

ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA INFESTACIÓN POR PHORADENDRON VILLOSUM EN BOSQUES DE ENCINOS EN DURANGO

SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF PHORADENDRON VILLOSUM INFESTATION IN OAKS FORESTS IN DURANGO

Artículo recibido el: 10/9/2025

Artículo aceptado el: 1/9/2026

Mónica Yazmín Flores Villegas*

*Universidad Politécnica de Durango, Durango, Dgo. México

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2052-607X>
monica.flores@unipolidgo.edu.mx

Christian Ríos Chavarría*

*Universidad Politécnica de Durango, Durango, Dgo. México

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-2242-811X>
christian.rios@unipolidgo.edu.mx

Elena Carrillo Rodríguez**

**Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios #89, Durango, Dgo. México

Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-1593-3731>
elenacr300120@gmail.com

María Berenice González Maldonado***

***Instituto Politécnico Nacional CIIDIR unidad Durango, Durango, Dgo. México

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6018-0478>
bereciidir@hotmail.com

The authors declare that there is no conflict of interest

Resumen

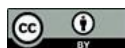
La creciente demanda de uso y cambio de suelo, así como el cambio climático han propiciado el incremento en el parasitismo forestal, como lo es el muérdago verdadero *Phoradendron villosum*, el cual parasita a encinos (*Quercus convallata* y *Quercus durifolia*) presentes en los bosques de Durango, por lo tanto, es necesario fomentar el uso de herramientas que nos permitan identificar la evolución temporal de los bosques de encinos con respecto al ataque de enfermedades. En la presente investigación se utilizaron imágenes satelitales de Sentinel 2 L2A del servidor Copernicus Browser para poder realizar el análisis espacio-temporal y la combinación de índices de vegetación. Para la zona de estudio se identificó un deterioro progresivo en la cobertura vegetal, con una marcada disminución en la densidad y salud de la vegetación entre 2020 y 2023. Encontrando también una correlación entre la actividad antropogénica y el aumento del estrés ambiental, facilitando la dispersión del muérdago y exacerbando el deterioro de la vegetación.

Palabras clave: Bosque. Plantas Parásitas. *Phoradendron*. *Quercus*.

Abstract

The growing demand for land use and land use change, as well as climate change, have led to an increase in forest diseases such as the true mistletoe (*Phoradendron villosum*), which parasitizes oaks in the forests of Durango. Therefore, it is necessary to promote the use of tools that allow us to identify the temporal evolution of oak forests with respect to disease attacks. In this research, Sentinel 2 L2A satellite images from the Copernicus Browser server were used to perform the spatial-temporal analysis and the combination of vegetation indices. For the study area, a progressive deterioration in vegetation cover was identified, with a marked decrease in vegetation density and health between 2020 and 2023. A correlation was also found between anthropogenic activity and increased environmental stress, facilitating the dispersal of mistletoe and exacerbating vegetation deterioration.

Keywords: Forest. Parasitic Plants. *Phoradendron*. *Quercus*.



1 INTRODUCCIÓN

En México, los ecosistemas forestales se distribuyen predominantemente en zonas montañosas, donde las condiciones de clima, altitud y ubicación geográfica favorecen la presencia del género *Quercus* (encinos). Este grupo botánico se encuentra presente en todas las entidades federativas del país, con la excepción de la península de Yucatán (Graciano et al., 2020). En el contexto del continente americano, los encinos se clasifican taxonómicamente en tres secciones principales: *Quercus* (encinos blancos), *Lobatae* (encinos rojos) y *Protobalanus* (encinos de copa dorada). Mientras que las secciones de encinos blancos y rojos exhiben la mayor distribución y diversidad, la sección *Protobalanus* es más restringida, constando únicamente de cinco especies (Sabás-Rosales et al., 2015).

Estos bosques de encino suelen establecerse en climas templados y subhúmedos, en un rango altitudinal que oscila entre los 1,200 y 2,800 metros sobre el nivel del mar (Gutiérrez-Pacheco, 2021). Desde una perspectiva ecológica y económica, estas comunidades vegetales son fundamentales; los bosques de pino-encino constituyen la principal fuente de productos forestales en México (Aguirre-Calderón, 2015) y proveen servicios ecosistémicos vitales. Según Rodríguez et al. (2015), estos servicios incluyen el abastecimiento (madera, leña, carbón, productos no maderables), la regulación (secuestro de carbono, protección del suelo, ciclo hidrológico) y valores culturales. No obstante, la integridad de estos ecosistemas enfrenta desafíos significativos. Rosete-Vergés et al. (2014) reportan una pérdida histórica de aproximadamente 8,806 km² de bosques templados entre 1917 y 2007. Esta degradación se ve exacerbada por factores bióticos y abióticos como sequías, plagas, enfermedades e incendios (Molina et al., 2020), así como por la falta de información detallada sobre la diversidad ecológica, lo que conduce a un manejo inadecuado de los recursos (Aguirre-Calderón, 2015). Por tanto, resulta prioritario mantener la composición y biodiversidad de estos sitios (Hernández-Salas et al., 2013; Silva-González et al., 2022), aunque actualmente existen pocos estudios orientados al manejo sustentable integral de estos ecosistemas.

En el ámbito regional, el estado de Durango posee un 46.56% de territorio con vocación forestal, donde predominan los bosques templados de encino. A pesar de su extensión, la investigación en la zona se ha limitado mayoritariamente a inventarios de especies (Sánchez-Alfaro et al., 2024; Martínez-Calderón, 2021). Recientemente, se ha

documentado un incremento preocupante en la incidencia de plantas parásitas, específicamente el muérdago verdadero, el cual compite por recursos hídricos y nutricionales, impidiendo el crecimiento del arbolado (Cibrián et al., 2007; Espinoza-Zúñiga et al., 2024; Arriola et al., 2013). La carencia de datos precisos sobre la distribución espacial de este patógeno obstaculiza la elaboración de planes de manejo efectivos para contener su dispersión.

Para abordar esta problemática, el uso de tecnologías de percepción remota resulta indispensable. La implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales e índices de vegetación permite analizar la variabilidad espacio-temporal de las coberturas vegetales y monitorear la dinámica de los ecosistemas (Gonzaga, 2015). El análisis de la vegetación mediante estas herramientas facilita la identificación de zonas vulnerables a factores de estrés como la desertificación, la erosión y el ataque de parásitos (Santibañez-Andrade et al., 2015). Debido a lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue realizar un análisis espacio-temporal mediante la combinación de índices de vegetación en imágenes satelitales, con el fin de estimar la sanidad de los encinos e identificar las causas ambientales asociadas a la propagación del muérdago.

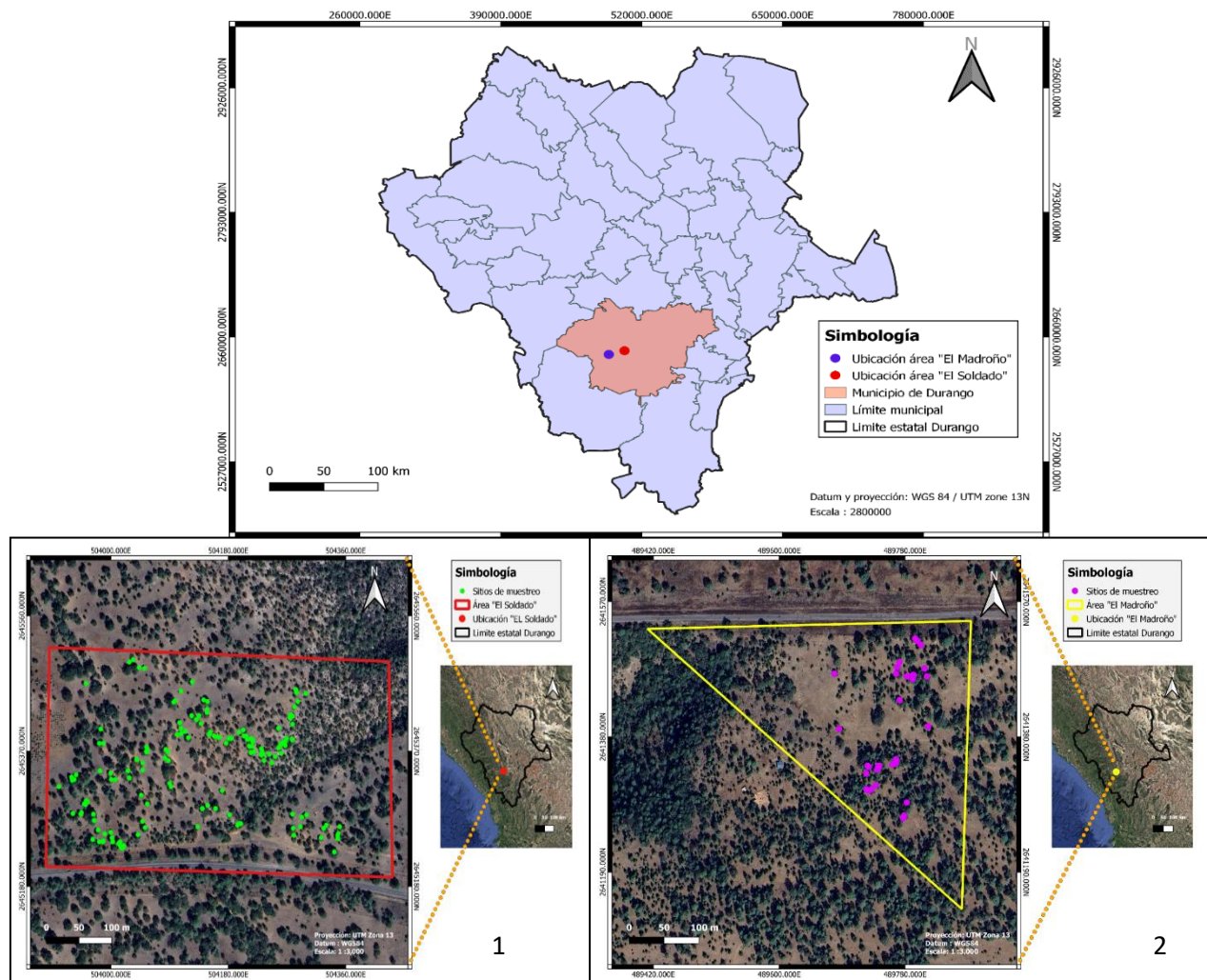
2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El área de estudio se determinó con base en un muestreo de muérdago (*P. villosum*) sobre *Q. convallata* y *Q. durifolia* en un segmento de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango a una altitud de 2,600 msnm dentro del municipio de Durango (Otinapa), México (Figura 1, 2 y 3), dos localidades: El Madroño y El Soldado. La vegetación de la zona corresponde a bosque de pino-encino (INEGI 2021). Se muestrearon en total 1615 árboles de todos los niveles de infección (sano-severo) en las dos zonas (899 en el Soldado y 716 en el Madroño).

Figura 1

Ubicación del área de estudio, Otinapa, Durango y sus dos localidades analizadas 1) El Soldado y 2) El Madroño.



2.2 Obtención y análisis de imágenes satelitales

Se obtuvieron imágenes Sentinel 2 L2A del servidor Copernicus Browser. Se descargaron dichas imágenes disponibles del 1 de mayo al 15 de julio en un lapso del 2020 a 2023 (Tabla 1), para realizar una evaluación del cambio en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) las imágenes obtenidas con un porcentaje de nubosidad menor al 10%, con correcciones atmosféricas y radiométricas.

Tabla 1*Imágenes Sentinel 2 L2A*

Área de estudio	Año de evaluación	Fecha de imagen satelital disponible
El Madroño	2020	14 de junio
	2021	30 de mayo
	2022	30 de mayo
	2023	19 de junio
El Soldado	2020	14 de julio
	2021	30 de mayo
	2022	24 de junio
	2023	14 de junio

Después de obtener las distintas bandas, se utilizó el software ArcMap 10.3.1 de ESRI para la estimación del NDVI (Ecuación 1) el cual es utilizado para estimar las condiciones y cambios en la masa forestal (Vela-Pelaez et al. 2024, Gallardo-Salazar et al. 2020).

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

donde:

NDVI = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada,

NIR = Infrarrojo cercano,

y RED = Rojo visible

En la Tabla 2, se observa que los resultados del cálculo del NDVI varían de -1 a 1. Este se calcula a partir de la luz visible e infrarroja cercana reflejada por la vegetación. La vegetación sana absorbe la mayor parte de la luz visible que le llega, y refleja una gran parte de la luz de infrarrojo cercano. La vegetación enfermiza o escasa refleja más luz visible y menos luz del infrarrojo cercano (Figura 4). Para la interpretación de los valores obtenidos del cálculo del NDVI en este trabajo se realizó una correlación cuantitativa, colorimétrica y cualitativa para diferenciar el estado de la vegetación en el área de estudio (Gaitán *et al.* 2020).

Tabla 2*Correlación colorimétrica de valores NDVI con componentes biológicos*

Color	Valor NDVI	Componente Biológico
Rojo	< = 0.1 - 0.3	Vegetación escasa, suelo desnudo, estrés hídrico o baja densidad de siembra
Naranja	0.3-0.4	Vegetación enferma y/o con plaga
Amarillo	0.4-0.5	Vegetación con diferencia fuerte de nutrientes
Verde Claro	0.5-0.6	Vegetación con diferencia leve de nutrientes
Verde Oscuro	0.6-1	Vegetación saludable, plantas muy saludables

Una vez obtenido el raster de NDVI, se utilizó el software Qgis® 3.36.0 para extraer los valores del pixel por individuo, utilizando el complemento “Point sampling tool”, lo que permitió clasificar los valores de la zona de acuerdo con el estado de salud del arbolado.

3 RESULTADOS

A partir de la cantidad de luz reflejada que se analizó a través del cálculo del NDVI y de sensores se observó que se pueden cartografiar los cambios temporales en la cobertura vegetal y su relación con el deterioro ambiental, además de la presencia de *P. villosum* sobre los encinos, tal y como se observaron en Otinapa, Durango.

Los resultados obtenidos en este estudio sobre la degradación de la vegetación en el Soldado y el Madroño mediante los índices NDVI, permitió identificar un deterioro progresivo en la cobertura vegetal, con una marcada disminución en la densidad y salud de la vegetación entre 2020 y 2023, observando mayor degradación en el poblado del Madroño, esto se puede atribuir principalmente a las actividades agrícolas y ganaderas que modifican la calidad del suelo en la región, lo que provoca que los árboles presenten mayor estrés y se contagien de una manera más fácil, además de los efectos del muérdago verdadero (*P. villosum*) como parásito forestal y sus altos niveles de infestación de la zona a diferencia del Soldado donde el nivel de infección es menor y su actividad es meramente forestal.

Se obtuvieron los valores de NDVI del área de estudio, en donde los valores oscilaron entre a 0.1 a 0.30 de acuerdo con las imágenes analizadas. Los valores de 0 a 0.3 corresponden a vegetación escasa, suelo desnudo, estrés hídrico, suelo sin vegetación, mientras que los valores de 0.2 a 0.3 corresponden a vegetación enferma y/o con plagas presentes en las áreas de estudio.

3.1 Dinámica temporal de los Índices de Vegetación (2020-2023)

El análisis de los valores del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) durante el periodo comprendido entre 2020 y 2023 reveló comportamientos heterogéneos en el vigor de la vegetación para las dos zonas de estudio evaluadas: El Madroño y El Soldado. Los datos descriptivos, que incluyen valores mínimos, máximos y promedios anuales, se detallan a continuación.

Para el área de "El Madroño", se observó una tendencia general a la disminución del vigor vegetativo tras el primer año de estudio. El año 2020 presentó los valores más altos de la serie temporal, con un promedio de 0.306 y un máximo absoluto de 0.375, lo que sugiere una mayor actividad fotosintética o densidad de dosel durante ese ciclo. Sin embargo, para el año 2021, se registró un descenso abrupto en el promedio (0.206), representando una disminución de aproximadamente el 32.6% respecto al año anterior. Durante los años 2022 y 2023, el comportamiento se mantuvo relativamente estable, pero bajo, con promedios de 0.24 y 0.23 respectivamente, y valores mínimos que oscilaron entre 0.153 y 0.159.

En cuanto a la zona de "El Soldado" se observa un comportamiento contrario al Madroño, ya que la zona de El Soldado mostró su valor promedio más bajo al inicio del periodo de estudio (2020), con un índice medio de 0.186 y un valor mínimo de 0.143. Posteriormente, en 2021, se registró un incremento significativo en la respuesta espectral de la vegetación, alcanzando el pico máximo de la serie con un promedio de 0.309 y un valor máximo absoluto de 0.385. No obstante, esta recuperación fue transitoria, ya que en los años subsiguientes (2022 y 2023) los valores medios descendieron nuevamente a 0.226 y 0.205, respectivamente, indicando una posible pérdida de cobertura foliar o estrés vegetal hacia el final del periodo evaluado.

Al contrastar ambas áreas, se destaca que los valores promedio de NDVI oscilaron mayoritariamente en un rango de 0.18 a 0.31. Estos valores son indicativos de una cobertura vegetal de densidad media a baja, consistente con bosques templados abiertos o zonas bajo estrés (hídrico o fitosanitario). Resulta relevante notar la asincronía en los picos de productividad: mientras El Madroño mostró su mejor condición en 2020, El Soldado lo hizo en 2021, lo que podría sugerir diferencias microclimáticas, de manejo o en la incidencia de los factores de perturbación como el muérdago (Tabla 3).

Tabla 3*Valores mínimos y máximos de NDVI*

Área de estudio	Año	Valor NDVI	mínimo	Valor máximo	Valor promedio
El Madroño	2020	0.172		0.375	0.306
	2021	0.140		0.248	0.206
	2022	0.153		0.285	0.240
	2023	0.159		0.277	0.230
El Soldado	2020	0.143		0.275	0.186
	2021	0.241		0.385	0.309
	2022	0.150		0.370	0.226
	2023	0.157		0.306	0.205

En relación al estado de salud de los hospedantes, se obtuvo que los niveles de NDVI mayores se presentan cuando la afectación por muérdago es severa en ambas zonas. Los resultados espectrales no reflejan necesariamente la salud fisiológica del árbol hospedero, sino la cantidad total de biomasa fotosintéticamente activa en el dosel, la cual se ve incrementada artificialmente por la presencia de muérdago en las categorías de daño severo.

Durante los cuatro años evaluados, la categoría de infestación "Severo" registró los promedios de NDVI más elevados. En el año base (2020), el estado Severo alcanzó un índice de 0.338, superando notablemente al estado "Sano", que reportó un valor de 0.278. Esta tendencia se mantuvo en los años subsiguientes; por ejemplo, en 2023, el estado Severo sostuvo un promedio de 0.244, mientras que el estado Sano se situó en 0.228.

Este fenómeno sugiere que la señal espectral detectada por el satélite está siendo influenciada por la biomasa foliar de la planta parásita (muérdago). Dado que el muérdago es una especie perenne con actividad fotosintética constante, su presencia densa en la copa de los árboles hospederos (especialmente en infestaciones severas) eleva los valores de reflectancia en el infrarrojo cercano, enmascarando el debilitamiento real del árbol hospedero.

Además, al igual que en el análisis general por zonas, se observa una caída generalizada en los valores de NDVI para todas las categorías de salud a partir del año 2021. Por lo que se considera que en el 2020 fue el año de mayor vigor aparente para todas las clases, con la categoría "Leve" (0.322) y "Severo" (0.338) marcando los máximos.

Y para el 2021 se registró el descenso más abrupto. Curiosamente, la categoría "Sano" presentó el valor más bajo de toda la serie temporal (0.188), lo que podría indicar que, ante condiciones de estrés ambiental (ej. sequía), los árboles libres de muérdago redujeron su follaje o actividad, mientras que aquellos con infestación mantuvieron valores ligeramente superiores debido a la persistencia del parásito.

Es decir, en el periodo analizado del 2020 al 2023 se observó una ligera recuperación y estabilización, manteniéndose el nivel donde los árboles infestados (Severo/Leve) presentan mayores índices que los Sanos o Moderados (Tabla 4).

Tabla 4

Estado de salud del arbolado de las dos zonas evaluadas

Estado de Salud	NDVI 2020	NDVI 2021	NDVI 2022	NDVI 2023
Leve	0.322222	0.205613	0.242933	0.237087
Moderado	0.279564286	0.190458571	0.214365714	0.203622857
Sano	0.278740909	0.188809091	0.224121818	0.228207273
Severo	0.338566	0.238132	0.27243	0.244613

La fluctuación del NDVI en los bosques de Durango es un reflejo de la compleja interacción entre factores bióticos, abióticos y el manejo forestal. La degradación observada en las imágenes puede atribuirse a tres causas principales identificadas:

La CONAFOR reporta que los incendios impactan severamente la diversidad biológica y las propiedades del suelo, lo que explicaría las caídas abruptas de NDVI (como en El Madroño 2021). Además, el estrés climático aumenta la vulnerabilidad de los bosques de Quercus y coníferas a infecciones por muérdagos, los cuales reducen progresivamente el vigor del dosel y pueden ser detectados mediante análisis multitemporal de imágenes.

Por otra parte el aprovechamiento forestal influye en la composición arbórea. La falta de recuperación hacia el "verde" original sugiere que la estructura del bosque ha sido alterada, afectando la productividad primaria medida por sensores remotos.

El análisis multitemporal demuestra que ambas áreas han experimentado procesos de degradación severa en diferentes momentos del periodo 2020-2023. Mientras "El Madroño" sufrió una perturbación aguda en 2021, "El Soldado" mostró una declinación más tardía pero igualmente drástica en 2023. Estos patrones subrayan la necesidad de un monitoreo constante para identificar si la causa es el avance del muérdago o el impacto de incendios recurrentes. La teledetección confirma que la salud de estos ecosistemas

forestales está bajo una presión significativa que compromete su capacidad de recuperación natural (Figura 2 y 3).

Figura 2

Resultados de NDVI año 2020-2023 en “El Soldado”, Durango.

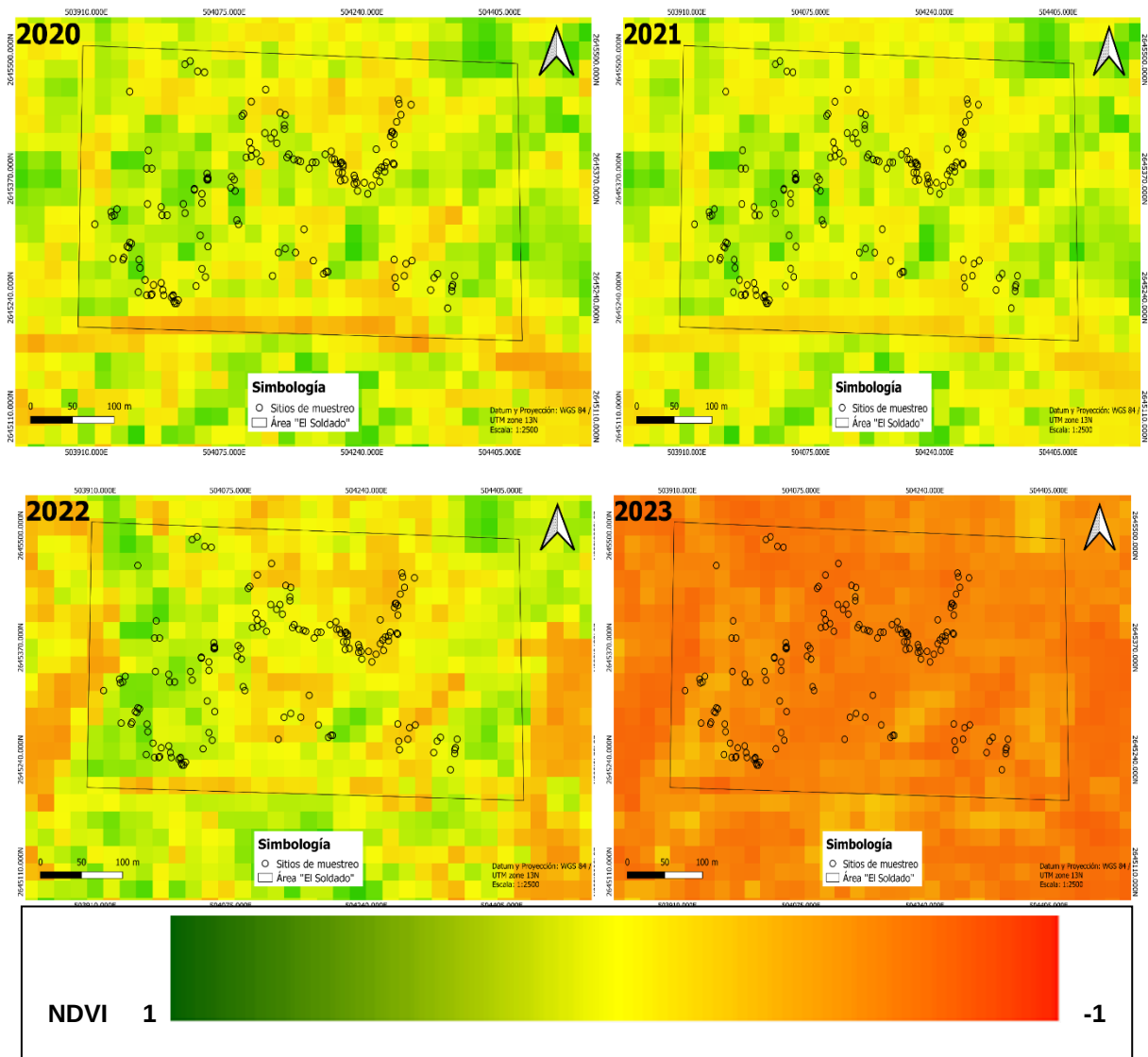
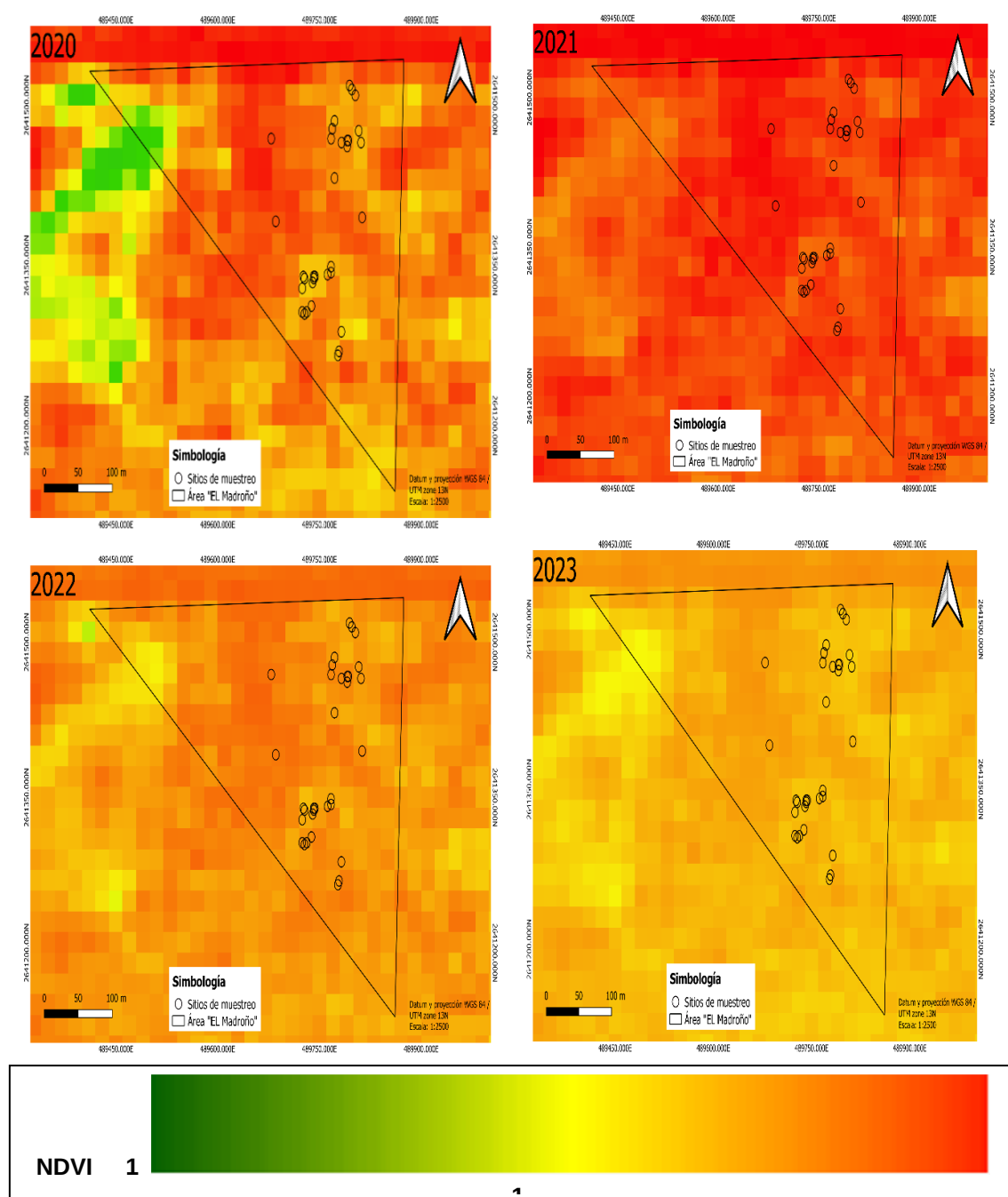


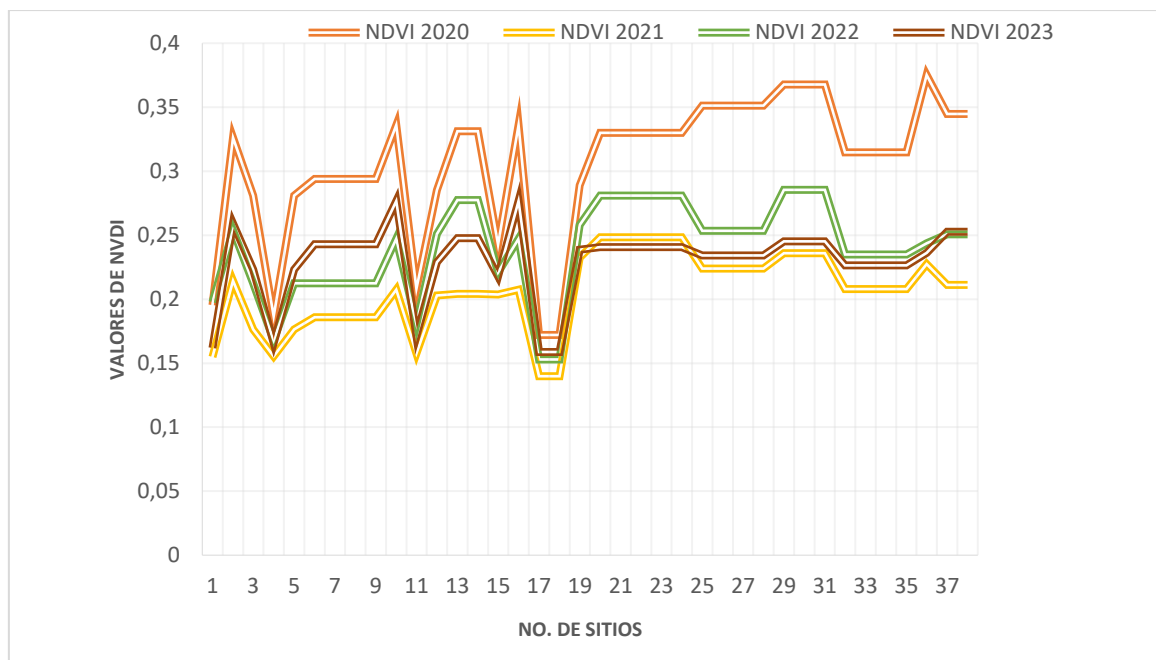
Figura 3*Resultados de NDVI año 2020-2023 en "El Madroño", Durango.*

El comportamiento de las curvas sugiere que el ecosistema de pino-encino en Durango posee una alta sensibilidad climática. La recuperación parcial observada en 2022 y 2023 en la gráfica indica una resiliencia moderada del bosque; sin embargo, el hecho de que el NDVI no haya retornado a los niveles "pico" de 2020 sugiere que el sistema forestal podría estar experimentando un efecto de "memoria ecológica" o daño

acumulado, donde la presencia del muérdago (favorecida por la sequía de 2021) está impidiendo una recuperación total de la biomasa (Figura 4).

Figura 4

Número de sitios muestreados con respecto al NDVI



4 DISCUSIÓN

Se pudo diferenciar la vegetación sana de aquella enferma y que se encuentra bajo algún tipo de estrés ocasionado por factores bióticos (insectos, enfermedades, malezas) y abióticos (falta o exceso de humedad, falta o exceso de nutrientes, altas temperaturas), cabe destacar que dichos factores pueden afectar la reflectancia del follaje generando valores de NDVI más bajos comparados con plantas sanas, como lo observado en campo. Sin embargo, López-Torres *et al.* (2021) y Neupane & Baysal-Gurel (2021), mencionan que a través del uso de imágenes se puede observar la diferencia colorimétrica en bosques como efecto del estrés causado por plantas parásitas como el muérdago.

Además, en el nivel leve y moderado de infección se ha observado que los encinos muestran una resiliencia ante el hospedante lo cual coincide con Koenig *et al.* (2018), donde mencionan que no encontraron efectos de la presencia de muérdago sobre el crecimiento radial o la supervivencia y además detectaron una relación positiva significativa entre el muérdago y la producción de bellotas.

De acuerdo con el análisis realizado los valores de NDVI disminuyeron en el año desde el 2020, siendo más notorio para el 2023, lo cual puede atribuirse a la presencia de muérdago verdadero en los individuos muestreados, sin embargo, es importante realizar investigaciones integrales que consideren más variables como el tipo de suelo, el efecto borde y que a su vez se centren en la respuesta física de las especies para poder realizar una diferenciación de los niveles de NDVI y que pueda ser una herramienta que facilite el monitoreo forestal y la toma de decisiones (Alfaro *et al.* 2021). Lo anterior, muestra que es de utilidad el uso de estos sensores y que pueden utilizarse para conocer los rodales que tengan alto nivel de infección de *P. villosum* (León, 2019).

En los sitios de muestreo se analizaron dos especies de encino (*Q. convallata* y *Q. durifolia*), y se encontraron en este rango (0.1-0.3) de valor NDVI, coincidiendo con lo reportado por Gallardo-Salazar *et al.* (2022), en donde mencionan un valor máximo anual de 0.53 para *Q. convallata* y *Q. durifolia*. Además, Hai *et al.* (2015), utilizaron el NDVI para identificar áreas afectadas por plagas y enfermedades forestales, mostrando que los valores bajos del índice se asocian a pérdida de vigor y estrés hídrico en los árboles afectados por parásitos, resultados similares al muérdago verdadero.

Por otro lado, es importante considerar que existe otra correlación entre la proximidad a la carretera y los valores más bajos de NDVI como menciona Pinto *et al.* (2024), quienes encontraron que la actividad antropogénica aumenta el estrés ambiental, facilitando la dispersión del muérdago y modificando el deterioro de la vegetación.

A diferencia de estudios realizados en regiones más húmedas (Těšitel, 2016), donde el impacto del muérdago puede ser más localizado, en Otinapa y el Madroño, Durango la aridez del clima parece amplificar los efectos del parásito. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Hernández *et al.* (2023), quienes destacaron que la baja disponibilidad hídrica aumenta la vulnerabilidad de los ecosistemas de *Quercus* al ataque de enfermedades y plagas.

Además, es importante también mencionar que Durango cada año presenta incendios forestales en las zonas, que conforme pasan los años CONAFOR (2025), ha reportado un incremento tanto en el número de incendios como en la superficie afectada. Para el 2020 se reportaron un total de 245 incendios con una superficie afectada de 12,900.70 y para el 2023 un total de 347 incendios con una superficie afectada de 89,334.47, propiciando una leve reducción en el contenido de materia orgánica en las áreas impactadas por el fuego, además de disminuir los micro y macro nutrientes en las

zonas lo cual debilita al arbolado haciéndolo susceptible al ataque tanto de plagas como enfermedades forestales (Ávila-Flores *et al.* 2024).

Al igual que en investigaciones previas, los resultados en las zonas evaluadas evidencian la necesidad de integrar herramientas de teledetección con programas de manejo forestal. Estudios como el de Ogungbuyi *et al.* (2022), sugieren el uso de drones para complementar los datos satelitales y obtener análisis más detallados de las áreas afectadas por enfermedades como el muérdago verdadero y plagas.

Debido a lo anterior UN Statistics Division (2018) sugiere dar continuidad a lo establecido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 15), donde menciona que se deben adoptar medidas urgentes y significativas para reducir la degradación de los hábitats naturales, detener la pérdida de biodiversidad, promover la puesta en práctica de la gestión sostenible de todos los tipos de bosques y selvas, detener la deforestación para recuperar los bosques degradados y aumentar considerablemente la forestación y la reforestación a nivel mundial.

En general, el índice de vegetación fue sensible a la enfermedad presente en el periodo, encontrando descensos de NDVI en los años con mayor sequía, por lo que es de gran importancia las condiciones climáticas anuales.

5 CONCLUSIÓN

El análisis espacio-temporal mediante imágenes Sentinel-2 L2A confirma un deterioro progresivo de la biomasa forestal entre 2020 y 2023, evidenciado por la disminución en los valores del índice de vegetación. Este fenómeno no es aislado; el cambio de uso de suelo y el cambio climático han alterado la resiliencia de los encinos (*Quercus convallata* y *Q. durifolia*), facilitando la dispersión de plantas parásitas que aprovechan el debilitamiento fisiológico del hospedero.

Por lo que existe un fuerte acoplamiento fenológico entre la precipitación pluvial y la respuesta espectral del bosque. La caída generalizada de los valores de NDVI registrada en el año 2021 evidencia la alta sensibilidad de estos ecosistemas ante anomalías climáticas (sequía), actuando el déficit hídrico como el principal factor detonante del debilitamiento forestal en la región.

Sin embargo, el hallazgo más relevante es la identificación de un fenómeno de enmascaramiento espectral provocado por la planta parásita. Contrario a la hipótesis

inicial de que un menor vigor espectral indicaría mayor enfermedad, los resultados demostraron que los árboles con infestación "Severa" mantienen valores de NDVI superiores a los individuos "Sanos". Esto se atribuye a la biomasa fotosintéticamente activa y perenne del muérdago (*P. villosum*), la cual genera una señal de "falso vigor" que compensa la pérdida foliar del hospedero, especialmente durante las fases de dormancia o estrés del encino.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo al Instituto Politécnico de Nacional CIIDIR-Durango, al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Durango y a la Universidad Politécnica de Durango.

REFERENCIAS

- Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo forestal en el siglo XXI. *Madera y Bosques*, 21(4), 17-28. <https://doi.org/10.21829/myb.2015.210423>
- Alfaro, F. M., Pizarro-Araya, J., Cepeda-Pizarro, J., & Bodini, A. (2011). Composición y distribución del ensamble de Orthoptera (Insecta) en una cuenca árida del norte-centro de Chile. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(1), 97-110.
- Arriola, P. V. J., Velasco, B. E., Hernández, T. T., González, H. A., & Romero, S. M. E. (2013). Los muérdagos verdaderos del arbolado de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19), 34-45.
- Ávila-Flores, D. Y., Castillo-Quiroz, D., García-García, D. A., Castillo-Reyes, F., & Villanueva-Blanco, V. O. (2024). Impacto del fuego en la diversidad biológica de la vegetación y propiedades físicas y químicas del suelo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 20(3), 103-112.
- Cibrián T., D., Alvarado R., D., & García, D. (2007). Enfermedades forestales en México/Forest diseases in Mexico. Universidad Autónoma Chapingo; Conafor-Semarnat; Servicio Forestal de EUA; Servicio Forestal Canadiense y Comisión Forestal de América del Norte (COFAN); FAO.
- CONAFOR. (2025). Incendios forestales. Comisión Nacional Forestal. <https://medioambiente.durango.gob.mx/historico-incendios-forestales/>
- Espinoza-Zúñiga, F., Lara-Vázquez, P. F., Cibrián-Tovar, D., Ruiz-Orta, A., Galacho-Jiménez, F. B., & Ramírez Dávila, J. F. (2024). Variabilidad espacial de muérdago (Loranthaceae) en áreas verdes de la alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. *Revista*

- Mexicana de Ciencias Forestales, 15(85), 23-30.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i85.1469>
- Gaitán, J., Ciano, J., Oliva, N., Bran, G., Butti, L., Cariac, G., Caruso, C., Opazo, W., Ferrante, D., Echavarría, D., Buono, G., Fantozzi, A., Guirado, E., & Maestre, F. (2021). La variación temporal del índice NDVI predice los cambios temporales de la cobertura vegetal en las tierras secas de la Patagonia, Argentina. *Ecosistemas*, 30(3), 2229.
- Gallardo-Salazar, J. L., Carrillo-Aguilar, D. M., Pompa-García, M., & Aguirre-Salado, C. A. (2022). Multispectral indices and individual-tree level attributes explain forest productivity in a pine clonal orchard of Northern Mexico. *Geocarto International*, 37(15), 4441-4453.
- Gallardo-Salazar, J. L., Rosas-Chavoya, M., Pompa-García, M., López-Serrano, P. M., García-Montiel, E., Meléndez-Soto, A., & Jiménez-Jiménez, S. I. (2023). Multi-temporal NDVI analysis using UAV images of tree crowns in a northern Mexican pine-oak forest. *Journal of Forestry Research*, 34(6), 1855-1867.
- Geils, B. W., Cibrián, T. J., & Moody, B. (2002). Mistletoes of North American conifers (Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-98). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Graciano-Avila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. (2020). Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México. *Acta Botánica Mexicana*, 127, 1-13.
<https://doi.org/10.21829/abm127.2020.1522>
- Gutiérrez-Pacheco, V., Silva-Gómez, S. E., & Varela-Olguín, L. L. (2021). Flora del bosque de encino (*Quercus*: Fagaceae) de dos barrancas de la ciudad de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 27(1), e2712113.
<https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712113>
- Hai, Y., Liang, M., Yang, Y., Sun, H., Li, R., Yang, Y., & Zheng, H. (2024). Detection of typical forest degradation patterns: Characteristics and drivers of forest degradation in Northeast China. *Remote Sensing*, 16(8), 1389.
<https://doi.org/10.3390/rs16081389>
- Hernández, A. P. (2023). Climate-driven vulnerability of *Quercus* forests to parasitic infections in Arid Regions. *Environmental Research Letters*, 18(2), 271-282.
- Hernández-Salas, J. O., Aguirre-Calderón, A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189-199.
<https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052>
- INEGI. (2021). Uso de suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VII (continuo nacional). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- Koenig, W. D., Knops, J. M. H., Carmen, W. J., Pesendorfer, M. B., & Dickinson, J. L. (2018). Efectos del muérdago (*P. villosum*) en robles de California. *Biology Letters*, 14(2), Article 20180240. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0240>
- León Bañuelos, L. A. (2019). Análisis de la distribución espacial de *Arceuthobium globosum* implementando teledetección en el área de protección de flora y fauna nevado de Toluca, México [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México].
- López-Torres, M. U., Paniagua-Cienfuegos, M. R., Rivas-Flores, A. W., & Hernández-Martínez, M. A. (2021). Monitoreo de mosca pinta (Hemiptera: Cercopidae: *Aeneolamia* sp.) en cultivo de la caña de azúcar mediante sensores remotos y su posible aplicabilidad para el manejo fitosanitario. *Revista Minerva*, 4(3), 53-69.
- Martínez-Calderón, V. M., Sosa-Ramírez, J., Siqueiros-Delgado, M. E., & Díaz-Núñez, V. (2021). Composición, diversidad y estructura de especies leñosas en los bosques templados de Monte Grande, Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Acta Botánica Mexicana*, 128, e1829. <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1829>
- Molina-Serrano, J. A., Fajardo-Franco, M. L., Aguilar-Tlatelpa, M., & Castañeda-Mendoza, A. (2020). Monitoreo de la severidad de *Lophodermium* sp. en bosque de pino con imágenes satelitales Sentinel 2. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 38(1), 107-118. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1907-3>
- Neupane, K., & Baysal-Gurel, F. (2021). Automatic identification and monitoring of plant diseases using unmanned aerial vehicles: A review. *Remote Sensing*, 13(19), 3841.
- Ogunbuyi, M. G., Mohammed, C., Fischer, A. M., Turner, D., Whitehead, J., & Harrison, M. T. (2024). La integración de imágenes de drones y satélites mejora la agilidad en la gestión agrícola. *Teledetección*, 16(24), 4688. <https://doi.org/10.3390/rs16244688>
- Pinto, C. M., Vargas Soto, J. S., Flatt, K. B., & Whitworth, A. (2024). Identifying wildlife road crossing mitigation sites using a multi-data approach - A case study from southwestern Costa Rica. *Journal of Environmental Management*, 361, 121263. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121263>
- Rodríguez-Correa, H., Oyama, K., MacGregor-Fors, I., & González-Rodríguez, A. (2015). How are oaks distributed in the neotropics? A perspective from species turnover, areas of endemism, and climatic niches. *International Journal of Plant Sciences*, 176(3), 222-231. <https://doi.org/10.1086/679904>
- Rosete-Vergés, F. A., Pérez-Damián, J. L., Villalobos-Delgado, M., Navarro-Salas, E., Salinas-Chávez, E. N., & Remond-Noa, R. (2014). El avance de la deforestación en México 1976-2007. *Madera y Bosques*, 20(1), 21-35. <https://doi.org/10.21829/myb.2014.201173>
- Sabás-Rosales, J. L., Sosa-Ramírez, J., & Luna-Ruiz, J. J. (2015). Diversidad, distribución y caracterización básica del hábitat de los encinos (*Quercus*: Fagaceae)

del Estado de San Luis Potosí, México. *Botanical Sciences*, 93(4), 881-897. <https://doi.org/10.17129/botsci.205>

Sánchez-Alfaro, M. F., Viggers-Carrasco, M. G., Castañeda-Gaytan, J. G., Estrada-Arellano, J. R., Becerra-López, J. L., & Reyes-Muñoz, J. L. (2024). Composición de gremios tróficos de invertebrados en un bosque de pino-encino en Durango. *Biotecnia*, 26(1), 19-24. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26.1924>

Santibañez-Andrade, G., Castillo-Argüero, S., & Martínez-Orea, Y. (2015). Evaluación del estado de conservación de la vegetación de los bosques de una cuenca heterogénea del Valle de México. *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 299-313. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200015>

Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., González-Tagle, M. A., Treviño Garza, E. J., & Corral Rivas, J. J. (2022). Evaluación del aprovechamiento forestal en la diversidad y estructura de un bosque templado en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(71), 103-132. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1017>

Těšitel, J. (2016). Localized impacts of parasitic plants in humid tropical forests. *Plant Ecology*, 217(5), 631-642.

UN Statistics Division. (2018). Marco de indicadores mundiales para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y metas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas.

Vela-Peláez, A. A., Navarro-Martínez, M. A., Mendoza Briseño, M. A., Sánchez-Sánchez, J. A., & Esparza-Olgún, L. G. (2024). Análisis multitemporal de cambios en el NDVI en una región con aprovechamiento forestal en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 160-186.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron por igual al desarrollo de este artículo.

Disponibilidad de datos

Todos los conjuntos de datos relevantes para los resultados de este estudio están disponibles en su totalidad en el artículo.

Cómo citar este artículo (APA)

Villegas, M. Y. F., Chavarría, C. R., Rodríguez, E. C., & Maldonado, M. B. G. (2026). ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA INFESTACIÓN POR PHORADENDRON VILLOSUM EN BOSQUES DE ENCINOS EN DURANGO. *Veredas Do Direito*, 23(4), e234808. <https://doi.org/10.18623/rvd.v23.n4.4808>