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

Monitoreo Forestal del Área Natural Protegida Pinal del Zamorano mediante el uso de índices espectrales (NDVI, EVI, NDTI, NDII)

Forest Monitoring of the Pinal del Zamorano Natural Protected Area Using Spectral Indices (NDVI, EVI, NDTI, NDII)

Esteban Vera Valdez, Michelle Farfán Gutiérrez[1*], Jean-Bernard Hayet[2], José Luis Gallardo Salazar[3], Marcela Rocha Chavoya[4],[1]Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato.
e.veravaldez@ugto.mx, michelle.farfan@ugto.mx
[2]Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT)
jbhayet@cimat.mx
[3]Centro Académico Regional – Morelia, Universidad de Chapingo
correo@correo.mx
[4]Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)
marcela.chavoya@gmail.com
*autor de correspondencia

Resumen

La desvitalización forestal impulsada por el estrés hídrico representa una amenaza creciente para los bosques templados de montaña en un contexto de cambio climático. Este estudio evaluó la dinámica de declive del vigor vegetativo en bosques de *Abies religiosa* (oyamel) y Quercus spp (encino), en el Área Natural Protegida Pinal del Zamorano (2019–2025) mediante imágenes multiespectrales Sentinel-2 y validación con vehículos aéreos no tripulados (VANT/dron). Se analizaron las tendencias multitemporales de índices de vegetación estructurales (NDVI, EVI) e hídrico-biomasa (NDII, NDTI). Los resultados confirman un marcado proceso de desvitalización forestal, donde el déficit hídrico actúa como el principal factor detonante. Notablemente, se evidenció que el NDVI presenta limitaciones para detectar etapas tempranas o moderadas de declive en este tipo de dosel, registrando valores aparentemente positivos en áreas desvitalizadas. En conclusión, se demuestra la necesidad de implementar un enfoque multi-índice que integre bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR) para un monitoreo preciso del estrés foliar y el combustible acumulado en ecosistemas de montaña.

Palabras clave: Oyamel, declinación forestal, cambio climático, combustibles.

Introducción

El monitoreo de la salud forestal es un pilar fundamental para la conservación de los ecosistemas de alta montaña en México. Entre estos, los bosques de Oyamel (*Abies religiosa*) destacan por su alto valor ecosistémico, su papel en la regulación hídrica y su vulnerabilidad ante el cambio climático. Sin embargo, en la actualidad, estos ecosistemas enfrentan una crisis de supervivencia sin precedentes (Martínez-Gil *et al*., 2026).

Un caso crítico y alarmante se está documentando en el Parque Nacional El Chico, en Hidalgo, donde se ha registrado una mortalidad masiva de ejemplares. El fenómeno de los árboles muertos en pie en esta región no sólo altera la biodiversidad, sino que incrementa drásticamente la carga de biomasa seca y el riesgo de incendios forestales de alta intensidad en la interfaz urbano-forestal.

Para abordar esta problemática, esta propuesta de investigación plantea el uso de imágenes de los satélites Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA) para el Área Natural Protegida a nivel estatal Pinal del Zamorano (ANP Pinal del Zamorano) con presencia de oyamel y quercus. La ventaja competitiva de Sentinel-2 radica en su alta resolución temporal (5 días) y, fundamentalmente, en sus bandas del Infrarrojo de Onda Corta (SWIR 1 y 2) y el Borde Rojo (Red Edge). En combinación con las imágenes Sentinel-2 también se recurrió al uso de vehículos aéreos no tripulados para evaluar el número de árboles muertos en pie.

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

Actualmente, este tipo de capacidades tecnológicas permiten la evaluación de índices espectrales sensibles a la degradación de la estructura celular y la pérdida de humedad foliar, superando las limitaciones del NDVI convencional. El presente estudio busca presentar un primer diagnóstico de la vitalidad del bosque de oyamel y encino, así como también identificar focos de mortalidad, con miras en promover la gestión del territorio y la prevención de riesgos ambientales, como los incendios forestales de sexta generación en el ANP del Pinal del Zamorano.

Métodos

Descripción del área de estudio

El Área Natural Protegida (ANP) Pinal del Zamorano fue decretada el 6 de junio de 2000, bajo la categoría de Reserva de Conservación, abarcando una superficie de 13,862.55 hectáreas entre los límites estatales de Guanajuato (municipios de San José Iturbide y Tierra Blanca) y Querétaro (municipios de Colón y el Marqués) con coordenadas extremas N: 20° 51' 51'' a 21° 06' 51'y W: 99° 55' y 43'' a 100° 21' 29'N. Su territorio se distribuye en la provincia fisiográfica de la Mesa del Centro, en una zona de sierras y altiplanicies, donde emergen conos volcánicos. El Pinal del Zamorano es un volcán inactivo con una altura máxima de 3400 msnm y forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (Landeros *et al.,* 2006). La delimitación del ANP aparece en negro en la Figura 1.

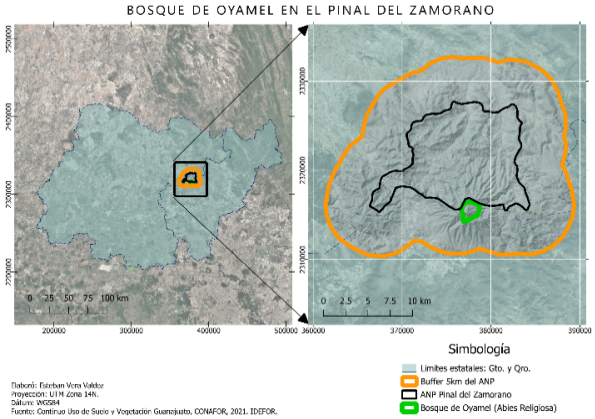


Figura 1. Localización y delimitación del bosque de Abies Religiosa (Oyamel), de color verde, en la ANP Pinal del Zamorano, de color negro.

El clima es de tipo semiseco en las porciones bajas y templado subhúmedo en las porciones elevadas. La precipitación promedio anual se encuentra entre 521 mm – 593 mm, con máximas anuales entre 977mm – 1460 mm y mínimas anuales entre 184 mm – 312 mm. La temperatura promedio anual es de 20.5 °C (Gobierno del estado de Guanajuato, 2000). El vulcanismo manifestado por esta estructura fue de tipo central, siendo un volumen de roca estimado en cerca $60\ km^3$, de lavas andesíticas y dacíticas, y material piroclástico riolítico, mientras que solo una pequeña proporción de lavas andesíticas (Carrasco *et al.,* 1989). Forma parte de la región hidrológica número 26 Pánuco, cuenca del río Moctezuma, subcuenca del río Exotraz. Los principales escurrimientos superficiales son el río La Garrapata, Pinal del Zamorano y Las Moras.
En relación con los tipos de ecosistemas forestales presentes en el área natural protegida encontramos: matorral crassicaule, matorral subtropical caducifolio, selva baja caducifolia, bosque de pino con dominancia de *Pinus cembroides,* bosque de encino que se distribuye hacia las partes altas del Pinal del Zamorano combinándose con el bosque de Oyamel (*Abies religiosa*) entre los 2800 y 3200 m de altitud, con frecuencia sobre pendientes muy pronunciadas y en la parte más húmeda del área (Zamudio 2012). Otros árboles que suelen observarse en este bosque son *Alnus jorullensis* (aile), *Populus tremuloides* (álamo).

Delimitación de los polígonos de interés.

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

Para delimitar los diferentes polígonos de interés, se hizo uso de los mapas de uso de suelo y vegetación escala 1:50,000 de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2021), para los estados de Guanajuato y Querétaro. En particular, los datos de clasificación de vegetación nos permitieron trazar un polígono de 316 hectáreas correspondiendo al bosque de oyamel con presencia de encinos. Este polígono aparece de color verde en la Figura 1 y es el que se utilizó para el monitoreo del presente estudio.

Imágenes multiespectrales de Sentinel-2.

La misión Sentinel 2 es una misión espacial parte del programa Copernicus, un programa europeo de observación de la Tierra iniciado en 2015. Consta de tres satélites (2A, 2B, inicialmente, y 2C, desde 2024), que proveen imágenes multiespectrales de relativamente alta resolución (10m para algunas de las bandas, 20m y 60m para otras). Los datos de estos satélites cubren 13 bandas de longitud de onda, que incluyen el intervalo visible del espectro, así como parte del infrarrojo cercano (NIR) y del infrarrojo de onda corta (SWIR); los satélites revisitan los mismos lugares cada cinco días. Estos datos históricos son accesibles de forma gratuita, en particular desde la plataforma Google Earth Engine, como lo fue en el presente estudio. Cabe notar que, por su disponibilidad, los datos Sentinel-2 se han usado en un sinfín de aplicaciones de monitoreo ambiental desde su lanzamiento.

Índices espectrales analizados con Google Earth Engine (GEE).

Con el fin de analizar las tendencias multianuales de vegetación de la zona, se seleccionaron productos del satélite Sentinel-2 (Nivel 2A, con corrección atmosférica de reflectancia en superficie) para el periodo del 2019 al 2025 a través de la plataforma Google Earth Engine. Los criterios de selección de las imágenes involucraron una cobertura de nubes menor al 10%.

Se realizó el cálculo de los siguientes índices espectrales para identificar el proceso de declinación forestal en el bosque de oyamel:

Evaluación de vigor y biomasa (NDVI Y EVI)

En el caso de la pérdida de vigor de la vegetación forestal, se empleó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) que es calculado a partir de la luz roja e infrarroja reflejada por la actividad fotosintética y la estructura celular de la vegetación, evaluado en un píxel (p) como:

$$NDVI = \frac{B_8(p) - B_4(p)}{B_8(p) + B_4(p)}$$

donde $B_i(p)$ representa el valor reflejado en la banda espectral i ($i \leq 1 \leq 13$), en el píxel p. Para la plataforma Sentinel-2, B_8 corresponde a la banda del infrarrojo cercano (NIR) y B_4, a la banda del rojo (Red). Este índice presenta rangos entre -1 y 1, donde, por lo general, valores mayores a 0.2 o 0.3 suelen indicar presencia de vegetación fotosintéticamente activa.

Por otro lado, se estimó también el índice EVI. Dicho índice se calcula de manera similar al NDVI, pero corrige ciertas distorsiones en la luz reflejada causadas por partículas en el aire, así como la cubierta del suelo debajo de la vegetación. Para el caso de Sentinel-2, el EVI se calcula a partir de

$$EVI = 2.5 \cdot \left(\frac{B_8(p) - B_4(p)}{B_8(p) + 6 \cdot B_4(p) - 7.5 \cdot B_2(p) + 1} \right)$$

En zonas de densa cobertura de dosel, donde el índice de área foliar (LAI) es alto, las longitudes de onda azules pueden utilizarse para mejorar la precisión del NDVI, ya que corrigen las señales de fondo del suelo e

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

influencias atmosféricas. El rango de valores de este índice está entre -1 y 1, donde la vegetación sana adquiere valores entre 0.2 y 0.8.

Detección de madera seca (NDTI)

Para la estimación de madera seca o material leñoso expuesto en el dosel forestal, se exploró el uso del Índice Normalizado de Residuos (NDTI). Este índice, calculado a partir de las bandas del infrarrojo de onda corta (SWIR), aprovecha la sensibilidad de estas longitudes de onda para diferenciar entre superficies secas y húmedas, siendo la celulosa y la lignina de la madera los principales componentes que modifican la reflectancia en esta región del espectro. Se ha usado anteriormente en el contexto agrícola para estimar la cobertura de residuos sobre las superficies cultivadas. El NDTI se evalúa en un píxel (p) como:

$$NDTI = \frac{B_{11}(p) - B_{12}(p)}{B_{11}(p) + B_{12}(p)}$$

Valores altos de NDTI sugieren una mayor presencia de material seco o lignificado, mientras que valores bajos se asocian a una mayor humedad o a la ausencia de este material.

Estrés Hídrico (NDII)

Este índice usa una diferencia normalizada de longitudes de onda $819/1600\ nm$ las cuales corresponden a las bandas B_8 y B_{11} para Sentinel-2, y es sensible a los cambios en el contenido del agua en el dosel de la vegetación. Los valores obtenidos están entre -1 y 1, el rango común para la vegetación vigorosa es de 0.2 a 0.6 y la fórmula está dada por:

$$NDII = \frac{B_8(p) - B_{11}(p)}{B_8(p) + B_{11}(p)}$$

Muestreo espacial y construcción de las series temporales.

Para evaluar el proceso de desvitalización y acumulación de biomasa para el bosque de oyamel y encino se decidió trabajar a dos niveles:

1) A nivel del polígono de Oyamel mismo, para evaluar tendencias globales.
2) A nivel más local, al dividir el polígono en una malla regular de celdas cuadradas de 9 ha (300mx300m) cada una. En esta misma zona se realizó el vuelo del dron multiespectral.

En ambos casos, se siguió el mismo método para producir series de tiempo anuales. Por cada polígono (el polígono total del bosque de oyamel o cada celda), se seleccionó una muestra aleatoria de *n* puntos con distribución uniforme (*n=245* para el polígono completo, *n=5* para cada celda). Con base en dicha muestra, mediante el uso de GEE, se descargaron los datos multiespectrales (con un *buffer* de 100 metros alrededor de cada punto), se filtraron los datos con probabilidad de nube superior a 10 porciento, y se calcularon los valores de índices descritos en la sección anterior. Después de eso, se promediaron los datos espacialmente (entre los puntos de la muestra) y temporalmente (por cada año entre 2019 y 2025). Finalmente, se aplicaron promedios por ventana deslizante (con un tamaño de ventana de 3) para producir las series de tiempo anuales y evaluar pendientes de tendencia.

Procesamiento y análisis de datos

Interpolación IDW

Para generar superficies continuas de las pendientes de los índices espectrales (NDVI EVI, NDTI Y NDII), se utilizó el método de interpolación por Distancia Ponderada (IDW) implementado en QGIS. En este método, los puntos de muestra se ponderaron durante la interpolación de modo que la influencia de un punto en relación con otro disminuye conforme aumente la distancia. Se empleó un parámetro de potencia de 2 y se consideraron un mínimo de 12 vecinos para la interpolación. Los rásters resultantes fueron recortados al polígono de bosque de oyamel.

Umbrales del semáforo

Para la clasificación de desvitalización se emplearon diferentes métricas según el índice espectral. Para el NDVI, EVI y NDII, a partir de los valores promedio de cada año del periodo 2019 – 2025, se calculó su pendiente, dado que esto refleja la tendencia de cada índice a lo largo de tiempo y así permite evaluar si la vigorosidad, la humedad y la actividad fotosintética aumentó o disminuyó en el periodo. Por otro lado, para el NDTI, se utilizó solo el promedio anual de cada año del mismo periodo, ya que lo que interesa es la acumulación actual de material leñoso seco, más que su tendencia temporal. Los umbrales para cada índice se definieron con base a los cuartiles de la distribución de estas métricas, a excepción del NDTI, donde se ajustaron con la validación en campo (celda con $>$ 100 árboles muertos, $NDTI = 0.239$)
Los umbrales específicos para cada índice se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Umbrales específicos para establecer el semáforo de desvitalización

Índice	Métrica usada	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo
NDVI	Pendiente (2019-2025)	≤ 0.00931	$0.00931 - 0.01379$	$0.01379 - 0.01749$	> 0.01749
EVI	Pendiente (2019-2025)	≤ -0.01044	$-0.01044 - -0.00328$	$-0.00328 - 0.00454$	> 0.00454
NDTI	Valor promedio	> 0.22	$0.20 - 0.22$	$0.18 - 0.20$	< 0.18
NDII	Pendiente (2019-2025)	≤ -0.01506	$-0.01506 - -0.01257$	$-0.01257 - -0.00914$	> -0.00914

La pendiente de NDV, EVI y NDII se calculó mediante regresión lineal sobre los valores anuales promedio del periodo 2019-2025. El NDTI se presenta como el valor promedio del índice en el mismo periodo ya que este índice mide la reflectancia de material seco en el dosel y su promedio es más representativo de la carga de combustible que su tendencia temporal.

Vuelo de dron para estimación de árboles muertos en pie

Se empleó un dron marca DJI, modelo MAVIC 3 con cámara multiespectral para volar la cara norte de la zona de Oyamel, a una altura de 100 m con traslape frontal del 80% y lateral del 70%. El vuelo se hizo con una temperatura de 25.6° C, una humedad relativa de 35.6% y a una altitud de 2841 msnm. La superficie total generada con el vuelo fue de 46 hectáreas.

Especificaciones técnicas del dron multiespectral:

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sensores del UAV multiespectral Mavic 3

Sensores	Resolución	Resolución del sensor	Longitud de onda central (nm)	Ancho espectral	Longitud Focal
RGB	20MP	5280×3956	-	-	24mm
Verde	5MP	2592×1944	560	32	25mm
Rojoe	5MP	2592×1944	650	32	25mm
Borde Rojo (Red Edge)	5MP	2592×1944	730	32	25mm
NIR	5MP	2592×1944	840	52	25mm

Resultados

Series de tiempo (2019-2025) de los índices espectrales: NDVI, EVI, NDTI E NDII

En esta sección, se presentan las variaciones anuales de los índices espectrales NDVI, EVI, NDTI Y NDII. La variación anual se define como el cambio del índice respecto al año anterior, calculado a partir de la pendiente de la regresión lineal sobre los valores diarios del índice en cada año. Valores positivos indican un aumento en la tasa de cambio del índice, mientras que valores negativos indican una disminución.

Serie de tiempo del NDVI (2019-2025)

En la Figura 2 se muestra la variación anual del índice NDVI para el periodo 2019 – 2025. Esta variación que mide el cambio del índice respecto al anterior pasó de $+0.14$ en 2019 a -0.07 en 2021, lo que indica una disminución en la tasa de cambio de vigor. A partir del 2022, la variación se vuelve menos negativa (-0.02) y alcanza valores positivos en 2023 $(+0.03)$ y 2025 $(+0.13)$, esto sugiere una recuperación en el vigor, aunque ligeramente inferior al inicio del periodo.

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

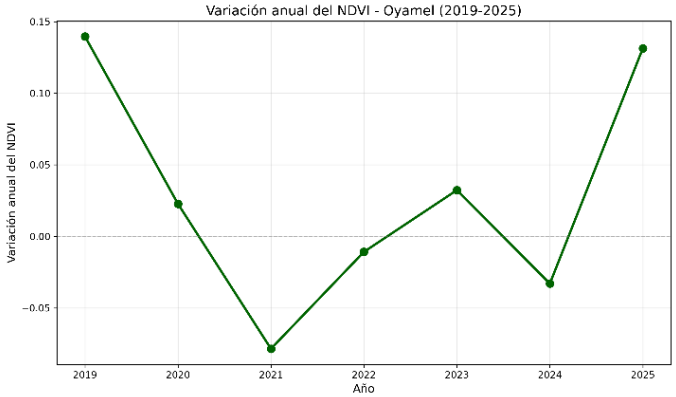


Figura 2. Valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral del NDVI para el periodo de 2019-2025 para el bosque de oyamel.

Interpolación de la pendiente del NDVI y semáforo de desvitalización

La interpolación de la pendiente del NDVI (Figura 3A) muestra un gradiente espacial de pérdida de vigorosidad en el bosque de Oyamel, en él se puede observar que las zonas con valores más negativos, es decir que presentan ese decaimiento se concentran hacia el norte del polígono y en las áreas de mayor altitud, mientras que las zonas de valores positivos se encuentran en Sur y Sureste del polígono.

El semáforo de desvitalización (Figura 3B) muestra que 12 celdas que representan el 24.5% de la malla; se encuentran en la categoría Muy alto (rojo), indicando una pérdida severa de vigor. Tenemos que 2 de esas celdas rojas coinciden con las áreas donde el ortomosaico del dron registró más de 226 árboles muertos, En contraste, 12 celdas (24.5 %) se clasifican como Bajo (verde), de manera similar, el dron registro en una de esas celdas 66 árboles muertos en pie. Las celdas con categoría Alto (naranja) son 11 (22.5 %) y con categoría Media (amarillo) son 13 celdas, que representa el 26.5 %

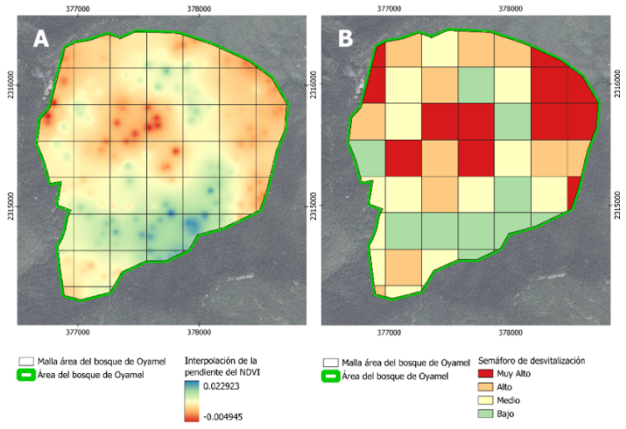


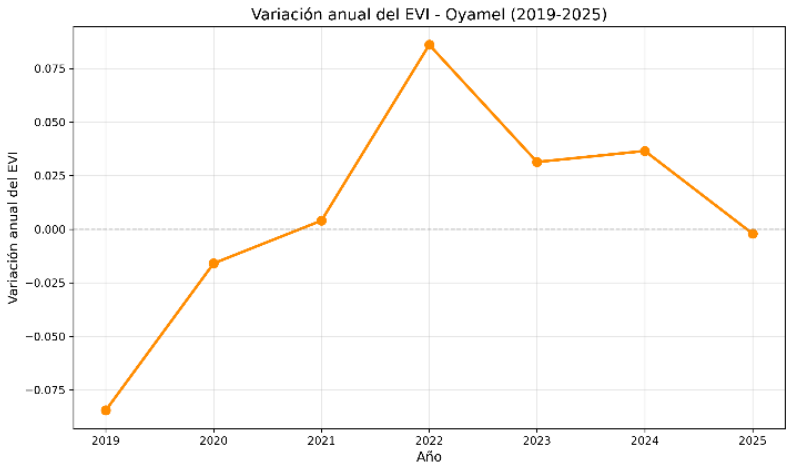
Figura 3. A. Interpolación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral NDVI para la zona del bosque de oyamel. B. Reclasificación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral del NDVI en 4 categorías de desvitalización: muy alta, alta, media y baja para la zona del bosque de oyamel.

Serie de tiempo EVI (2019 - 2025) En la figura 4 se puede observar la variación anual del EVI (Figura 4), muestra un incremento en la tasa de cambio del índice entre 2019 y 2022, pasando de -0.84 a $+0.086$. A partir de ese año la variación se invierte, disminuyendo progresivamente, hasta alcanzar un valor de -0.002

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

en 2025. Sin embargo, todos los valores de la serie se mantienen en un rango cercano a cero, lo que indica que índice no presenta cambios drásticos en su tasa de crecimiento.

Figura 4. Valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral del EVI para el periodo de 2019-2026.



Interpolación de la pendiente del EVI y semáforo de desvitalización

La interpolación del EVI (Figura 5A) muestra un patrón más homogéneo que el NDVI, con valores cercanos a cero en mayor parte del área. Esto sugiere que el EVI, al corregir los efectos atmosféricos y de suelo, no capta la variabilidad local del vigor.

El semáforo de desvitalización basado en el EVI (Figura 5B) muestra un patrón de pérdida de vigor con mayor extensión que el NDVI. Se observan 13 celdas (26.5 %)categoría de Muy Alto (rojo), 15 celdas (30.6 %) con categoría Alto (naranja), 13 celdas (26.5 % Medio y solo 8 celdas (16.3 % en bajo. El tener mayor proporción de celdas rojas sugiere que EVI, es más sensible a la pérdida de vigor en este bosque que el NDVI.

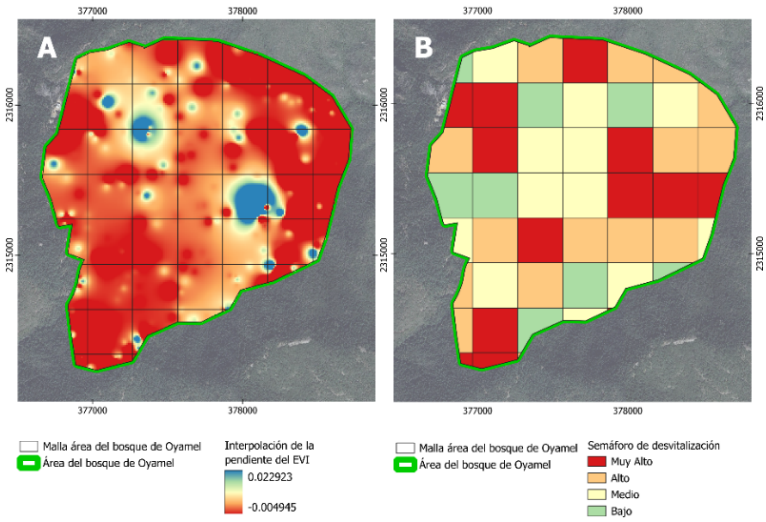


Figura 5. A. Interpolación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral EVI para la zona del bosque de oyamel. B. Reclasificación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral del EVI en 4 categorías de desvitalización: muy alta, alta, media y baja para la zona del bosque de oyamel.

Serie de tiempo NDTI estiaje (2019 – 2025)

En la Figura 6 se muestra la variación anual temporal del índice NDTI (Figura 6) calculada solo para la temporada de estiaje, muestra un incremento en la tasa de acumulación de madera seca en todo el periodo 2019 – 2025, que pasó de -0.08a $+0.037$ tras una disminución a -0.03 alcanzó en 2025 el valor máximo de la serie, que fue de $+0.041$. Este comportamiento podría indicar una tasa de acumulación de material leñoso seco, con un incremento particular en 2025. Este resultado indica un aumento en la carga de combustible forestal de 1000 horas y un importante riesgo de un incendio forestal de sexta generación.

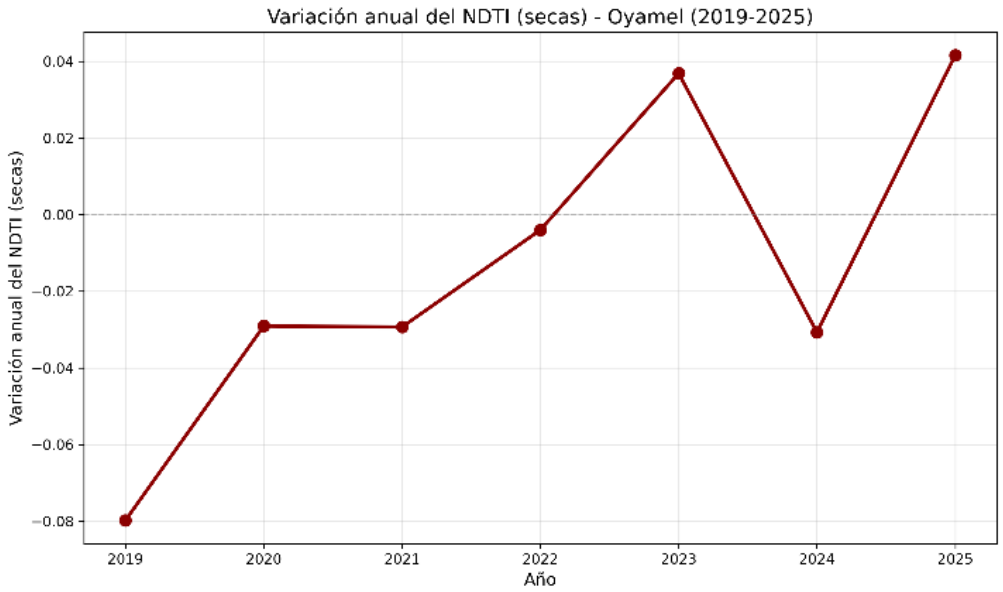


Figura 6. Valores del promedio anual de la serie de tiempo del índice NDTI para el periodo de secas 2019-2025 para el bosque de oyame.

Interpolación de los valores promedios NDTI y semáforo de desvitalización

La interpolación del NDTI (Figura 7A), calculada únicamente para la temporada de estiaje (noviembre – abril), muestra un patrón de acumulación de madera seca que se concentra principalmente en las laderas norte, coincidiendo con las áreas de pérdida de vigor identificadas en el NDVI.

El semáforo de desvitalización basado en el NDTI (Figura 7B) clasifica las celdas en cuatro categorías de riesgo según la acumulación de material leñoso seco. Se identificaron 13 celdas (26.5%) en la categoría Muy alto (rojo), lo que indica una alta acumulación de madera seca y eso implica un mayor riesgo de incendio. 16 celdas (32.7%) como Alto (naranja), 14 celdas (28.6%) como Medio (amarillo) y 6 celdas (12.2%) como Bajo (verde).

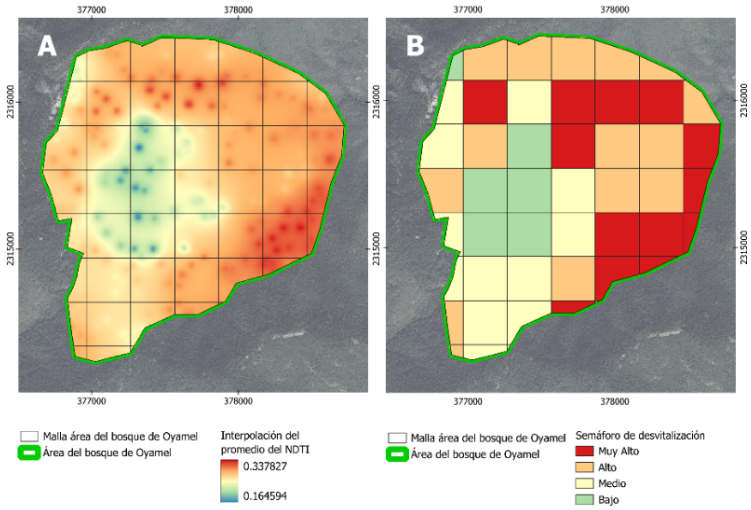


Figura 7. A. Interpolación de los valores promedios anuales de la serie de tiempo del índice espectral NDTI para la zona del bosque de Oyamel. B. Reclasificación de los valores promedios anuales de la serie de tiempo del índice espectral del NDTI en 4 categorías de desvitalización: muy alta, alta, media y baja para la zona del bosque de Oyamel.

Serie de tiempo NDII (2019 – 2026)

En la figura 8 se puede observar la variación anual del índice espectral NDII. Muestra un incremento en la tasa de cambio del contenido de humedad entre 2019 al 2024 pasando de $-0.29 + 0.20$, cifra ligeramente menor que la presentada en 2019. Este patrón nos indica que el bosque está experimentando un estrés hídrico el cual se ha ido acumulando al estar presente en varios años, lo que puede tener implicaciones para la salud del bosque oyamel a corto plazo.

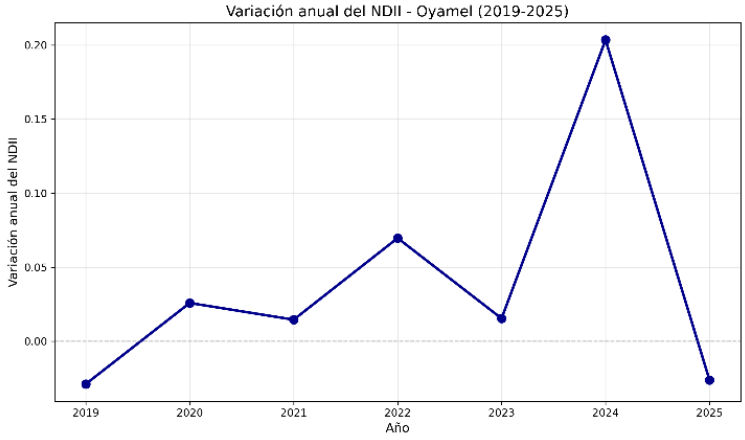


Figura 8. Variación anual de la serie de tiempo del índice espectral NDII para el periodo 2019-2025.

Interpolación de la pendiente del NDTI y semáforo de desvitalización

La interpolación del NDII (Figura 9A) muestra un patrón de perdida de humedad que se extiende por gran parte del bosque, con valores más negativos en las laderas Norte.

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

El semáforo de desvitalización basado en el NDII (Figura 9B) muestra que 13 celdas (26.5%)12 celdas (24.5%)12 celdas (24,5%) en medio (amarillo) 12 celdas (24.5%)en Bajo (verde). El hecho de que predominen las categorías de Muy alto, alto y medio indica una perdida generalizada de humedad en el bosque, consistente con el estrés observado en el NDVI y con la mortalidad documentada en campo.

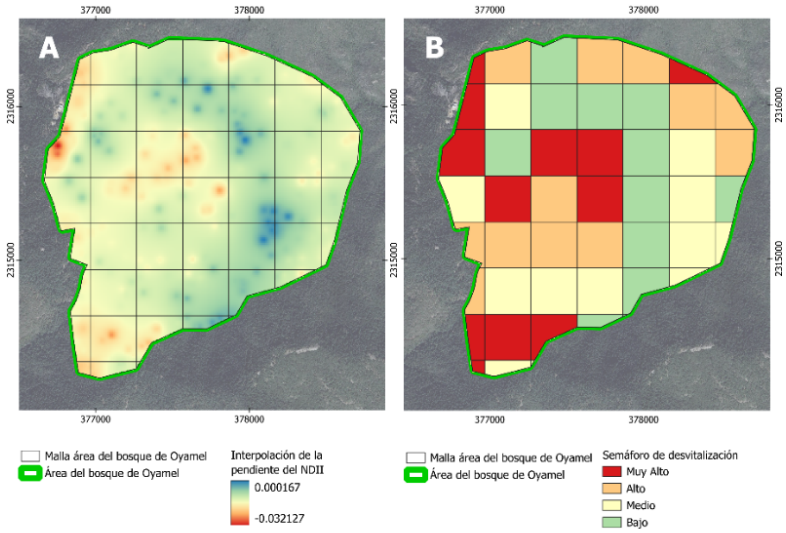


Figura 9. A. Interpolación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral NDII para la zona del bosque de Oyamel. B. Reclasificación de los valores de la pendiente de la serie de tiempo del índice espectral del NDII en 4 categorías de desvitalización: muy alta, alta, media y baja para la zona del bosque de Oyamel.

Serie de tiempo NDVI, EVI, NDTI, NDII

En la Figura 10 podemos observar la variación anual combinada de los cuatro índices espectrales (NDVI, EVI, NDTI y NDII) para el periodo 2019 – 2025. Esta gráfica es particularmente ilustrativa, ya que permite observar como las variaciones de los índices se complementan. Notemos que variaciones negativas en NDVI (pérdida de vigor) se acompañan de variaciones similares en el EVI y están correlacionadas con variaciones negativas en el NDII (pérdida de humedad) y positivas en el NDTI (aumento de madera seca). Este patrón sugiere una relación coherente entre la pérdida de vigor, la pérdida de humedad y el aumento de material leñoso seco de 1000 horas.

Un caso particular es el que se observa en el 2025, dónde el NDVI alcanza una variación de $+0.13$, lo que podría interpretarse como una recuperación en el vigor. Sin embargo, el EVI no muestra una variación significativa (-0.002), además el NDII presenta una variación negativa (-0.002) y el NDTI alcanza su variación máxima ($+0.04$). Este comportamiento sugiere que el aumento en el NDVI no refleja una recuperación real, sino una especie de “verdor engañoso”, donde el bosque mantiene su actividad fotosintética a corto plazo mientras pierde humedad y continúa el proceso de pérdida de vigor en el bosque oyamel y encino.

Es importante mencionar que la validación en campo (2026) confirma esta interpretación: en las zonas donde aparece este patrón se pudo observar una cantidad considerable de árboles muertos en pie además de troncos caídos a lo largo de las laderas, lo que apunta que el bosque está experimentando un estrés hídrico, que si persiste podría llevar a una mortalidad generalizada. Este hallazgo resalta la importancia de cruzar múltiples índices espectrales de forma complementaria para evitar interpretaciones erróneas en la lectura individual del NDVI.

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

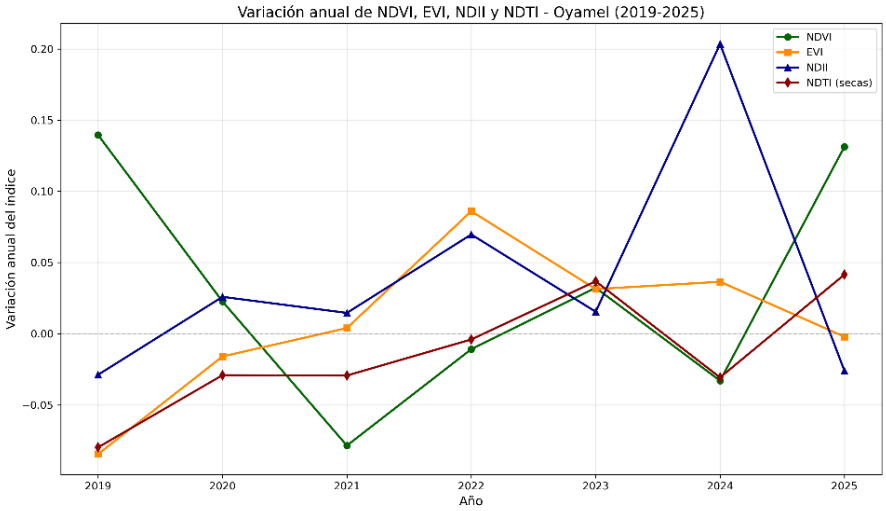


Figura 10 Variaciones anuales de los índices espectrales NDVI, EVI, NDTI y NDII del bosque de oyamel.

***Tabla 3**.Ortomosaicos de celdas con diferentes niveles de desvitalización del bosque de Oyamel*

Ortofoto de zona de oyamel y encino saludable. (celda color verde)	*Ortofoto de zona de oyamel y encino con un nivel alto de desvitalización. (celda color naranja)*	*Ortofoto de zona de oyamel y encino con un nivel muy alto de desvitalización. (celda color rojo)*
		

Discusión

En los últimos 15 años se ha registrado un crecimiento marcado en las investigaciones sobre el declive del género *Abies* inducido por sequías y altas temperaturas a nivel mundial. Este proceso desencadena la mortalidad arbórea mediante dos mecanismos fisiológicos principales: la falla hidráulica por cavitación y la inanición de carbono derivada del cierre estomático. Para el caso de México, la degradación de *Abies religiosa* responde a la interacción entre sequías severas, contaminación atmosférica (ej. ozono) y ataques de descortezadores (*Scolytus* y *Pseudohylesinus*) (Martínez-Gil *et al*., 2026).
En este sentido, nuestros resultados derivados de los índices espectrales estimados sugieren que la mortalidad del oyamel y del quercus en el ANP Pinal del Zamorano está fuertemente influenciada por las

condiciones de sequía en la región. La serie de tiempo del NDVI mostró una disminución pronunciada en el vigor vegetativo durante el periodo 2023–2024, lo cual coincide con una drástica reducción en la disponibilidad de humedad foliar captada por el NDII. Este comportamiento se vincula directamente con el incremento de la temperatura media global que ha alcanzado los 1.5 °C según los registros climáticos ERA5 y su consecuente aumento en el déficit de presión de vapor bajo escenarios del Niño climático y el riesgo a incendios forestales (Farfan *et al.,* 2021).

La presencia y persistencia de arbolado muerto en pie en la mezcla de oyamel y encino, observadas a través de las imágenes del dron, no solo confirman la severidad del estrés hídrico detectado espectralmente, sino que alteran la estructura del combustible forestal. Los árboles moribundos o declinados incrementan drásticamente la carga de combustibles leñosos pesados en pie (combustibles de 1000 horas). Bajo las condiciones climáticas extremas proyectadas, con mayor temperatura y menor humedad del combustible, este material seco en la masa forestal actúa como una vía de propagación vertical hacia el dosel, transformando incendios superficiales moderados en incendios de copa de alta severidad, difíciles de controlar en la topografía accidentada del Pinal del Zamorano. Ante este escenario, se vuelve indispensable implementar intervenciones de saneamiento y manejo adaptativo de combustibles ajustadas a la categoría de protección del ANP. En el marco normativo y de sanidad forestal (ej. NOM-019-SEMARNAT-2017), las acciones prioritarias deben enfocarse en el remanente de *Abies religiosa* infestado o senescente para interrumpir los focos de infestación por descortezadores (*Scolytus* spp. y *Pseudohylesinus* spp.) antes del surgimiento de nuevas generaciones de escarabajos. Esto contempla el derribo, troceo, descortezado y tratamiento *in situ* de los árboles infestados, así como la poda fitosanitaria en individuos con afectación parcial. No obstante, en un bosque de alta montaña con pendientes pronunciadas, el aprovechamiento y extracción total de la necromasa no siempre es factible ni ecológicamente deseable. Por ello, el tratamiento del material leñoso sobrante debe contemplar técnicas como el picado de ramas y acomodo en curvas de nivel, o la aplicación de quemas prescritas y de reducción de combustibles en franjas estratégicas durante la ventana de baja vulnerabilidad meteorológica. Estas prácticas reducen la continuidad horizontal y vertical del combustible leñoso, mitigan el riesgo de incendios catastróficos y permiten conservar una fracción controlada de madera muerta sobre el suelo para favorecer la retención de humedad, la protección del suelo contra la erosión hídrica y la reincorporación de nutrientes al ecosistema.

Conclusión

A lo largo de este estudio, el uso de imágenes satelitales permitió generar insumos que permitieron el monitoreo del ANP Pinal del Zamorano en el periodo de tiempo de 8 años (2019-2025), obteniendo imágenes espectrales para el cálculo de índices como el NDVI, EVI, NDII y NDTI, que miden la vigorosidad, cantidad de humedad y combustible potencial de la vegetación.

Con ayuda de estos índices, se encontró que la dinámica del bosque de oyamel en el Pinal del Zamorano presentó un patrón en su vigorosidad (NDVI y EVI) que, al verlo aisladamente podría no estar reflejando correctamente la salud del bosque. Al integrar en el análisis otros índices espectrales como el índice infrarrojo de diferencia normalizada (NDII), sensible a la humedad en la vegetación, y el índex de labranza de diferencia normalizada (NDTI), potencialmente relacionado a la cantidad de madera seca, el monitoreo nos da indicios de un estrés hídrico fuerte. Aunado a esto, la verificación en campo nos mostró una gran cantidad de árboles muertos en pie, así como una cantidad considerable de árboles caídos principalmente en las laderas Norte, que es otra señal muy clara de un proceso de declinación forestal.

En este estudio, se exploró la acumulación de material combustible a través del índice NDTI, dando resultados prometedores, en el sentido de que altos valores de NDTI parecen tener correlación con los conteos de árboles muertos obtenidos a partir de las imágenes del dron. Estudios más extensos serán necesarios para confirmar estas correlaciones a mayor escala, y, potencialmente, usar modelos de aprendizaje máquina para plantear este problema de cuantificación de masa leñosa como un problema de regresión a partir de los datos espectrales, tomando los datos de dron como *ground truth*.Una conclusión de este trabajo es que, para un monitoreo eficaz de un área forestal, utilizar un solo índice para evaluar los inicios de una posible desvitalización no es suficiente y se requiere de la medición de otros índices espectrales como el índice de humedad y la cantidad de madera seca. Además, el método aquí empleado es posible de replicar en otras áreas forestales, ofreciendo robustez y practicidad.

Referencias

Carrasco N. G., Milán M., & Verma S. P. (1989). Geología de volcán del Zamorano, estado de Querétaro. *Universidad Autónoma de Querétaro*. Instituto de Geología. 8(2), 194-201.

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2021). *Continuo de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:50,000* [Capa vectorial digital]. Infraestructura de Datos Espaciales Forestales (IDEFOR). https://idefor.cnf.gob.mx/

Gobierno del Estado de Guanajuato (2000). Decreto gubernativo número 161. Periódico Oficial de Gobierno del Estado de Guanajuato, año 87, tomo 138, número 45.

Farfán, M., Dominguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., & Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: a case study in Guanajuato. *Environmental monitoring and assessment*, *193*(10), 684. https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-021-09494-0

Martínez-Gil, P., Cibrián-Tovar, D., Villanueva-Morales, A., Gallardo-Salazar, J. L., & Monterroso-Rivas, A. I. (2026). Forest decline of the genus *Abies* due to climate change: Evidence from a literature review. *Forests*, *17*(7), Artículo 732. https://doi.org/10.3390/f17070732

Zamudio, S. 2012. Diversidad de ecosistemas del Estado de Guanajuato en La Biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado vol. II. México. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)/ Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE)*, 21-25.