebla tuvo una condensación promedio de 0.8 l/m²/día, de la neblina y rocío, así como una reducción de 70% de la iluminancia, la translocación de suelos mejora la capacidad de infiltración y la asociación de grupos funcionales de Anderson, permitiendo una asociación simbiótica que mejora la fijación de Nitrógeno.

De la misma manera otros autores muestran que para la región de Chignahuapan, Zacatlán se identificaron a que las principales áreas de restauración mediante la clasificación supervisada indicaron 46% para la categoría de bosque, 42% para las áreas con uso agrícola y pecuario, y 11.5% para las áreas sin vegetación aparente y áreas con uso urbano (González-Ovando *et al.*, 2016). Sin embargo, en la Sierra Norte de Puebla se considera como área de conservación básicamente estos aspectos de relevancia, el cambio de uso del suelo, deforestación actual (González, 2014).

Como lo menciona Chávez-González *et al.* (2015) es importante tener un enfoque colaborativo y coordinado entre las autoridades gubernamentales, las organizaciones de conservación y las comunidades locales para abordar los problemas ambientales y promover la sostenibilidad a largo plazo de los ecosistemas.

6. CONCLUSIONES

Se rechaza la hipótesis primera que se planteó al inicio por que el ritmo de pérdida es inferior al 50 % por lo tanto no están siendo viables las predicciones bioclimáticas debido a que existen programas que están haciendo esfuerzos para conservar, por eso es que nosotros perdimos que se sigan implementando proyectos que ayuden a la conservación, a la recuperación de la estructura y composición del ecosistema, para mejorar la conectividad entre los fragmentos, disminuir los tiempos de recuperación y recobrar bienes y servicios ecosistémicos creando estrategias de restauración ecológica.

Se acepta la segunda hipótesis porque aunque no es tan alta la pérdida como en las predicciones se sigue degradando y por lo tanto la mariposa Monarca se encuentra fragmentada, poniendo en riesgo su conservación, de tal manera que, el análisis multitemporal indica un proceso de degradación de la cobertura forestal original, y el uso de suelo en la RBMM, principalmente en Bosques de Encino, Bosque de Pino y Bosque Mesófilo de Montaña, esto gracias a factores preocupante de deforestación y cambio climático que hacen la transformación del paisaje, especialmente en relación con la expansión agrícola, la tala ilegal e incendios.

Se evidencia que, si bien el Bosque de Encino ha experimentado una disminución significativa en la tasa de deforestación a lo largo de los periodos 1994 a 2023, otros ecosistemas, como el Bosque Mesófilo de Montaña y el Encino-Pino, han enfrentado aumentos en la deforestación en los últimos años del 2008 al 2023.

Además, los resultados obtenidos enfatizan el impacto significativo de la expansión agrícola en la pérdida de cobertura vegetal original, en los Bosques de Encino y Bosque de Pino. Este fenómeno no solo afecta la biodiversidad y los ecosistemas presentes, sino que también compromete la preservación de especies de importancia ecológica, como la mariposa Monarca, el algodóncillo y Oyamel.

También se analizó la importancia de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) como refugios para la conservación de la biodiversidad. No obstante, se ha determinado la necesidad de fortalecer la gestión y la vigilancia en estas áreas con el fin de garantizar la supervivencia de especies de importancia ecológica, este análisis prueba la problemática de los cambios ambientales en la RBMM y la necesidad urgente de implementar estrategias de conservación efectivas.

Por lo tanto, si esta situación sigue en tendencia, como se ha mostrado en los últimos años, la integridad ecológica de la RMBB, se verá comprometida y/o afectada en las próximas décadas.

7. RECOMENDACIONES

Primeramente, realizar estudios en las Áreas Naturales Protegidas, El Tepozteco, la Cuenca Hidrográfica del Río Necaxa, Corredor Biológico Chichinautzin, Sierra de Manantlán, Sierra Gorda, para saber las necesidades que se encuentran en el ecosistema y así poder priorizar las áreas para la conservación de las especies presentes en ellas.

Incrementar estrategias de conservación, primeramente, en la RBMM, en las Áreas Naturales Protegidas mencionadas anteriormente y en las 20 provincias de México donde existe la distribución de las especies de importancia ecológica ya que es necesario realizar estrategias de conservación que aborden los desafíos emergentes en la RBMM, por ejemplo la reforestación a gran escala, complementada con redes de niebla para mejorar la captación de agua y así generar condiciones microclimática cuando se presenten sequías y aumentar la supervivencia y un mayor crecimiento en diámetro y altura, la inclusión de grupos funcionales haciendo la mezcla de especies que desempeñan funciones complementarias como la mezcla de *Asclepia* que es la comida de la mariposa Monarca con *Abies* donde la mariposa hiberna, la nucleación que básicamente es llevar suelo de un área conservada a una degradada como si se estuviera sembrando suelo, la micorrización entre las especie ya que el hongo micorrízicos ayuda a la planta a capturar nutrientes como fósforo, azufre, nitrógeno y micronutrientes del suelo, la mezcla de semillas de especies ecológicamente importantes puede aumentar la resiliencia y funcionalidad de los ecosistemas, estas estrategias no solo apoyan la preservación a largo plazo de importantes patrimonios naturales, sino que también mejoran el bienestar de las comunidades que dependen de estos ecosistemas.

Se recomienda que las reforestaciones se lleven a cabo en los Bosques de Oyamel y Pino-Encino, ya que son los más afectados dentro de la Reserva, se deberían incluir reforestación con especies nativas, control de la tala ilegal y la aplicación de manejo forestal sostenible. Además, es crucial implementar programas de educación ambiental y sensibilización para las comunidades locales, restaurar suelos erosionados, establecer medidas de prevención para el control de incendios forestales, y realizar un monitoreo continuo de la salud del bosque.

8. LITERATURA CITADA

- Alonso M., A., y Arellano G, A. (1989). mariposa Monarca: Su habitad de hibernación en México. *Ciencias*, (15) 6-11.
- Alonso, D. (2015). 5 opciones para descargar imágenes Landsat, MappingGIS.
<https://mappinggis.com/2015/05/como-descargar-imagenes-landsat/>
- Araiza-Olivares, G. A. (2020). Efectos del cambio climático en la distribución del bosque de oyamel. *Revista Geográfica De América Central*, 2(65), 281-300.
<https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.11>
- Astola, H., Häme T., Sirro, L., Molinier, M., y Kilpi, J. (2019). Comparación de las imágenes de Sentinel-2 y Landsat 8 para la predicción de variables forestales en la región boreal. *Remote Sensing of Environment*, 223(223), 257–273.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.019>
- Azcárate, J. G, Ramírez, M. I., & Pinto, M. (2003). Las comunidades vegetales de la Sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México, México): clasificación, composición y distribución.
- Báez Islas, A. (2012). Modelación del hábitat invernal de la mariposa Monarca ante escenarios de cambio climático (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
https://www.zaragoza.unam.mx/wpcontent/Portal2015/Licenciaturas/biologia/tesis/tesis_baez_islas.pdf
- Bayona, JE., & Arboleda, E. (2023). Identificar el uso y funcionamiento de la tecnología de drones en el sector agropecuario de la sabana de Bogotá (Tesis de especialización, Universidad EAN).
<https://repository.universidadean.edu.co/bitstream/handle/10882/12832/BayonaJesus2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Benítez-Pineda, CA. & Zepeda CG. (2019). Oyameles: los guardianes del santuario.
<https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/389-numero-45/722-oyameles-los-guardianes-del-santuario.html>
- Bolaños-González, Y., Bolaños-González, M. A., Paz-Pellat, F., & Ponce-Pulido, J. I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en

- Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792017000100073&lng=es&tlng=es.
- Bray, D., Merino, L., & Barry, D. (Eds.). (2007). Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales 1(1) 33–45). Raúl Marcó del Pont Lalli.
<https://www.nacionmulticultural.unam.mx/empresasindigenas/docs/2059.pdf>
- Brenner L., (2006). Áreas naturales protegidas y ecoturismo: el caso de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, México. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, XXVII (105), 237-265. <https://www.redalyc.org/pdf/137/13710508.pdf>
- Brenner, L., (2006). Áreas naturales protegidas y ecoturismo: el caso de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, México. *Relaciones. Estudios de Historia y Sociedad*, XXVII (105), 237-265. <https://www.redalyc.org/pdf/137/13710508.pdf>
- Broadbent, E. N., Asner, G. P., Keller, M., Knapp, D. E., Oliveira, P. J. C., & Silva, J. N. (2008). Fragmentación forestal y efectos de borde de la deforestación y la tala selectiva en la Amazonía brasileña. *Conservación biológica*, 141(7), 1745–1757.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.024>
- Calvo-Obando, A., y Ortiz-Malavassi, E. (2012). Fragmentación de la cobertura forestal en Costa Rica durante los periodos 1997-2000 y 2000-2005. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 9 (22) 10-21
- Campbell, J. B., y Wynne, R. H. (2013). Introducción a la Teledetección. 5(1) 282-662.
- Cantú-Fernández, M. (2013). Incendios del 2012 de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca: caracterización y respuesta institucional. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México
<http://132.248.9.195/ptd2013/noviembre/0705850/0705850.pdf>
- Cardona, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.
<https://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm>
- Carlón-Allende, T., Mendoza, M. E., Villanueva-Díaz, J., & Pérez-Salicrup, D. R. (2015). Análisis espacial del paisaje como base para muestreos dendrocronológicos: El caso de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, México. *Madera y bosques*, 21(2), 11-22. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712015000200001&lng=es&tlng=es.

- Carrillo-Hidalgo, N., y Gómez, E. G. (2001). Desastres naturales y su influencia en el medio ambiente. revista del instituto de investigación de la facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 4 (7).
- Casas-Fernández, A. (2009). Flora ilustrada de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca. Revista mexicana de biodiversidad, 80(3), 887.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532009000300034&lng=es&tlng=es.
- Champo-Jiménez, O., Valderrama-Landeros, L., & España-Boquera, M. L. (2012). Pérdida de cobertura forestal en la reserva de la biósfera mariposa Monarca, Michoacán, México (2006-2010). *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, XVIII(2), 143–157. doi:10.5154/r.rchscfa.2010.09.074
- Chávez-León, G., Tapia Vargas, L. M., Bravo Espinoza, M., Sáenz Reyes, J., Muñoz Flores, H. J., Vidales Fernández, I., Larios Guzmán, A., Rentería Ánima, J. B., Villaseñor-Ramírez, F.J., Sánchez-Pérez, J. de la Luz., Alcantar-Rocillo, J. J., & Mendoza-Cantú, M. (2012). Impacto de cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate.
- Christie, K. S., Gilbert, S. L., Brown, C. L., Hatfield, M., & Hanson, L. (2016). Unmanned aircraft systems in wildlife research: current and future applications of a transformative technology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(5), 241-251.
- Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección. 3ª edición revisada. Ediciones RIALP, Madrid. España
- Cochrane, M. A. (2001). Interacción sinérgica entre fragmentación del hábitat y incendios en bosques tropicales siempre verdes. *Biología de la Conservación*
- CONABIO. (1998). La diversidad biológica de México: Estudio de País, 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México
- CONABIO. (2023). La gran travesía. Biodiversidad Mexicana.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/espPrioritaria/monarca/travesia>
- CONAFOR. (2009). Situación fitosanitaria forestal en la Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca. Reporte. México: Coordinación General de Conservación y Restauración, Comisión Nacional Forestal.

- CONAFOR. (2024). Incendios - Sistema Nacional de Información Forestal. Sistema Nacional de Información Forestal.
<https://snif.cnf.gob.mx/incendios/#:~:text=La%20CONAFOR%20coordina%20la%20elaboraci%C3%B3n>
- CONAGUA. (2005). Sistema Cutzamala Agua para millones de mexicanos [Sistema Cutzamala Agua para millones de mexicanos], Cutzamala.pdf, 48.
<https://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/sistema-cutzamala.pdf>
- CONANP. (2001) Programa de manejo Reserva de la Biosfera mariposa Monarca. México. 140 pp. https://simec.conanp.gob.mx/pdf_libro_pm/40_libro_pm.pdf
- CONANP. (2023). Áreas Naturales Protegidas. Gob.mx. <https://www.gob.mx/conanp/documentos/areas-naturales-protegidas-278226#:~:text=Las%20%C3%81reas%20Naturales%20Protegidas%20federales>
- Cornejo-Tenorio, G., Casas, A., Farfán, B., Villaseñor, J. L., & Ibarra-Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México, (73), 43-62.
- Cuevas-Guzmán, R., Cisneros-Lepe, E. A., Jardel-Peláez, E. J., Sánchez-Rodríguez, E. V., Guzmán-Hernández, L., Núñez-López, N. M., & Rodríguez-Guerrero, C. (2011). Análisis estructural y de diversidad en los bosques de *Abies* de Jalisco, México. Revista Mexicana de Biodiversidad, 82(4), 12191233.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532011000400016
- Diario Oficial de la Federación. (2024). DOF - Diario Oficial de la Federación. Dof.gob.mx. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=767809
- Digital Globe. 2005. QuickBird Imagery Products, Product Guide. Logmont, Colorado, USA. 68.
- Domínguez, M. (2023). mariposa Monarca México. Www.wwf.org.mx. https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/ecosistemas_terrestres/mariposa_monarca/#:~:text=Las%20monarca%20son%20una%20especie

- FAO (1993). The Challenge of Sustainable Forest Management. What future for the world's forests? Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.
- Farfán-Gutiérrez, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J.-F., y Ramírez-Ramírez, I. (2018). Modelación de los factores antrópicos como conductores de la ocurrencia de incendios forestales en la Reserva de la Biosfera de la mariposa Monarca. *Madera Y Bosques*, 24 (3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- Farfán-Gutiérrez, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J. F., & Ramírez-Ramírez, I. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y bosques*, 24(3).
<https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- Flores-Yepes, G. Y., Rincon-Santamaría, A., Cardona, P. S., & Álvarez, A. M. A. (2017). Análisis multitemporal de las coberturas vegetales en el área de influencia de las minas de oro ubicadas en la parte alta del sector de Maltería en Manizales, Colombia. *Dyna-Colombia*, 84(201), 95–95pp.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.55759>
- Gámez, PAG., R. (2011). Guía para la Elaboración de Mapas de Distribución Potencial. Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/personal/mgamez/files/2010/07/guia-version-germoplasma.pdf>
- Góngora-Sansón, K. M. (2020). Reservas de la Biosfera de la Mariposa Monarca (*Danaus plexippus L.*) en el Estado de México: Ecoturismo y Educación Ambiental [Universidad Autónoma del Estado de México Centro Universitario UAEM Tenancingo Licenciatura en Turismo].
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/109118/TUREnsayo-Karla%20Margot%20S.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González, H. C. (2014). Áreas prioritarias mediante escenarios de deforestación y servicios ambientales en la Sierra Norte de Puebla. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.
http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/handle/10521/2248/Chavez_Gongalez_H_MC_Forestal_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- González, H. C., González, G., Manuel de Jesús., & Hernández, D, P. (2015). Metodologías para identificar áreas prioritarias para conservación de ecosistemas naturales. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 8-23.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000100002&lng=es&tlng=es
- González-Ovando, M. L., Plascencia-Escalante, F. O., & Martínez-Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán. *Madera y bosques*, 22(2), 41–52.
 doi:10.21829/myb.2016.2221323
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Halperin, J., LeMay, V., Coops, N., Verchot, L., Marshall, P., & Lochhead, K. (2016). Canopy cover estimation in miombo woodlands of Zambia: Comparison of Landsat 8 OLI versus RapidEye imagery using parametric, nonparametric, and semiparametric methods. *Remote Sensing of Environment*, 179, 170–182. doi: 10.1016/j.rse.2016.03.028
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science (New York, N.Y.)*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Islas-Báez, A., Pérez-Miranda, R., González-Hernández, A., Romero-Sánchez, M. E., & Velasco-Bautista, E. (2015). Riesgo del hábitat de la mariposa Monarca (*Danaus plexippus*) ante escenarios de cambio climático. *Ra ximhai*, 11 (5), 49-59.
- Leautaud-Valenzuela, P., & López-García, J. (2017). Detección de árboles dañados por plaga en bosques de *Abies religiosa* en la Reserva de la Biosfera mariposa Monarca, mediante fotografías aéreas infrarroja. *Investigaciones Geograficas*, 92. <https://doi.org/10.14350/rig.50249>

- LEGPEA. (2024). Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.
<https://www.diputados.gob.mx/LeyBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- López-García, J. (2007). Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 – 2007). Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN). Agosto 2007. México, D.F.
https://awsassets.panda.org/downloads/071126_eval_forestal_monarca06_07.pdf
- López-García, J. (2013). Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca: aportes para su conocimiento y conservación, UNAM, Instituto de Geografía. 136
<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/37/37/110-1>
- López-Gómez, V., Arriola-Padilla, V. J., & Pérez-Miranda, R. (2018). Daños por factores abióticos y bióticos en bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham.) de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(29), 56–73. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i29.216>
- López-Gómez, V., Arriola-Padilla, V. J., & Pérez-Miranda, R. (2015). Daños por factores abióticos y bióticos en bosques de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schlttdl. et Cham.) de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(29), 56-73.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322015000300005&lng=es&tlng=es.
- Loya-Carrillo, J. O., & Mass-Caussel, J. F. (2020). Análisis del proceso de deforestación en el estado de Michoacán: de lo espacial a lo social. *Revista cartográfica*, 101, 99–117. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i101.670>
- Martínez Torres, H. L. (2018). "Uso y manejo del fuego por comunidades rurales en bosques de coníferas en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México". (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/74752>
- Martínez-Meza, F. (2020). Atención a un incendio forestal en la reserva de la biosfera mariposa monarca. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. Comisión nacional de áreas naturales protegidas. Informe final SNIB-CONABIO, Proyecto No. SR009. Ciudad de México.

- Mendoza-Chichipe, M. E., Salas-López, R., & Barboza-Castillo, E. (2017). Análisis multitemporal de la deforestación usando la clasificación basada en objetos, distrito de Leymebamba (Perú). *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.25127/indes.201502.008>
- Morales-Manilla, L. M., & Cuevas, G. (2011). Inventarios 1974–2007 y evaluación de impacto ambiental regional del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán. Informe Final. *Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM. Morelia, Mich.*
- NASA. (2023). Landsat Next Defined / *Landsat Science*. A Joint NASA/USGS Earth Observation Program. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-next-defined/>
- National Geographic. (2017). Mariposa monarca. National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/animales/mariposa-monarca>
- Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado-Izquierdo, J. M., Propin-Frejomil, E., Delgado-Campos, J., Velázquez-Montes, A., Chias-Becerril, L., Ortiz-Álvarez, M. I., González-Sánchez, J., Negrete-Fernández, G., Gabriel-Morales, J., & Márquez-Huitzil, R. (2004). . Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT, Instituto de Geografía de la UNAM y Secretaría de Desarrollo Social. Convenio SEDESOL-Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F., México. 161. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/161/149/818-1>
- Paula, P. A., Zambrano, L., & Paula, P. (2018). Análisis Multitemporal de los cambios de la vegetación, en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo como consecuencia del cambio climático. *Enfoque UTE*, 9(2), 125–137. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n2.252>
- Paz-Salinas, M. F. (2008). De áreas naturales protegidas y participación: convergencias y divergencias en la construcción del interés público. *Nueva antropología*, 21(68), 51-74. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-06362008000100004&lng=es&tlng=es
- Pérez Olvera, C. de la paz. (2000). Relación estructural propiedades físico-mecánicas de la madera de algunas especies de encinos (*Quercus*) mexicanas. (Tesis de Doctorado). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F <https://repositorio.unam.mx/contenidos/68419>

- Pérez, L. M., & Apolinar, M. H. (2004). Destrucción de instituciones comunitarias y deterioro de los bosques en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, Michoacán, México. *Revista mexicana de sociología*, 66(2), 261.
<https://doi.org/10.2307/3541458>
- Pérez-Gutiérrez, C., y Muñoz Nieto, Á. L. (2002). Teledetección: nociones y aplicaciones. <https://mundocartogeo.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/03/teledeteccion-nocionesaplicaciones-2006publico.pdf>
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Antigua carretera a Pátzcuaro, núm. 8701. C. P. 58190. Morelia, Michoacán, México.,. Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, XIX (1), 157–173.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.06.042>
- Pinto-Argel, S. (2022). Evaluación de amenaza y vulnerabilidad social, económica, ambiental e institucional por inundación de desborde en la vereda El Playón, municipio de Lorica – Córdoba.
- Puyravaud, J. P. (2003). Estandarizando el cálculo de la atasa anual de deforestación. *Ecología forestal sociología y gestión* 177 (1-3) 593-596. Doi:10.1016/S0378 - 1127(02)00335 -3.
- Quezada, A. S., Sevilla Tapia, J. D., & Avilés Sacoto, E. C. (2022). Estimación de la tasa de deforestación en Pastaza y Orellana- Ecuador mediante el análisis multitemporal de imágenes satelitales durante el período 2000-2020. *Revista Alfa*, 6(17), 282–299.
<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.168>
- Ramírez, M.I. y R. Zubieta. (2005). Análisis regional y comparación metodológica del cambio en la cubierta forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca. Reporte Técnico preparado para el Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca. México D.F.
https://awsassets.panda.org/downloads/mmonarca_analisis_cambio_forestal.pdf

- Rendón-Salinas, E. (2012). La propiedad social como limitante o promotor de la conservación. Memorias del seminario propiedad social y servicios ambientales noviembre 2011, Ciudad de México.
- Rendón-Salinas, E., & Tavera-Alonso, G. (2013). Monitoreo de la superficie forestal ocupada por las colonias de hibernación de la mariposa monarca en diciembre de 2012. *Panda.org*.
https://awsassets.panda.org/downloads/rep_monitoreo_colonias_mariposa_monarca_2012_2013.pdf
- Rosales Malpartida, J. Y., & Apaza Mamani, H. A. (2022). Análisis de imágenes satelitales Landsat 8 por componentes principales y MNF para la detección de zonas del derrame de petróleo Repsol en la Costa Peruana. *TecnoHumanismo*, 2(2), 172–189.
<https://doi.org/10.53673/th.v2i2.110>
- Rosero-Mier, M. M. (2018). Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tahuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura [Tesis de maestría, Universidad Técnica del Norte de posgrado]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7745>
- Ruiz, V., Savé, R., & Herrera, A. (2013). Multitemporal analysis of land use change in the Terrestrial Protected Landscape Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Ecosistemas: revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 22(3), 117–123. <https://doi.org/10.7818/ecos.2013.22-3.16>
- Salas-Canela, L. (2013). Causas directas del cambio en las cubiertas del suelo en la Región Mariposa Monarca: un análisis multiescalar. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Filosofía y Letras.
<http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0707322/Index.html>
- Sandoval-García, R., González-Cubas, R., & Jiménez-Pérez, J. (2021). Análisis multitemporal del cambio en la cobertura del suelo en la Mixteca Alta Oaxaqueña. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(66).
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.816>
- Sandoval-García, R., Jiménez-Pérez, J., Yerena-Yamallel, J. I., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Gómez-Meza, M. V. (2022). Estrategias de restauración ecológica asociadas a reforestaciones de *Pinus cembroides* Zucc., en el Parque

- Nacional Cumbres de Monterrey. *Madera y bosques*, 28(2), e2822298.
<https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822298>
- SEMARNAT. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de La Federación. México.
- Sistemas de información Geográfica Del Sector Educativo. (SIGSE) (2024). ¿Qué es un SIG? Ministerio de Educación Nacional de Colombia.
<https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-190610.html>
- Solórzano, J. V., Gallardo-Cruz, J. A., & Peralta-Carreta, C. (2020). Potencial del acervo de imágenes Landsat disponible en Google Earth Engine para el estudio del territorio mexicano. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59821>
- Vidal, O., López-García, J., & Rendón-salinas, E. (2014). Tendencias en deforestación y degradación forestal después de una década de monitoreo en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en México. *Biología de la conservación: Revista de la Sociedad de Biología de la Conservación*, 28 (1), 177–186.
<https://doi.org/10.1111/cobi.12138>
- WWF. (2023). Disminuye 22% la presencia de mariposas Monarca en México.
[Www.wwf.org.mx. https://www.wwf.org.mx/?381891/Disminuye-22-la-presencia-de-mariposas-Monarca-en-los--bosques-de-hibernacion-de-Michoacan-y-el-Estado-de-Mexico](https://www.wwf.org.mx/?381891/Disminuye-22-la-presencia-de-mariposas-Monarca-en-los--bosques-de-hibernacion-de-Michoacan-y-el-Estado-de-Mexico)
- Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2–10.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>