VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Análisis multitemporal de la pérdida de cobertura arbórea de bosques de encino y pino-encino en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato mediante aprendizaje automático y datos satelitales.

Multi-temporal analysis of tree cover loss of oak and pine-oak forests in the Sierra Gorda de Guanajuato Biosphere Reserve using machine learning and satellite data.

Jorge Delgado Manrique[1], Edgar Pedro Méndez Vázquez [2,*], Victor Hugo Cambron Sandoval, Fidel Landeros Jaime [3]
[1]Departamento de Veterinaria y Zootecnia, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
j.delgadomanrique@ugto.mx
[2]Departamento de Agronomía, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato.
edgar.mendez@ugto.mx
[3]Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro.
victor.cambron@uaq.mx ; landeros@uaq.mx
*Autor de Correspondencia

Resumen

La variación de las características estructurales de los ecosistemas templados está influenciada por factores bióticos, abióticos y antropogénicos. Los bosques de encino (*Quercus spp*.) y pino-encino proporcionan servicios ecosistémicos y ambientales clave para la conservación biológica y la estabilidad climática regional. Sin embargo, la persistencia de estos servicios está supeditada al mantenimiento de su estructura y cobertura dosel. Estudios a escala regional sobre la dinámica de pérdida del arbolado en áreas naturales protegidas del centro de México son imperativos. Este estudio identifica y cuantifica de forma multitemporal el grado de afectación forestal al interior de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato (RBSGG), un área de 236,882.73 ha decretada en 2007. Mediante el uso de parcelas y polígonos de entrenamiento calibrados con datos de campo, se analizaron composiciones medianas multiespectrales de Sentinel-2 Nivel 2A para dos épocas: línea base T1 (2020–2022) y estado actual T2 (2023–2026). Utilizando el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest (smileRandomForest), se derivó un espacio de atributos robustecido con seis índices espectrales (NDVI, SAVI, NDWI, EVI, NDMI y BSI). El modelo categórico estratificó el grado de afectación en cinco clases cualitativas (sin afectación a pérdida total, >80%). Los análisis de cambio aritmético de cobertura y las diferencias continuas de verdor espectral (ΔNDVI) revelaron núcleos críticos de degradación moderada a severa concentrados en el sector suroccidental (Milpillas del Pito, La Hierba Buena, Puerto del Aire y Derramaderos). La evaluación estadística de la matriz de confusión determinó la confiabilidad del modelo mediante la Precisión Global (OA) y el Índice Kappa de Cohen. La baja redundancia espectral permitió la detección temprana de estrés hídrico y defoliación, consolidando esta metodología como una herramienta de manejo forestal sostenible a escala de paisaje. El análisis de laboratorio permitió identificar hongos endófitos del género *Biscogniaxia* y otros asociados a la infestación del cambium en arboles moribundos del género *Quercus* los cuales han sido documentados con hábitos oportunistas en arbolado expuesto a estrés ambiental.

Palabras clave: Teledetección, Deforestación, Reserva de la Biósfera Sierra Gorda de Guanajuato, Machine learning, Restauración.

Introducción

La caracterización y monitoreo de las condiciones estructurales de coberturas arbóreas a escala de paisaje son tareas fundamentales para la implementación de prácticas de manejo forestal sostenible y la conservación de la cobertura vegetal (Köthe *et al*., 2026). Los ecosistemas forestales templados dominados por encinos (*Quercus spp*.) y asociaciones de pino-encino albergan una alta biodiversidad y proveen servicios ambientales esenciales como la captura de carbono, la regulación hidrológica y la mitigación del cambio

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

climático (Rzedowski, 2006). México constituye uno de los centros de diversificación más importantes del género Quercus a nivel mundial, con más de 160 especies registradas, muchas de ellas endémicas de los ecosistemas de montaña del centro del país (Valencia, 2004; Rzedowski, 2006) y con más del 20 % de sus especies en algún grado de riesgo (Loza *et al*., 2026)

A pesar de su importancia ecológica, estos ecosistemas se encuentran sometidos a intensas presiones debidas a factores antropogénicos —tala ilegal, incendios recurrentes, sobrepastoreo— y agentes bióticos y abióticos exacerbados por el cambio climático —estrés hídrico prolongado, brotes de plagas y enfermedades forestales (Challenger & Soberón, 2008; Jardel-Peláez *et al.,* 2010), lo que resulta en una fragmentación y degradación acelerada del dosel arbóreo en áreas naturales protegidas del centro de México. Uno de los agentes de mayor importancia para los bosques de encino son los hongos endófitos del género *Biscogniauxia* (Graphostromataceae) causantes de la podredumbre blanca y en chancro carbonoso con afectaciones de grandes extensiones en varios Estados de la República Mexicana incluyendo Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Nayarit, en bosques de Iowa, Georgia y Oklahoma en los Estados Unidos de Norteamérica así como en regiones mediterráneas de España, Portugal y Norte de África (Collado *et al.,* 2001; Moreno-Rico *et al.,* 2010; Sosa-Ramírez *et al*., 2011)

Para formular acciones de planeación y mitigación efectivas, es indispensable que los instrumentos de ordenamiento territorial e institucional como los Programas de Manejo de las Áreas Naturales Protegidas incorporen información ecológica cuantitativa con las capas pertinentes y a escalas ajustada a la necesidad de interpretación de los fenómenos (Wasserman *et al.,* 2019). Tradicionalmente, las aproximaciones a escala local se han enfocado en inventarios dasométricos tradicionales o evaluaciones de salud de la copa en rodales específicos, careciendo de una perspectiva espacial continua y multitemporal a escala regional. La teledetección espacial, integrada con algoritmos de aprendizaje automático, ofrece una vía robusta para resolver esta limitación, permitiendo mapear gradientes de afectación con alta precisión y de forma estandarizada (Immitzer *et al.,* 2016; Gorelick *et al*., 2017).

El objetivo de este estudio fue desarrollar identificar a escala multitemporal la pérdida de cobertura arbórea en bosques de encino, pino-encino y encino-pino en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Guanajuato (RBSGG). Se evaluaron las variaciones de cobertura arbórea a partir de datos de sensores remotos calibrados con muestreos de campo, permitiendo discriminar niveles de degradación como insumos para planificar zonas de intervención ecológica y robustecer los esquemas de gobernanza forestal.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo al interior de la RBSGG, la cual cuenta con una superficie oficial decretada de 236,882.73 ha (DOF, 2 de febrero de 2007). El área se localiza en el noreste del estado de Guanajuato, México, abarcando porciones territoriales de los municipios de Atarjea, San Luis de la Paz, Santa Catarina, Victoria y Xichú (Figura 1). Geográficamente, está delimitada por las coordenadas UTM (Zona 14N, WGS84): X [347,049 m – 430,371 m] e Y [2,342,296 m – 2,398,789 m], presentando un gradiente altitudinal pronunciado que oscila entre los 1,400 y 2,900 msnm. Los bosques de encino (*Quercus spp*.) y las asociaciones fitosociológicas de pino-encino y encino-pino constituyen las comunidades vegetales dominantes en las regiones con mayor altitud y condiciones climáticas templadas y subhúmedas (Rzedowski, 2006).

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

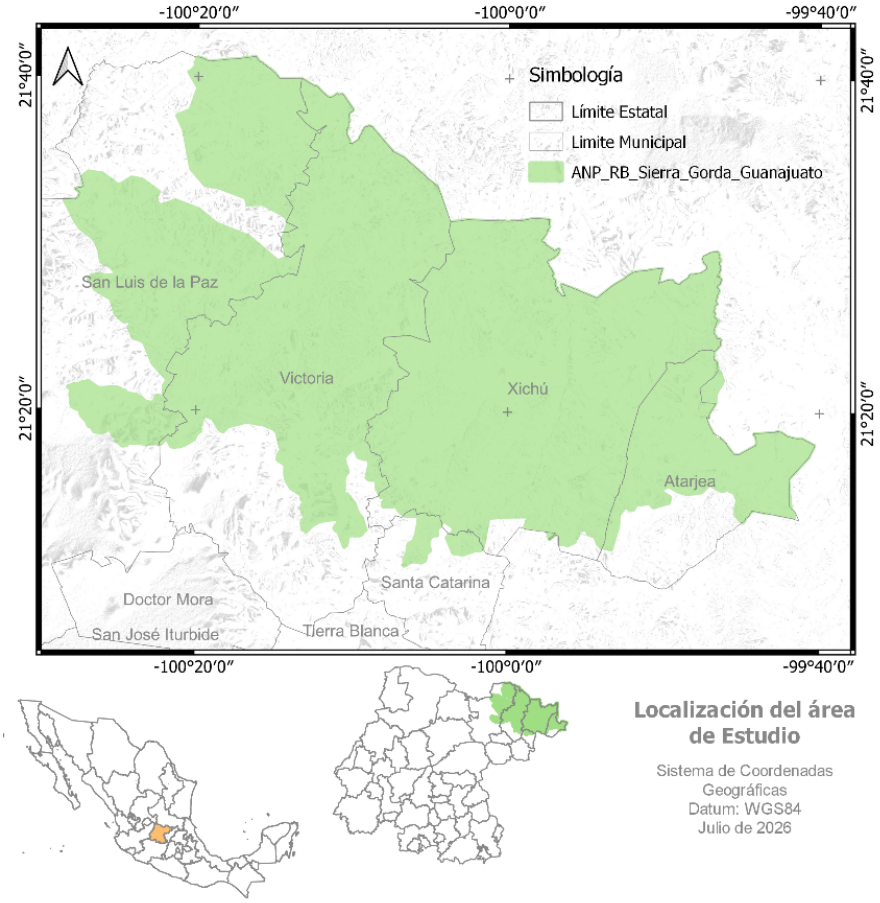


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Insumos cartográficos y datos de referencia

Para delimitar el área de análisis, se utilizó el polígono oficial en formato vectorial ShapeFile (EPSG:32614) provisto por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). Los datos de calibración y referencia biológica terrestre se obtuvieron mediante el levantamiento de polígonos de entrenamiento georreferenciados en sistema de coordenadas UTM zona 14 N con Datum WGS84 (EPSG:32614) con la ayuda de navegador Garmin eTrex30. Las unidades de muestreo (n = 6 polígonos) se distribuyeron estratégicamente en rodales afectados de las localidades de Milpillas del Pito, La Hierba Buena, Puerto del Aire y Derramaderos en el Municipio de Victoria, Casitas en el Municipio de Xichú así como en parajes ubicados entre las Comunidades de La Lagunita (Municipio de Atarjea) y Pinalito de la Glora (Municipio de Xichú), registrando de forma cualitativa y cuantitativa variables de cobertura y afectación observada en dosel (escala continua de 0% a 90%).

Preprocesamiento de imágenes satelitales

Se empleó la plataforma computacional en la nube Google Earth Engine (GEE) a través de su API de JavaScript (Gorelick *et al*., 2017). Como fuente de información espectral, se seleccionó la colección de imágenes multiespectrales de alta resolución Sentinel-2 Nivel 2A (reflectancia BOA o de superficie), integrada en la base de datos de GEE bajo la denominación COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED (ESA, 2022). Con el fin de mitigar la interferencia atmosférica y el ruido estacional, se implementó un criterio de filtrado estricto que seleccionó únicamente escenas con un porcentaje de cobertura de nubes inferior al 10% mediante el

metadato CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE. El enmascaramiento final de nubes opacas y cirros residuales se ejecutó a nivel de píxel operando algebraicamente la banda de calidad QA60 (bits 10 y 11, respectivamente). Las reflectancias originales se escalaron al rango dinámico continuo [0, 1] aplicando el factor de conversión multiplicativo estándar (0.0001).

Índices espectrales

Previo a la síntesis de las composiciones multitemporales se calcularon seis índices espectrales de la vegetación (Tabla 1).

Tabla 1. *Índices espectrales calculados sobre las composiciones Sentinel-2 L2A.*

Índice	Fórmula	Propósito	Referencia
NDVI	(NIR − RED) / (NIR + RED)	Evaluar vigor fotosintético y densidad del dosel foliar	(Rouse *et al.,* 1973)
SAVI	[(NIR − RED) / (NIR + RED + 0.5)] × 1.5	Mitigación de reflectancia de suelo desnudo (L = 0.5)	(Huete, 1988)
NDWI	(GREEN − NIR) / (GREEN + NIR)	Estado higrométrico y contenido de agua foliar	(Gao, 1996)
EVI	2.5 × (NIR − RED) / (NIR + 6·RED − 7.5·BLUE + 1)	Sensibilidad en zonas de alta densidad arbórea	(Liu & Huete, 1995)
NDMI	(NIR − SWIR1) / (NIR + SWIR1)	Estrés hídrico celular y marchitamiento	(Hardisky *et al.,* 1983)
BSI	[(SWIR1+RED)−(NIR+BLUE)] / [(SWIR1+RED)+(NIR+BLUE)]	Identificación de suelo desnudo por pérdida de cobertura	(Rikimaru *et al.*, 2002)

Algoritmo de clasificación supervisada

Los datos continuos se discretizaron en cinco clases ordinales de cobertura arbórea (Tabla 2).

Tabla 2. *Sistema de clasificación de la afectación de cobertura arbórea.*

Clase	Rango Porc_afect	Descripción	Color cartográfico
0	0%	Sin afectación — masa forestal íntegra con dosel cerrado	Transparente
1	1–20%	Afectación leve — aperturas puntuales en el dosel	Durazno (#fadfa8)
2	21–50%	Afectación moderada — degradación evidente por estrés o plagas	Naranja (#fb7050)
3	51–80%	Afectación severa — pérdida mayoritaria del dosel	Rojo (#d32020)
4	81–100%	Pérdida total — ausencia de arbolado y dominancia de suelo desnudo	Guinda (#67000d)

Se parametrizó el clasificador basado en ensamble de árboles de decisión smileRandomForest (Breiman, 2001) en GEE con 200 árboles (numberOfTrees = 200), 6 variables por nodo de división (variablesPerSplit = 6, equivalente a √n_bandas), una fracción bootstrap de 0.632 (bagFraction) y semilla aleatoria reproducible (seed = 42). El 70% de las muestras extraídas de los polígonos de entrenamiento se utilizó para ajuste del modelo y el 30% restante para validación externa mediante matriz de confusión (Congalton & Green, 2019).

Identificación de hongos endófitos del género Biscogniauxia.

Se utilizaron muestras de troncos muertos recolectados durante los años 2024 y 2025 para identificar presencia de hongos endófitos y se cultivaron en medio PDA en el Laboratorio de Caracterización Molecular y Nanoparticulas (LACAMBION) en el Centro Interdisciplinario del Noreste de la Universidad de Guanajuato y se enviaron a identificación mediante análisis PCR en el Laboratorio de Micología de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Resultados

Las variables analizadas a nivel de píxel revelaron diferencias en la estructura y salud del dosel a lo largo de las distintas épocas temporales en 54,280.57 hectáreas en diferentes grados (Cuadro 1). A nivel de campo y validación espectral, se identificó que las mayores áreas afectadas ocurrieron en comunidades de bosque de Encino (BQ) y asociaciones con pino-encino y encino-pino (BPQ y BQP) abarcando el 52.49 % de la afectación del estrato arbóreo dentro de la RBSGG. Los polígonos con afectación severa (Clase 3) y pérdida total de cobertura arbórea (Clase 4) se localizaron en el sector suroccidental de la reserva (Figura 2), afectando críticamente rodales de encino y pino-encino con afectaciones de hasta el 90 % del arbolado.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

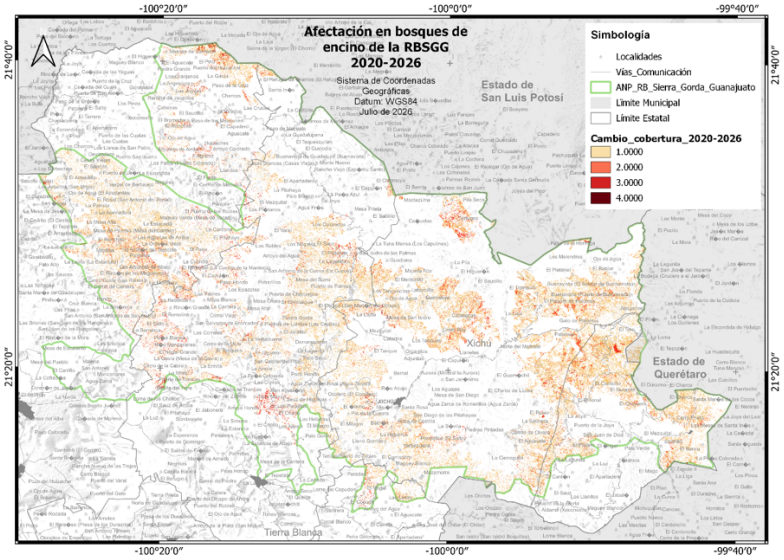


Figura 2. Zonas de afectación al arbolado en bosques de Encino y asociaciones con otras especies de arbolado.

Las áreas que transitaron de una condición boscosa íntegra en el periodo base (T1: 2020–2022) a niveles severos de pérdida en el periodo actual (T2: 2023–2026) se expresaron con valores de cambio de 3 y 4. Complementariamente, el análisis continuo de reflectancia evidenció que los valores típicos de NDVI base para los bosques de *Quercus* sanos fluctuaron entre 0.25 y 0.55 durante las fases de mayor humedad, descendiendo por debajo del umbral de 0.20 en las áreas con pérdida neta en la composición T2.

Cuadro 1. *Superficies de cobertura arbórea por clase de afectación en la época T2 (2020–2026) al interior de la RBSGG. Valores calculados a partir del raster de clasificación supervisada (EPSG:32614, 10 m resolución).*

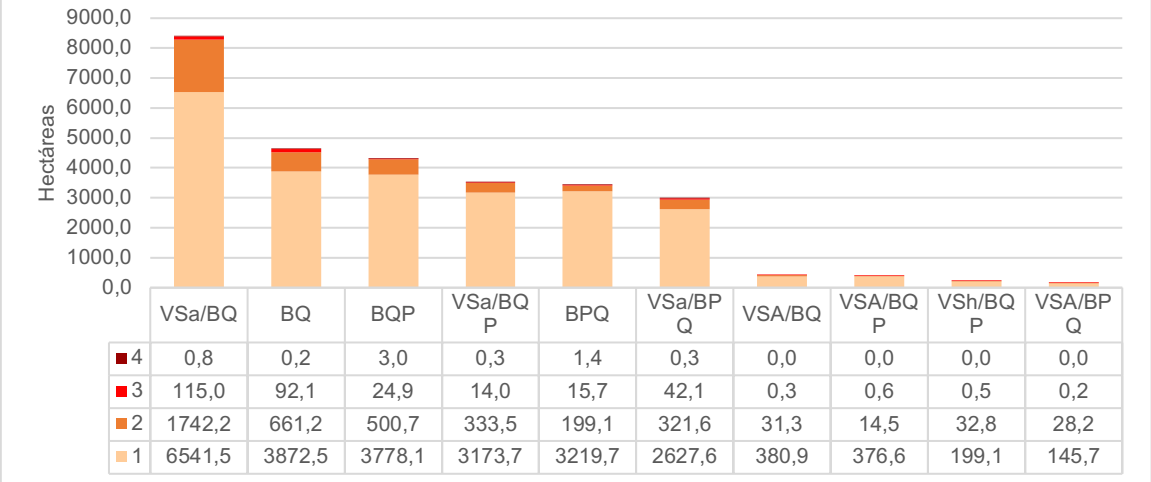
Clase	Descripción	Has afectadas RBSGG (ha)	Has de bosque de comunidades de encino afectadas.	%
1	Afectación leve (<20%)	40,679.05	24,315.22	59.77
2	Afectación moderada (21–50%)	12,069.22	3,865.01	32.02
3	Afectación severa (51–80%)	1,523.55	305.40	20.05
4	Pérdida total (>80%)	8.75	5.96	68.11
Total	—	54,280.57	28,491.59	52.49

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

***Cuadro 2**. Métricas de validación del clasificador Random Forest obtenidas de la matriz de confusión (30% muestras de validación).*

Métrica	Valor	Umbral aceptable
Precisión Global (OA)	Pendiente de consola GEE (n_val=1,659; n_train=3,956)	> 0.80
Índice Kappa de Cohen	Pendiente de consola GEE (n_val=1,659; n_train=3,956)	> 0.70
Precisión del Productor — Clase 0	NDVI media=0.5934 (275 muestras)	—
Precisión del Productor — Clase 4	NDVI media=0.3396 (38 muestras)	—
Precisión del Usuario — Clase 3	NDVI media=0.3767 (51 muestras)	—

El análisis de cambios de reflectancia mostró que las comunidades dominadas por encinos fueron las de mayor afectación alcanzando un 47.16 % respecto al total de superficie afectada en otras comunidades con presencia de encino (Figura 3).



	VSa/BQ	BQ	BQP	VSa/BQP	BPQ	VSa/BPQ	VSA/BQ	VSA/BQP	VSh/BQP	VSA/BPQ
4	0,8	0,2	3,0	0,3	1,4	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
3	115,0	92,1	24,9	14,0	15,7	42,1	0,3	0,6	0,5	0,2
2	1742,2	661,2	500,7	333,5	199,1	321,6	31,3	14,5	32,8	28,2
1	6541,5	3872,5	3778,1	3173,7	3219,7	2627,6	380,9	376,6	199,1	145,7

Figura 3. Superficies afectadas en comunidades de encino presentes en la RBSGG. Abreviaturas: VSa/BQ: Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino; BQ: Bosque de encino; BQP: Bosque de encino-pino; BSa/BQP: Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino; BPQ: Bosque de pino-encino; VSa/BPQ: Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino; VSA/BQ: Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino; VSA/BQP: Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino; VSh/BQP: Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino-pino; VSA/BPQ: Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino.

Por otro lado, los resultados del análisis de troncos de árboles moribundos permitieron identificar signos típicos de hongos endófitos del género *Biscogniauxia* como el chancro carbonoso alojado en el cambium de los ejemplares moribundos (Figura 4). Una vez que se establecieron en medio de cultivo PDA se pudo observar crecimiento asexual de las hifas así como esporas típicas del género (Figura 5). Los resultados de la prueba PCR muestran predominancia de Biscogniauxia atropunctata (Ba) asociado a por lo menos 7 especies más de hongos endófitos.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx



***Figura 4**. Evidencias de chancro carbonoso en ejemplares de Quercus spp en el Ejido Paso de Guillermo, Municipio de Xichú, Gto.*



***Figura 5**. Cultivo de los hongos endófitos obtenidos de ejemplares moribundos de Quercus spp y observaciones en microscopio de las hifas cultivadas.*

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Discusión

Los resultados confirman una tendencia de degradación activa en los bosques de encino, encino-pino y pino-encino de la RBSGG durante el periodo 2020–2026, con núcleos críticos en el sector suroccidental (Milpillas del Pito, La Hierba Buena, Puerto del Aire y Derramaderos). Esta distribución espacial es consistente con lo documentado por (Pérez-Vega *et al*., 2016), quienes mediante imágenes SPOT-5 para el periodo 2004–2011 en el mismo sitio reportaron que aproximadamente el 60% de la superficie de la RBSGG presentaba algún grado de degradación forestal, con las pérdidas más significativas en el bosque de encino (BQ), donde la superficie de arbolado abierto a medio duplicaba a la de arbolado cerrado (31,349 ha vs. 14,643 ha). El presente análisis, al extender la ventana temporal hacia 2023–2026 con mayor resolución espectral (Sentinel-2 a 10 m), permite inferir que la problemática de degradación identificada para 2004–2011 no solo persiste, sino que se ha intensificado en las localidades de muestreo del sector suroccidental.

La heterogeneidad espacial de la degradación detectada en la RBSGG sigue un patrón documentado en otras regiones del centro de México. En la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (RBMM), un análisis multitemporal reciente reportó pérdidas de cobertura forestal de 87% en bosque de encino y 69% en bosque de pino entre 1994 y 2023, con un total de 6,389 ha perdidas (Palacios-Carrillo *et al.,* 2025). Aunque la magnitud en la RBMM es considerablemente mayor —atribuible a su mayor accesibilidad y presión demográfica—, la selectividad de la afectación hacia los bosques de encino y la progresiva apertura del dosel replican el patrón detectado en el sector suroccidental de la RBSGG. En contraste, en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM), los bosques de encino-pino y encino registraron tasas anuales de recuperación positivas durante 2000–2018 (+0.272 y +0.245 respectivamente), con una ganancia neta de 3,590 ha (Jiménez Pérez *et al.,* 2021). Esta divergencia respecto a los resultados de la RBSGG podría explicarse a partir de diferencias en el régimen hídrico, la gobernanza territorial y la eficacia de los programas de pago por servicios ambientales en cada ANP.

(Pérez-Vega *et al*., 2016) identificaron que en la RBSGG durante 2004–2011 las mayores tasas de degradación del BQ implicaron una transición de arbolado cerrado a arbolado medio, con pérdidas de 3.6% (539 ha). El presente estudio amplía este diagnóstico al cubrir el periodo 2020–2026 mediante clasificación supervisada automatizada (Random Forest), lo que permite una detección más objetiva y reproducible de los gradientes de afectación, directamente vinculada a condiciones observadas *in situ* (porcentajes de afectación del 0% al 90%). La eficacia del clasificador es coherente con su uso extensivo en teledetección forestal con Sentinel-2 (Belgiu & Drăguţ, 2016; Immitzer *et al.,* 2016). La integración de índices complementarios —SAVI (L=0.5), NDWI y NDMI— resultó determinante para mitigar los efectos del suelo desnudo en laderas degradadas (Huete, 1988; Hardisky *et al.,* 1983). (Alfaro-Reyna *et al*., 2022) documentaron en bosques de pino-encino de Tamaulipas que sequías prolongadas (2004–2010) combinadas con brotes de *Dendroctonus sp*. generaron reducciones significativas en el área basal del arbolado, patrón que podría estar operando en la RBSGG dado el estrés hídrico reflejado en los valores de NDMI y NDWI de la composición T2.

La asociación de *Ba* en ejemplares moribundos de *Quercus* es concordante con lo reportado en otras regiones de México por (Moreno-Rico *et al.* 2010) y (Sosa-Ramírez *et al.* 2011) así como en regiones de Estados Unidos, Europa y África (Jia *et al.,* 2020; Khan *et al.,* 2025; Köthe et al., 2026; Loza *et al.,* 2026; Ma *et al.,* 2020; Wasserman *et al.,* 2019). Con el presente estudio se confirma la presencia de Ba en la RBSGG, exhibiendo el comportamiento oportunista típico de éste hongo endófito que prolifera en condición de estrés arbóreo; en el caso de la RBSGG fue inducido por una prolongada sequía durante los años 2022-2024 según reportes de los pobladores locales.

No obstante sus fortalezas, el estudio presenta limitaciones. La concentración geográfica de los polígonos de entrenamiento en la porción suroccidental restringe la representatividad del modelo en el sector nororiental (municipios de Atarjea y Victoria), donde Pérez-Vega et al. (2016) también identificaron degradación forestal moderada a alta. Asimismo, el umbral de NDVI > 0.25 puede resultar conservador en rodales de baja densidad. Se recomienda para estudios futuros ampliar la red de polígonos hacia los sectores norte y este de la reserva, incorporar datos del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) como referencia dasométrica, y considerar la integración de imágenes Sentinel-1 para mejorar la discriminación en condiciones de cobertura nubosa estacional.

Conclusiones

Los resultados confirman que los ecosistemas forestales tuvieron fuertes afectaciones, manifestada en heterogénea, lo cual demanda estrategias de planificación forestal diferenciadas y adaptadas a las condiciones locales del sitio. Se subraya la urgencia de estructurar programas de restauración dirigidos empleando genotipos nativos de *Quercus* adaptados a estrés hídrico. El uso de Sentinel-2 y Google Earth Engine como herramientas de bajo costo y alta replicabilidad para el análisis y la planificación de áreas naturales protegidas en México (Gorelick *et al.,* 2017).

Referencias

Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,* 114, 24–31. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Collado, J., Platas, G., & Pelaez, F. (2001). Identification of an Endophytic Nodulisporium sp. from Quercus ilex in Central Spain as the Anamorph of Biscogniauxia mediterranea by rDNA Sequence Analysis and Effect of Different Ecological Factors on Distribution of the Fungus. *Mycologia*, 93(5), 875. https://doi.org/10.2307/3761753

Challenger, A., & Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En J. Soberón, G. Halffter & J. Llorente-Bousquets (Eds.), Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad (pp. 87–108). CONABIO.

Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (3rd ed.)*. CRC Press.

ESA — European Space Agency. (2022). *Sentinel-2 User Handbook.* ESA Standard Document. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi

Gao, B. C. (1996). NDWI — A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3

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

Hardisky, M. A., Klemas, V., & Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on spectral reflectance of Spartina alterniflora canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,* 49(1), 77–83.

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment,* 25(3), 295–309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Immitzer, M., Vuolo, F., & Atzberger, C. (2016). First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe. *Remote Sensing,* 8(3), 166. https://doi.org/10.3390/rs8030166

Jardel-Peláez, E. J., Alvarado, E., Morfín-Ríos, J. E., Castillo-Navarro, F., & Flores-Garnica, J. G. (2010). Regímenes de fuego en ecosistemas forestales de México. *Ciencia Forestal en México*, 35(107), 73–99.

Jia, Q., Qu, J., Mu, H., Sun, H., & Wu, C. (2020). Foliar endophytic fungi: diversity in species and functions in forest ecosystems. *Symbiosis,* 80(2), 103–132. https://doi.org/10.1007/s13199-019-00663-x

Jiménez Pérez, J., Sandoval-García, R., Yerena-Yamallel, J. I., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Gómez-Meza, M. V. (2021). Análisis multitemporal del uso del suelo y vegetación en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 12(66). https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.896

Khan, M., Shamsi, S., Akhlaq, S., Javed, G., & Parveen, F. S. (2025). Ethnobotanical, phytochemical and pharmacological aspects of Quercus species with special emphasis on Unani medicinal plant Quercus incana Roxb. (Baloot): An update. *Clinical Traditional Medicine and Pharmacology,* 6(4), 200–255. https://doi.org/10.1016/j.ctmp.2025.200255

Köthe, K., Penanhoat, A., & Seidel, D. (2026). On the link between productivity and complexity and how it scales from tree to stand level. *Forest Ecology and Management,* 618, 124045. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2026.124045

Liu, H. Q., & Huete, A. R. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* 33(2), 457–465. https://doi.org/10.1109/36.377946

Loza, M. I., Althaus, K., Smith, A. B., Valencia-A., S., Cannon, C. H., & Alvarez-Clare, S. (2026). Prioritization of areas for conservation of oaks (Fagaceae: Quercus) across their global biodiversity hotspot based on richness, endemism, and introgression. *Global Ecology and Conservation*, 68, e04251. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2026.e04251

Ma, X.-Y., Nontachaiyapoom, S., Hyde, K. D., Jeewon, R., Doilom, M., Chomnunti, P., & Kang, J.-C. (2020). Biscogniauxia dendrobii sp. nov. and B. petrensis from Dendrobium orchids and the first report of cytotoxicity (towards A549 and K562) of B. petrensis (MFLUCC 14-0151) in vitro. *South African Journal of Botany*, 134, 382–393. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.06.022.

Mas, J. F., Velázquez, A., & Couturier, S. (2009). La evaluación de los cambios de cobertura/uso del suelo en la República Mexicana. *Investigación Ambiental,* 1(1), 23–39.

Moreno-Rico, O., Velásquez-Valle, R., Sánchez-Martínez, G., Siqueiros-Delgado, M. E., de La Cerda-Lemus, M., & Díaz-Moreno, R. (2010). Phytopathological diagnosis of major diseases in various species of oak and its distribution on the Sierra Fria, Aguascalientes, México. *Poibotánica,* 29(ISSN 1405-2768), 165–189.

Palacios-Carrillo, A. L., Sandoval García, R., Flores-López, C., & Méndez-González, J. (2025). Pérdida de ecosistemas forestales en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (1994-2023). *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 16(92), 28–53. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i92.1524.

Rikimaru, A., Roy, P. S., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology,* 43(1), 39–47.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En Third ERTS Symposium, NASA SP-351 (Vol. 1, pp. 309–317). NASA.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), México.

Valencia, S. (2004). Diversidad del género Quercus (Fagaceae) en México. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 75, 33–53. https://doi.org/10.17129/botsci.1692

Alfaro-Reyna, T., Delgado-Balbuena, J., García-Cuevas, X., Chávez-Aguilar, G., & Estrada-García, J. A. (2022). Cambios en la estructura y composición forestal en un bosque de pino-encino en Jaumave, Tamaulipas, México. *e-CUCBA,* 19(239). https://doi.org/10.32870/e-cucba.v1i19.239

Pérez-Vega, A., Rocha Álvarez, F., & Regil García, H. H. (2016). Distribución espacial del uso/cubierta del suelo y degradación forestal en la reserva de la biosfera Sierra Gorda de Guanajuato. *Acta Universitaria,* 26(NE-2), 33–44. https://doi.org/10.15174/au.2016.1500.

Sosa-Ramírez, J., Moreno-Rico, O., Sánchez-Martínez, G., Siqueiros-Delgado, M. E., & Díaz-Núñez, V. (2011). Ecología y fitosanidad de los encinos (Quercus spp.) en la Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques,* 17(3), 49–63.

Wasserman, T. N., Sánchez Meador, A. J., & Waltz, A. E. M. (2019). Grain and Extent Considerations Are Integral for Monitoring Landscape-Scale Desired Conditions in Fire-Adapted Forests. *Forests,* 10(6), 465. https://doi.org/10.3390/f10060465