

## Análisis comparativo de la pérdida de materia orgánica en zona forestal afectada por incendio en Atltzayanca, Tlaxcala y zona no afectada

Gabriel Marquez Aguilar<sup>1\*</sup> , Gastón Lima Luna<sup>1</sup>, Javier Zorrilla Siller<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Secretaría de Impulso Agropecuario, Ex-Rancho La Aguanaja S/N, 90600 Apetatitlán, Tlaxcala, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL, Facultad de Ciencias Químicas, Ave. Universidad S/N Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León C.P. 64451, México.

Email de autor para correspondencia: \*[gabriel.marquezgl@uanl.edu.mx](mailto:gabriel.marquezgl@uanl.edu.mx)

**Recibido:** 17 agosto 2025. **Aceptado:** 15 febrero 2026

### RESUMEN

Los incendios forestales representan una de las principales perturbaciones abióticas que afectan la estructura y funcionalidad de los ecosistemas, generando impactos significativos sobre la vegetación y las propiedades del suelo, especialmente sobre la materia orgánica (MO). El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la pérdida de MO en una zona forestal afectada por un incendio ocurrido los días 15 al 18 de abril de 2025, en los límites de los municipios de Atltzayanca, Tlaxcala y Libres, Puebla, mediante un análisis comparativo con una zona no afectada. Con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (GIS) como QGIS y utilizando imágenes satelitales Sentinel-2 se determinaron los niveles de severidad del fuego a partir del índice  $\Delta$ NBR (Diferencia de Índice de Quema Normalizado). La MO del suelo se cuantificó por el método de Walkley-Black conforme a la NOM-021-RECNAT-2000. El análisis estadístico (ANOVA) mostró diferencias significativas en el contenido de MO entre la zona afectada ( $2.14 \pm 1.11\%$ ) y la zona testigo ( $4.56 \pm 1.48\%$ ), evidenciando una pérdida significativa de MO como resultado del incendio. Estos resultados confirman el efecto negativo de los incendios sobre la calidad del suelo, y destacan la importancia de monitorear el impacto de eventos de fuego, especialmente en regiones agrícolas con prácticas de quema recurrentes.

**Palabras clave:** Análisis estadístico; Atltzayanca; incendio forestal; Índice de Área Quemada Normalizado; materia orgánica del suelo; Sentinel-2; severidad del fuego.

## ABSTRACT

Wildfires represent one of the main abiotic disturbances affecting the structure and functioning of ecosystems, generating significant impacts on vegetation and soil properties, particularly on soil organic matter (OM). This study aimed to evaluate OM loss in a forested area affected by a wildfire that occurred between April 15 to 18, 2025, along the borders of the municipalities of Atltzayanca, Tlaxcala, and Libres, Puebla, through a comparative analysis with an unaffected area. Using Geographic Information System (GIS) tools such as QGIS and Sentinel-2 satellite imagery, fire severity levels were determined based on the differenced Normalized Burn Ratio ( $\Delta$ NBR) index. SOM was quantified using the Walkley-Black method in accordance with NOM-021-REC NAT-2000. Statistical analysis (ANOVA) revealed significant differences in SOM content between the fire-affected area ( $2.14 \pm 1.11\%$ ) and the control site ( $4.56 \pm 1.48\%$ ), indicating a substantial loss of OM as a consequence of the wildfire. These results confirm the negative impact of wildfires on soil quality and highlight the importance of monitoring fire-related disturbances, especially in agricultural regions with recurrent burning practices.

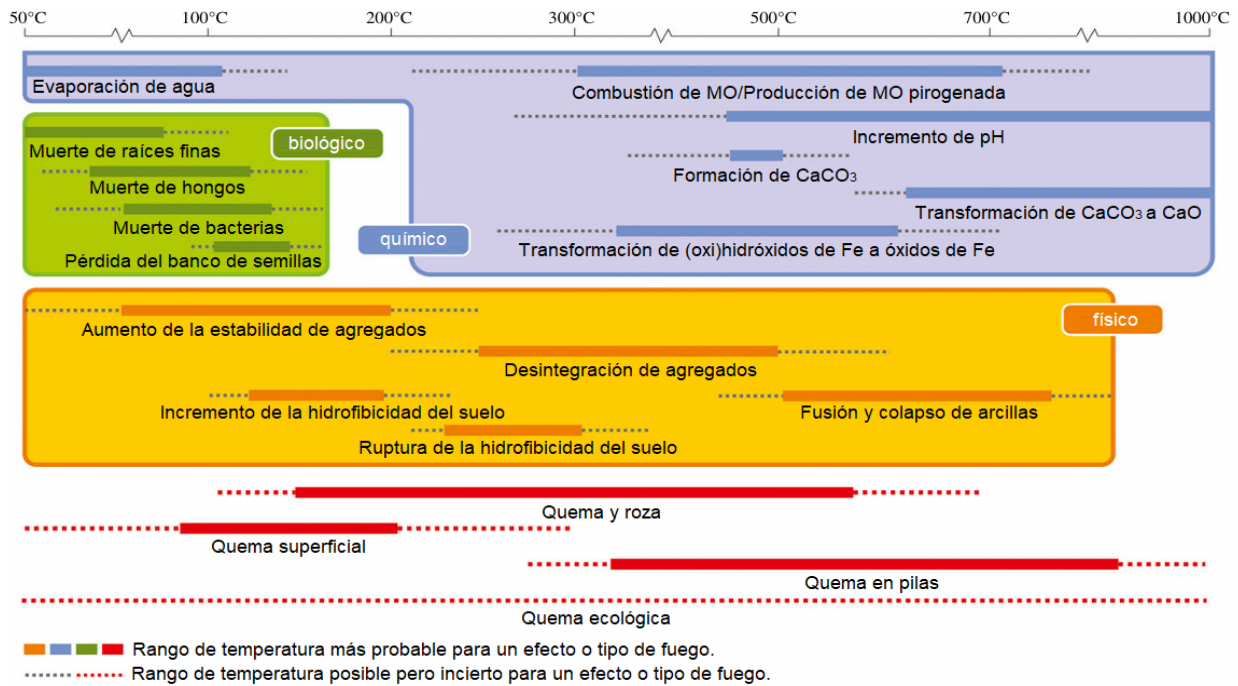
**Keywords:** Atltzayanca; fire severity; forest fire; Normalized Burn Ratio; Sentinel-2; soil organic matter; statistical analysis.

## INTRODUCCIÓN

El fuego es uno de los principales factores de perturbación ambiental en los ecosistemas forestales, tanto tropicales, boreales y templados, se considera un fenómeno global que afecta gran parte de las áreas terrestres [1, 2]. Los incendios afectan la mayor parte de la vegetación [3], constituyendo la principal perturbación abiótica en estos ecosistemas [4], además de alterar las propiedades morfológicas y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo [2, 5]. Las modificaciones en el suelo se encuentran impulsadas por la temperatura que se presenta durante el incendio [2], como se muestra en Figura 1.

A pesar de que un incendio forestal genera múltiples impactos, la pérdida de vegetación y árboles suele ser el más visible y evidente. Sin embargo, los componentes clave de un ecosistema edáfico, son los microorganismos al encargarse del 80-90% de los procesos del suelo, ya que son los principales agentes responsables de la fertilidad y su calidad [5]. Un solo gramo de suelo puede almacenar hasta 1010 células bacterianas y una diversidad de especies estimada por encima del orden de  $10^4$  especies [7]. La muerte de la mayoría de microorganismos en la superficie del suelo ocurre en temperaturas de 50 y 120 °C, esto es un efecto intrínseco sobre la materia orgánica (MO) [8]. Los impactos negativos por incendio





**Figura 1.** Rango de temperaturas de las alteraciones que muestra el suelo en las propiedades físicas, químicas y biológicas de acuerdo con Santín y Doerr [6].

en los microorganismos del suelo, pueden persistir incluso después de más de 10 años al encontrarse en menor proporción en el suelo [9]. Debido a esto, la muerte de los organismos vivos son un efecto directo y se miden 1-3 semanas después del incendio (antes de los eventos de las primeras lluvias) y los efectos indirectos a corto plazo, mediano plazo y largo plazo se miden: 1-3 meses a 1 año; 1-3 meses a 3-5 años y >3-5 años, respectivamente [5]. Así mismo, el grado de pérdida o descomposición de MO sobre el suelo es un indicativo de la gravedad del incendio [10]. Sin embargo, los efectos del incendio en la MO varían según el tipo de ecosistema, las condiciones geográficas, la frecuencia del fuego e intensidad [11].

En este estudio se describe la severidad y área

afectada por el incendio, se identifica la vegetación impactada del incendio y área quemada, la vegetación afectada y se analiza el efecto de la pérdida de MO por los incendios forestales ocurridos en las fechas del 15 al 18 de abril en los límites entre los municipios de Atltzayanca, Tlaxcala y Libres, Puebla. Una problemática muy común en la Agricultura es la quema agrícola, Korontzi *et al.*, en 2006 [12] estimaron que en México las quemas agrícolas representan el 12% del total de incendios. De acuerdo con SEMARNAT [13], indica que de 2020 a 2023 el 21.7% de los incendios forestales son por actividades agrícolas. Igualmente, se ha reportado en el Parque Nacional La Malinche, una relación positiva entre los incendios forestales y la agricultura [14].

## METODOLOGÍA

### Área de estudio

Atltzayanca se ubica en el Altiplano central mexicano a 2600 metros sobre el nivel del mar con coordenadas geográficas entre los 19° 26' latitud N y 97° 48' longitud O. El clima del municipio es semiseco, con régimen de lluvias en los meses de julio a septiembre, la temperatura promedio mínima anual registrada es de 6.3 °C y la máxima de 22.3 °C con una precipitación promedio mínima registrada de 7.3 mm y máxima de 122.7 mm [15]. La

vegetación está compuesta principalmente por bosques de pino, oyamel, seguido de bosques de pino-encino, táscate, pastizales y matorrales. El estudio fue llevado a cabo en el rancho La Quinta de la localidad de Xaltitla del municipio de Atltzayanca perteneciente al estado de Tlaxcala, la cual fue una de las zonas afectadas en el incendio forestal sucedido en abril de 2025. Durante el muestreo se identificaron los impactos post-incendio en elementos como rocas, ejemplares arbóreos, vegetación arbustiva y fauna (Figura 2).



**Figura 2.** Imágenes de afectación de post-incendio en Atltzayanca-Libres.

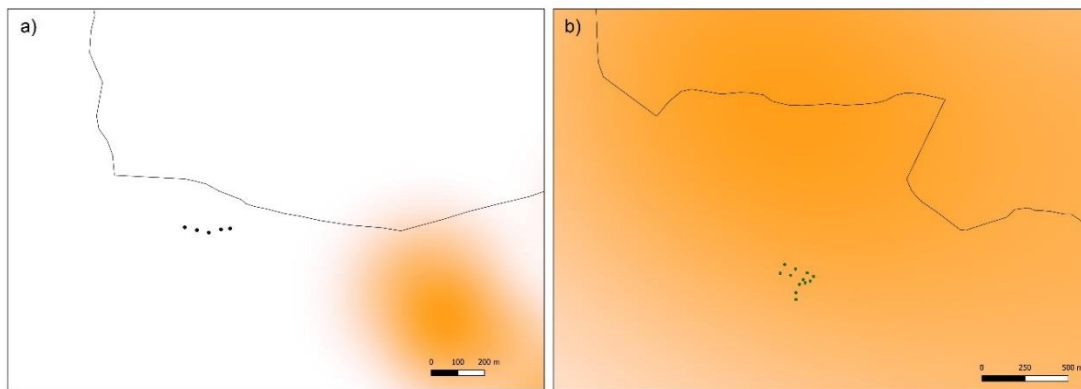
Con el objetivo de comparar los niveles de MO entre áreas impactadas y no impactadas por el incendio, se recolectaron muestras testigo en una zona no afectada.

La Tabla 1 presenta las coordenadas geográficas decimales y el tipo de suelo de

acuerdo con el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) [16] de la zona afectada y de la zona testigo, y en la Figura 3 se muestra el mapa de las zonas de estudio.

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas y tipo de suelo de las zonas de estudio.

Lugar	Latitud	Longitud	Tipo de suelo
<b>Zona testigo Ejido la Mosca</b>			
T1	19.47054	-97.792707	Regosol eútrico
T2	19.4705	-97.793035	Regosol eútrico
T3	19.47039	-97.793472	Regosol eútrico
T4	19.47048	-97.793897	Regosol eútrico
T5	19.47058	-97.794333	Regosol eútrico
<b>Zona afectada rancho la quinta</b>			
M-1	19.448	-97.762409	Regosol eútrico
M-2	19.44821	-97.763053	Regosol eútrico
M-3	19.44845	-97.763651	Regosol eútrico
M-4	19.44798	-97.763898	Cambisol eútrico
M-5	19.44786	-97.763324	Cambisol eútrico
M-6	19.44762	-97.762636	Cambisol eútrico
M-7	19.44781	-97.762062	Regosol eútrico
M-8	19.44754	-97.762245	Cambisol eútrico
M-9	19.44745	-97.762518	Cambisol eútrico
M-10	19.44736	-97.762839	Cambisol eútrico
M-11	19.44691	-97.763029	Cambisol eútrico
M-12	19.44653	-97.763029	Cambisol eútrico



**Figura 3.** Zonas de estudio en Atltzayanca, Tlaxcala: a) Muestreo de zonas testigo en zona no afectada Ejido La Mosca, b) Muestreo en zona afectada rancho La Quinta.

## Muestreo de suelo

Las muestras de la zona afectada del rancho La Quinta se recolectaron tres semanas después del incendio entre el 03 al 10 de mayo de 2025, donde se removió la capa de ceniza producida por la combustión de hojarasca. El muestreo se realizó a una profundidad de 0-15 cm, cada muestra se tomó a una distancia de 50-70 metros de distancia, aproximadamente. Cada zona muestreada se consideró como una unidad independiente, debido a la heterogeneidad en topografía y cobertura vegetal. Tras la recolección, las muestras se colocaron en bolsas opacas y se protegieron de la luz hasta su secado. Posteriormente, las muestras se secaron a temperatura ambiente durante 1 semana, se eliminaron piedras y restos de raíces y se tamizaron a 500  $\mu\text{m}$  para la determinación de MO.

## Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con ayuda del programa OriginLab. La variabilidad del contenido de MO se describió mediante la desviación estándar para las muestras de suelo de la zona afectada rancho La Quinta y zona no afectada del ejido La Mosca. La determinación de MO se realizó una sola vez. Para comparar el contenido medio de MO entre ambas zonas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, considerando la zona (afectada y no afectada) como factor de clasificación.

## Categorización de uso de suelo y vegetación

La categorización de uso de suelo y vegetación

se realizó con la base de datos de la cartografía de uso de suelo y vegetación de INEGI serie I elaborada entre los años 1980-1991 [16], con una escala 1:250,000. Para observar una clasificación jerárquica de la vegetación y uso de suelo se empleó el software QGIS. La Tabla 2 muestra la clasificación de vegetación y uso de suelo en Atltzayanca, Tlaxcala-Libres, Puebla de acuerdo con INEGI serie I.

**Tabla 2.** Clasificación de vegetación y uso de suelo que se encuentra en Atltzayanca-Libres.

Formación	Tipo de vegetación y uso de suelo
Cultivos	Agricultura (de riego y temporal)
Bosques	Oyamel, Pino, Táscate
Matorral	Desértico (rosetófilo)
Pastizal	Halófilo e inducido
Vegetación de bosque	Pino y Encino
Vegetación de matorral	Desértico (rosetófilo)

## Imágenes de satélite y procesamiento

Las imágenes utilizadas en este estudio proceden de Sentinel-2, provisto del sensor MSI (Multispectral Instrument), obtenidas del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las dos imágenes adquiridas se escogieron en fechas lo más cercana a la ocurrencia del pre y post-incendio para minimizar diferencias fenológicas y de ángulo solar. Las fechas de las imágenes satelitales del pre-incendio y post-incendio corresponden al 12 de abril de 2025 y 27 de abril de 2025, respectivamente.

El perímetro digitalizado se delimitó con herramientas de digitalización de QGIS. De acuerdo con Arellano *et al.*, 2017 [17], se asumió que la dispersión atmosférica es insignificante en bandas infrarrojas en ausencia de nubes y no se efectuó ninguna corrección atmosférica.

### Cálculo de los índices espectrales para evaluar el nivel de severidad del fuego

Los valores de NBR (Índice de Área Quemada Normalizado) y  $\Delta$ NBR (Diferencia de Índice de Área Quemada Normalizado) se utilizaron como índices espectrales para el monitoreo y análisis de severidad de las quemaduras en el incendio forestal. El NBR es un índice diseñado

y sirve para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendio, este índice combina el uso de longitudes de onda Infrarrojo Cercano (NIR) y de Infrarrojo de Onda Corta (SWIR) [18]. En la Figura 4 se muestra el rango de los valores de longitud de onda en el espectro electromagnético NIR y SWIR.

De acuerdo con la respuesta espectral obtenida de sensores remotos se diferencia la detección de áreas quemadas respecto a áreas de vegetación sana, como se muestra en Figura 4. En general, la detección de zonas quemadas se identifica del carbón resultante de la vegetación afectada después de la quema [20]. Los valores de NBR se calcularon con la siguiente ecuación:

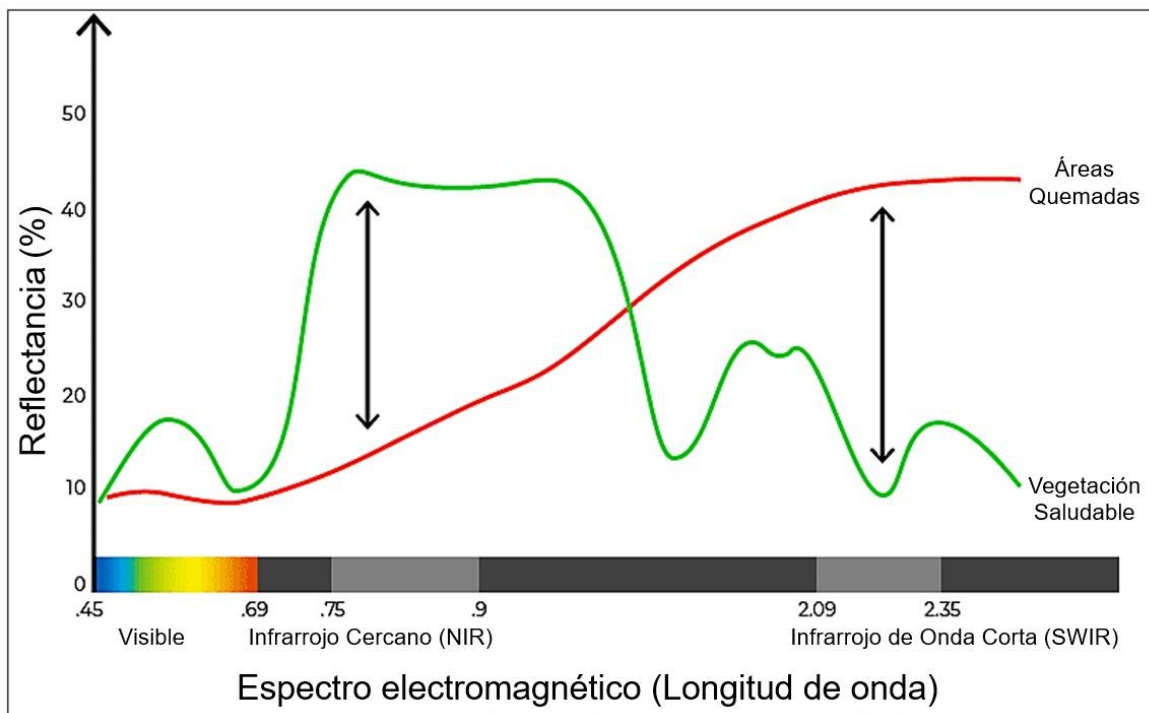


Figura 4. Comparación de la respuesta espectral de áreas quemadas y vegetación sana [19].

$$NBR = [NIR - SWIR] / [NIR + SWIR]$$

Donde NBR es el Índice de Área Quemada Normalizado, NIR es el Infrarrojo Cercano y SWIR el infrarrojo de Onda Corta.

Para estimar la severidad del incendio se realiza el cálculo de  $\Delta NBR$ , utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta NBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio}$$

Donde  $\Delta NBR$  es la Diferencia de Índice de Área Quemada Normalizado,  $NBR_{pre-incendio}$  es el Índice de Área Quemada Normalizado pre-incendio y  $NBR_{post-incendio}$  el Índice de Área Quemada Normalizado post-incendio.

La clasificación para interpretar la severidad del incendio se basó de acuerdo con la tabla propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para interpretar la gravedad de las quemaduras que se observa en Tabla 3.

**Tabla 3.** Niveles de severidad de incendio, clasificados según la USGS del Programa de Protocolo de Monitoreo e Inventario de Efectos del Incendio (FireMON) [21].

$\Delta NBR$	Severidad de incendio
<-0.25	Aumento de vegetación, alto (post-incendio)
-0.25 a -0.1	Aumento de vegetación, bajo (post-incendio)
-0.1 a 0.1	No quemado
0.1 a 0.27	Severidad baja
0.27-0.44	Severidad moderada-baja
0.44 a 0.66	Severidad moderada-alta
>0.66	Severidad alta

### Determinación de MO

La MO del suelo se cuantificó usando el método de Walkley-Black de acuerdo con la norma NOM-021-RECNAT-2000 [22]. Este método se basa en la oxidación húmeda del carbono orgánico del suelo agrícola mediante una mezcla de dicromato de potasio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 1 N y ácido sulfúrico concentrado ( $H_2SO_4$  al 97%), se agitó durante un minuto y se dejó reposar 30 minutos. Luego, se añadieron 200 mL de agua desionizada y tres gotas de difenilamina (al 5% en  $H_2SO_4$ ) y se añadió ácido fosfórico ( $H_3PO_4$  al 85%) para eliminar las estructuras orgánicas remanentes que no se eliminan durante la reacción exotérmica generada en la reacción entre  $H_2SO_4$  y  $K_2Cr_2O_7$ . Por último, la mezcla se tituló con la adición de sulfato ferroso ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 1 M, hasta alcanzar un punto final de color verde.

El Carbono Orgánico (%CO) se determinó mediante la siguiente ecuación;

$$\%CO = [(B-T) / g] [N] [0.39] [mcf]$$

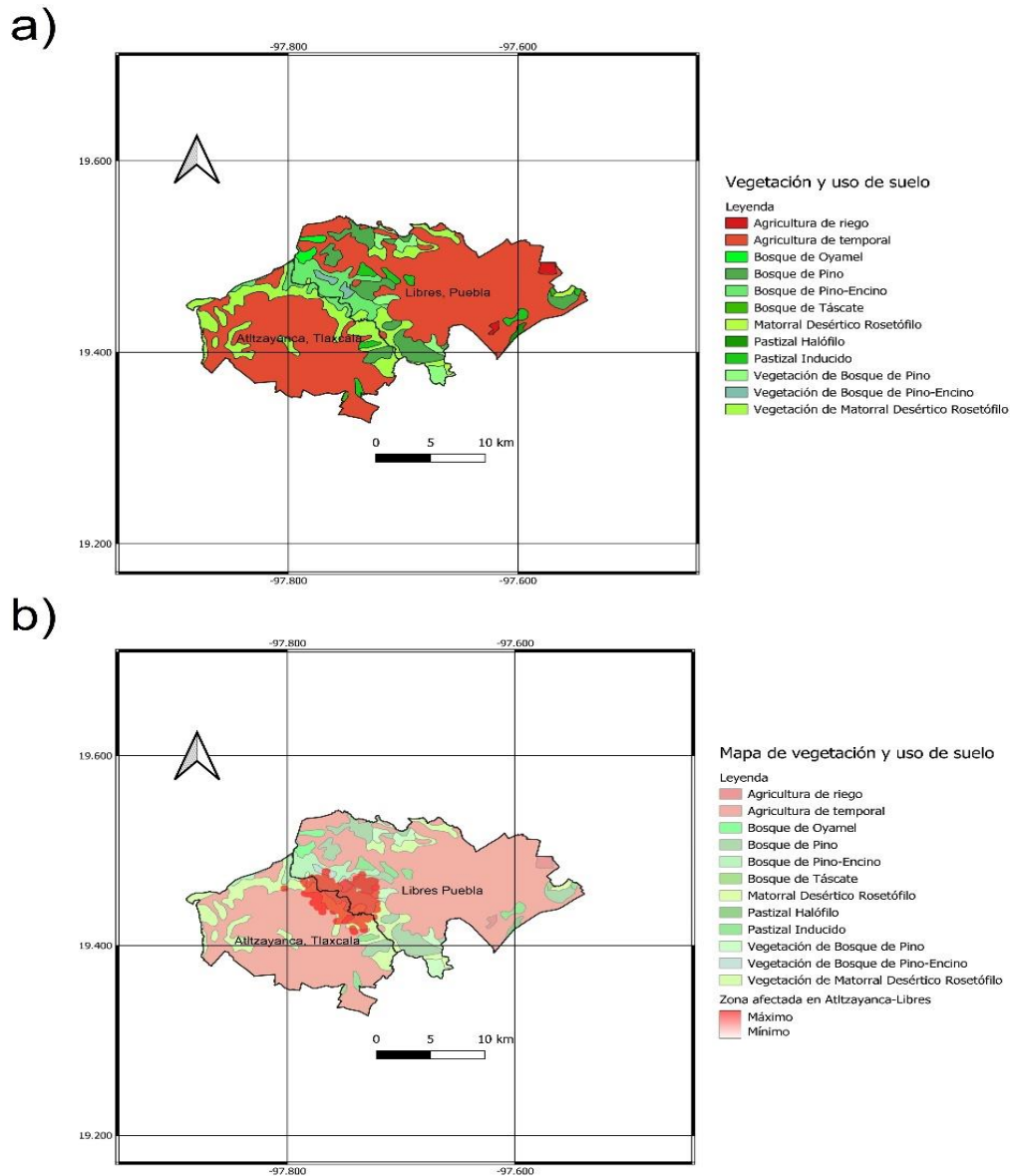
Donde %CO es el Porcentaje de Carbono Orgánico, B es el volumen gastado de sulfato ferroso para valorar el blanco, T es el volumen gastado para valorar la muestra, g es el peso de la muestra, N es la normalidad exacta del sulfato ferroso y mcf el factor de corrección de humedad.

Posteriormente, el porcentaje de MO se calculó multiplicando el %CO por el factor de Van Bemmelen (1.724).

## RESULTADOS

El análisis espacial permitió delimitar el área afectada y clasificar su severidad, así como evaluar los cambios en la cobertura vegetal y su

relación con la MO del suelo. Estos cambios se aprecian en la Figura 5, donde se contrasta la cobertura previa al siniestro (Figura 5a) de la zona Atltzayanca, Tlaxcala-Libres, Puebla.



**Figura 5.** Mapa de vegetación y uso de suelo: a) Mapa de vegetación y uso de suelo Atltzayanca-Libres elaborado con información del SNIB, b) Mapa de vegetación y uso de suelo en zonas afectadas de Atltzayanca-Libres elaborado a partir de información del SNIB y del Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS, por sus siglas en inglés) de la NASA recolectada los días 15 al 18 de abril de 2025.

Por otro lado, en Figura 5b se muestra una mancha de rojo intenso, donde se observa que las principales afectaciones en el mapa de vegetación y uso de suelo afectaron principalmente los ecosistemas de pino, pino encino, vegetación de matorral, vegetación de bosque de pino-encino y parte de la superficie agrícola.

La Figura 6 muestra las imágenes multiespectrales antes y después del incendio forestal en Atltzayanca-Libres. La Figura 6a muestra la imagen satelital NBR de Atltzayanca-Libres del 12 de abril de 2025, en esta imagen no se visualiza afectación por incendio forestal, la cobertura vegetal, se visualiza con tonos claros en la parte central-norte y zonas agrícolas con tonos oscuros grisáceos. Por contrario, la Figura 6b muestra la foto satelital NBR de Atltzayanca, Tlaxcala-Libres, Puebla después de la afectación por incendio forestal ocurridos durante los días 15 al 18 de abril de 2025, así mismo, la cobertura vegetal se observa con tonos claros y zonas agrícolas con tonos grisáceos oscuros, sin embargo, en esta figura se identifican las zonas con afectación por incendio forestal con tonos oscuros de color negro. Las imágenes NBR del pre y post-incendio, permiten identificar el grado de cambio en la reflectancia asociada a la perturbación.

Posteriormente, la Figura 7a muestra el mapa  $\Delta$ NBR asociadas a las imágenes multiespectrales NBR pre y post-incendio que cuantifica la severidad del cambio antes y después de la perturbación, las zonas con mayor

cambio se muestran con tonos claros, que representan la afectación de incendio. Esta imagen sirve como base para la clasificación de severidad. Con el software QGIS y el procesamiento de las imágenes multiespectrales de la misión espacial Sentinel-2, se registraron valores de  $\Delta$ NBR en un rango de -0.23 a 0.64 que sirvieron para la clasificación de severidad.

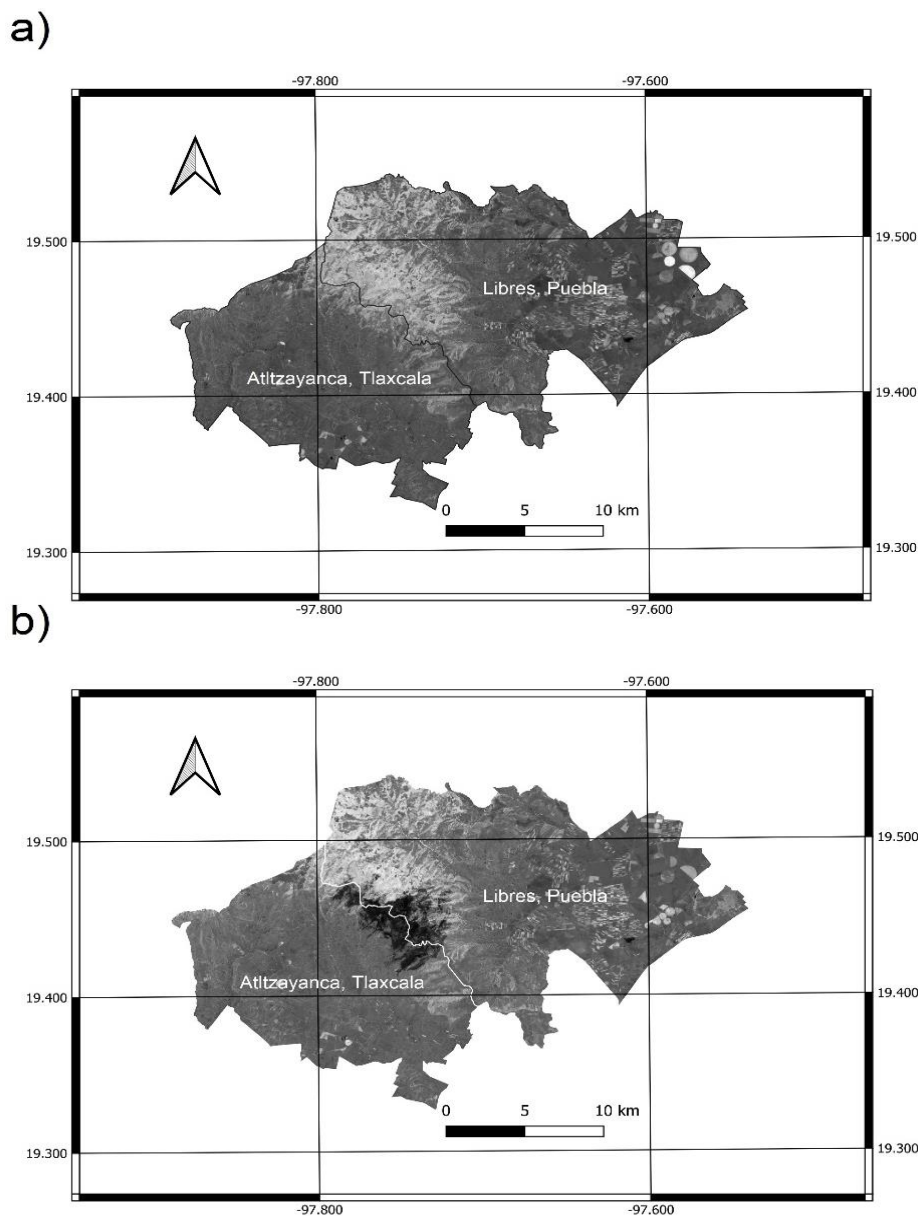
La Figura 7b muestra el  $\Delta$ NBR con la clasificación de severidad de acuerdo con la USGS. Las afectaciones ocurrieron principalmente en las zonas de cobertura vegetal y bosque (Figura 3b). Se identificaron tres tipos de severidad: severidad baja, moderada-baja y moderada-alta, que se observan de amarillo, naranja y rojo, respectivamente, y de color verde se muestran las áreas sin cambio/no quemadas que se concentran en áreas agrícolas y parte de zonas de área vegetal y bosque (Figura 5b). Se observa que las afectaciones con severidad moderada-baja y moderada-alta se concentran en el centro de la zona afectada y severidad baja en los exteriores.

Así mismo, en Figura 8 se muestra la superficie afectada por incendio forestal entre los municipios de Atltzayanca, Tlaxcala, y Libres, Puebla, que se estimó en 2714.87 ha, a partir del análisis de una imagen satelital Sentinel-2 correspondiente al 27 de abril de 2025.

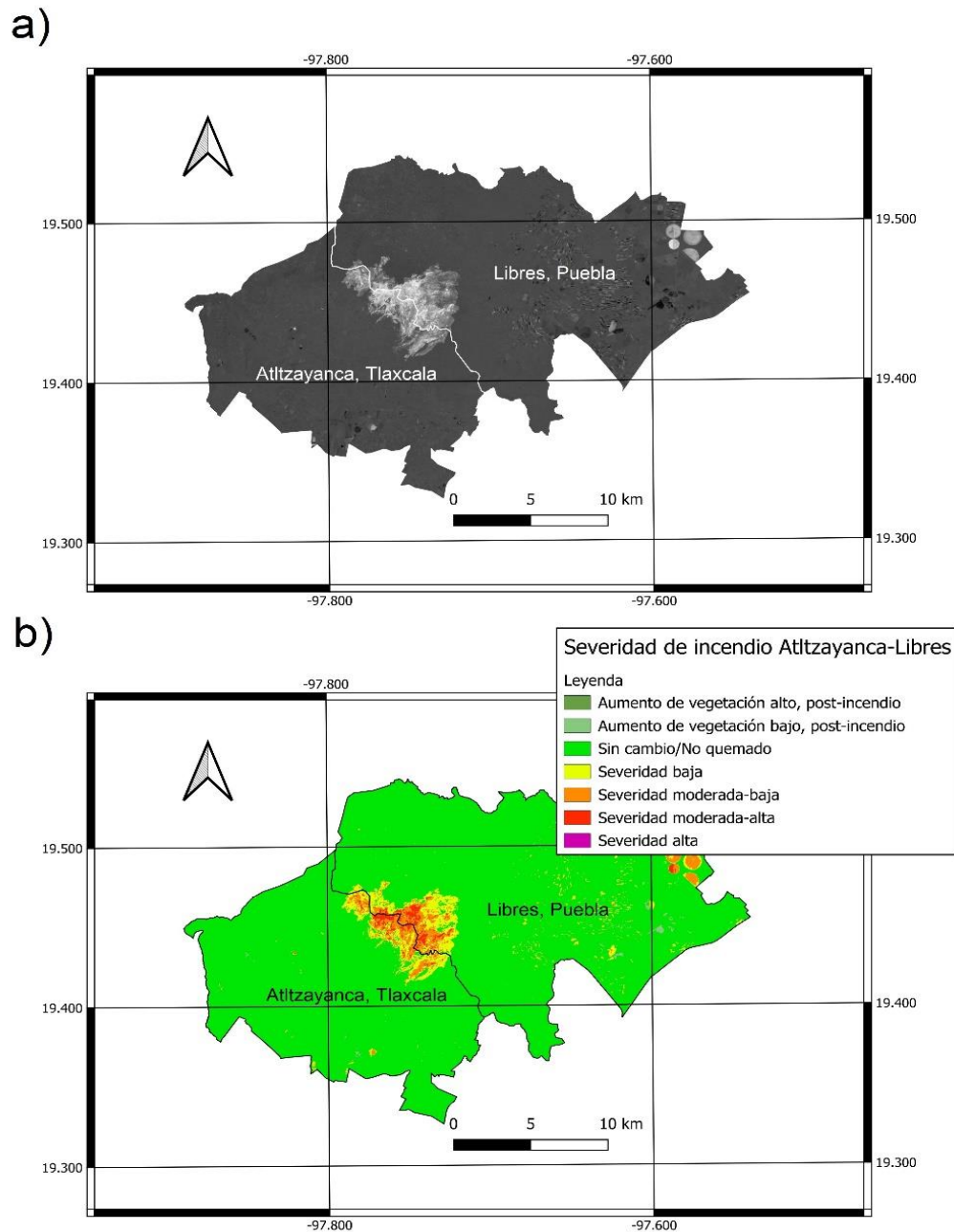
Por otro lado, en Figura 9 se observa el mapa topográfico de la zona afectada en Atltzayanca, Tlaxcala-Libres, Puebla el cual muestra la distribución altitudinal de la zona afectada por

el incendio forestal. El relieve está clasificado en 7 clases altitudinales en un rango menor de 2672 a mayor de 3060 metros sobre el nivel del mar (msnm). Las principales afectaciones por incendio, clasificadas como severidad

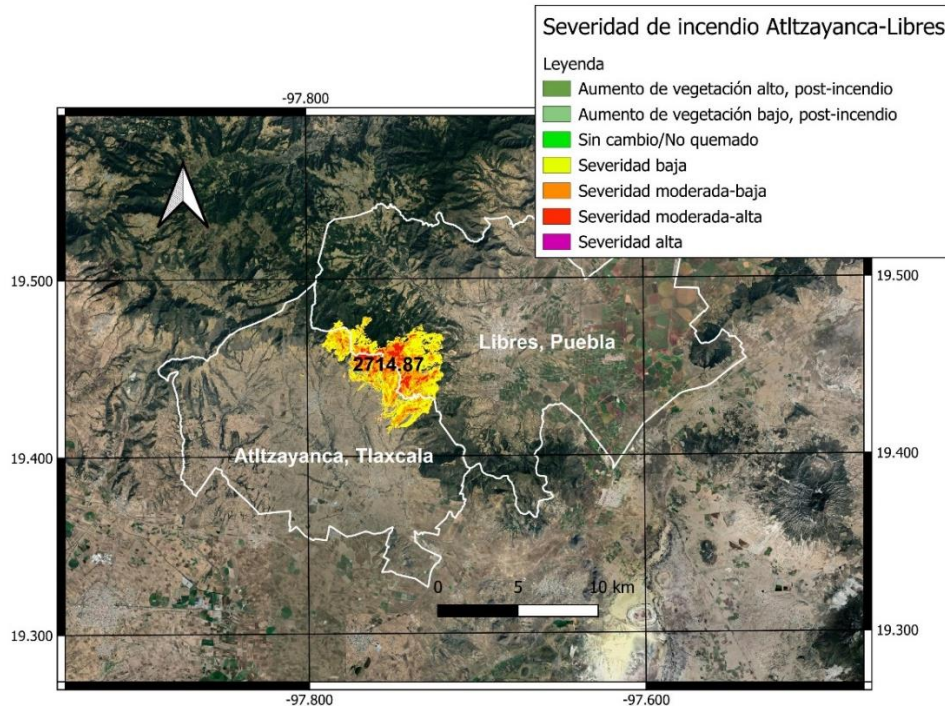
moderada-baja y moderada-alta, se concentraron en el centro de la huella de la cicatriz del incendio, en zonas con altitudes comprendidas entre los 2,700 y 3,000 metros sobre el nivel del mar.



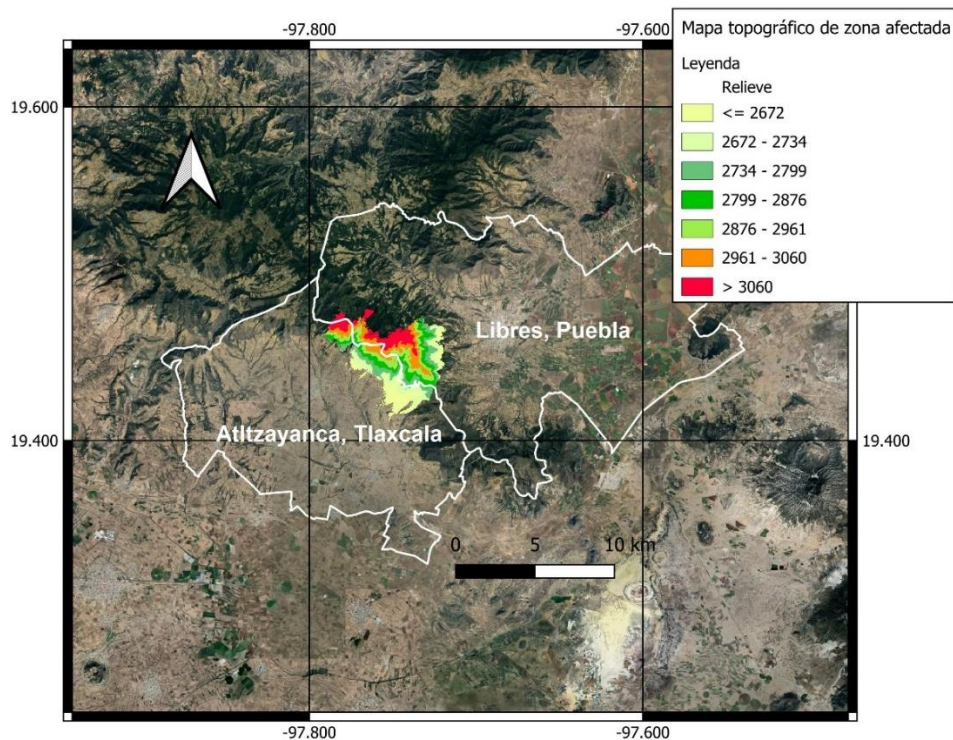
**Figura 6.** Imágenes multiespectrales NBR antes y después de incendio Atltzayanca-Libres: a) Imagen NBR pre-incendio Atltzayanca-Libres del 12 de abril de 2025, b) Imagen NBR post-incendio Atltzayanca-Libres del 27 de abril de 2025. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales obtenidas de la misión espacial Sentinel-2 y procesada en QGIS.



**Figura 7.** Imágenes multiespectrales después de afectación por incendio: a) Imagen  $\Delta$ NBR post-incendio Atltzayanca-Libres del 27 de abril de 2025, b) Imagen dNBR, nivel de severidad post-incendio Atltzayanca-Libres del 27 de abril de 2025. Elaboración propia a partir de imágenes satelitales obtenidas de la misión espacial Sentinel-2 y procesada en QGIS.

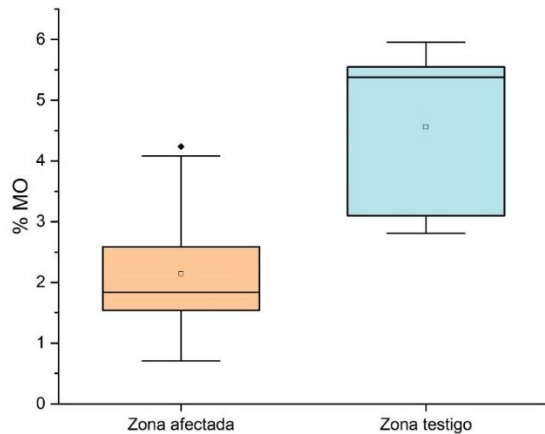


**Figura 8.** Imagen multiespectral con severidades y área afectada en Atltzayanca-Libres. Elaboración propia a partir de imagen satelital obtenida de la misión espacial Sentinel-2 del 27 de abril de 2025 y procesada en QGIS.



**Figura 9.** Imagen multiespectral con relieve topográfico de zona afectada Atltzayanca-Libres. Elaboración propia a partir de imagen satelital obtenida de la misión espacial Sentinel 2 del 27 de abril de 2025 y procesada en QGIS.

Para observar la variabilidad del porcentaje de MO en la zona afectada y zona testigo, se utilizó como referencia la desviación estándar del conjunto de muestras analizadas de cada zona que se observa en Figura 10, se visualiza que el porcentaje de MO fue notablemente menor en la zona afectada, la cual tiene rangos en el porcentaje de MO de 1.5-2.6% aproximadamente, mientras que la zona testigo se registraron valores en el porcentaje de MO de 3.2-5.6% aproximadamente. La disminución del porcentaje de MO en la zona afectada podría estar asociada a la exposición del suelo a altas temperaturas durante el incendio forestal. Estudios previos han señalado que temperaturas superiores a 300 °C provocan una degradación significativa de la materia orgánica del suelo, alterando su composición y reduciendo su contenido, como lo esquematizan Santín y Doerr [6].



**Figura 10.** Porcentaje de MO de zona afectada y testigo en zona afectada y testigo.

El ANOVA (Tabla 4) de un factor mostró diferencias estadísticamente significativas en el porcentaje de MO del suelo entre la zona testigo

y la zona afectada por el incendio ( $F= 13.80, p= 0.002$ ). La zona afectada presentó una menor concentración promedio de MO ( $2.4 \pm 1.11\%$ ) en comparación con la zona testigo ( $4.56 \pm 1.48\%$ ). Estos resultados sugieren una pérdida significativa de MO en el suelo como consecuencia del incendio forestal al hacer una comparación entre la zona no afectada y afectada.

**Tabla 4.** Promedios y desviación estándar del contenido de MO en el suelo para las zonas testigo y afectada por incendio. Análisis ANOVA de un factor con diferencias significativas ( $F = 13.80, p= 0.002$ ).

Zona	n	Media MO%	DE	DE (MO%)
Testigo	5	4.56	1.48	0.66
Afectada	12	2.4	1.11	0.32

n: número de muestras, DE: Desviación estándar, MO: Materia orgánica

## DISCUSIÓN

### Distribución espacial de la severidad del incendio Atltzayanca-Libres y pérdida de MO

Las imágenes satelitales  $\Delta NBR$  mostraron que el incendio ocurrido en la zona Atltzayanca-Libres presentó tres niveles de severidad: moderada-baja, moderada-alta y alta. La severidad moderada-alta y alta se concentraron en el centro de la afectación con altitudes entre los 2700 y los 3000 msnm, mientras que la severidad moderada-baja se concentró en las orillas del incendio. El nivel de severidad en un incendio esta influido por varios factores como

la topografía, el tipo de vegetación, el clima que predomina en la zona, entre otros factores. De acuerdo con Fang *et al.* [23], quienes en 2018 estudiaron la relación entre variables ambientales como la vegetación y topografía, en relación con la severidad del incendio, se reportó que las áreas con alta severidad se localizan principalmente en altitudes elevadas, con buen drenaje y, especialmente, en zonas con orientación al norte.

Por otro lado, se encontró que el área de estudio impactada por incendio forestal con severidad moderada-baja y moderada-alta, el porcentaje de MO tuvo niveles en un rango de 1.5-2.5% aproximadamente, que se consideran niveles de MO bajo y medio de acuerdo con la clasificación de fertilidad de la NOM-021-RECNAT-2000 [22]. Los contenidos de MO de la zona de estudio de control que no tuvo afectación dentro de la zona Atltzayanca-Libres, tuvieron porcentajes de MO en un rango de 3-5.5% aproximadamente. De acuerdo con Jílková *et al.* [24] en 2023, el contenido de MO de un sitio afectado por incendio forestal fue en promedio un 28% menor en comparación con el sitio sin afectación, lo cual, guarda similitud con los resultados obtenidos, donde el contenido de MO de la zona afecta fue un 53% menor en comparación con la zona testigo. Diversos estudios resaltan la pérdida de MO como una alteración común en el suelo cuando es afectado por el fuego [25, 26]. Sin embargo, la composición de la MO en el suelo después de una afectación por incendio, proporciona la base para la recuperación de un bosque [27].

### Implicaciones ecológicas

De acuerdo con la Figura 5, las principales vegetaciones afectadas fueron los ecosistemas de bosques de oyamel, pino, pino-encino, táscate y vegetación como matorrales, pastizales, vegetación de bosque de pino, pino-encino y matorral. La pérdida de estos ecosistemas en Atltzayanca-Libres por el incendio forestal se inclina a una degradación forestal a gran escala que afectó 2714.87 ha. Las distintas severidades del incendio registradas en la zona Atltzayanca-Libres sugieren alteraciones significativas en la composición y funcionalidad de los ecosistemas, afectando de manera directa al bosque, la vegetación, el suelo y las comunidades microbianas. Este impacto representa una pérdida crítica para la fertilidad del suelo y su capacidad para sostener procesos ecológicos clave, como la retención de agua, el reciclaje de nutrientes y la actividad microbiana [28]. Si bien, la mortalidad de los árboles reduce la caída de hojarasca que incrementa el contenido de MO, los árboles muertos producen una cantidad considerable de detritos leñosos, los cuales, normalmente no se muestrean como componentes del suelo forestal, sin embargo, estos restos pueden cubrir entre el 25-60% del suelo forestal tras los incendios, aunque no se sabe con precisión que parte de este material se incorpora como MO en el suelo [29]. Por otro lado, las cenizas producidas por incendios con alta severidad, son muy hidrofílicas, las cuales, al incorporarse al suelo por lixiviación, pueden retener agua [30]. Una de las implicaciones más relevantes es que la recuperación de las

propiedades del suelo forestal a condiciones similares a las existentes antes del incendio puede requerir hasta 100 años, de acuerdo con Jílková *et al.* [24] y Adámek *et al.* [31]. Así mismo, Nave *et al.* [29] en 2011, estimaron que las reservas de carbono y nitrógeno del suelo forestal en bosques templados quemados, volvían a sus niveles previos a la quema en 128 y 103 años, respectivamente. En microorganismos, Pulido *et al.* [9], indicaron que en parcelas afectadas por incendio la diversidad de hongos ectomicorrízicos y sapróbicos se redujo en un 43.4 y 12.2%, respectivamente, en comparación con zonas no afectadas.

### Gestión post-incendio en suelos

Considerando las condiciones particulares de afectación en la zona Atltzayanca–Libres, es fundamental implementar estrategias de restauración del suelo, así como acciones de alerta temprana ante desastres como incendios forestales. Herramientas como la teledetección y tecnología GIS permiten clasificar áreas de riesgo de incendio. Algunos criterios de riesgo de incendio son la pendiente y orientación de la zona, la altitud, drenaje, la proximidad a carreteras y poblaciones y la carga de combustible [32]. Estas estrategias no solo permiten mitigar los impactos inmediatos de los incendios forestales, sino también fortalecer la capacidad de respuesta y prevención a eventos futuros.

Las prácticas de gestión post-incendio pueden variar ampliamente, desde la recuperación

natural del ecosistema, hasta distintos niveles de intervención [33], en muchos casos, la intervención no es necesaria en las zonas afectadas, ya que los ecosistemas han desarrollado estrategias para responder a altas severidades de incendio y no intervenir en las zonas afectadas es la forma más adecuada de reducir la degradación del suelo [30]. Sin embargo, el manejo de la madera quemada puede influir en las condiciones microclimáticas y afectar gravemente las propiedades del suelo [34].

Una de las practicas más comunes, es la tala masiva de árboles muertos utilizando maquinaria pesada para la extracción de la madera muerta y restos leñosos [35]. Debido a esto, los impactos de las perturbaciones causadas por equipos de tala como las taladoras apiladoras, arrastradores y cargadores forestales pueden perdurar durante décadas, causando pérdida de macroporos, formación de surcos y aumentando la compactación del suelo [36]. Es por esto que se necesitan practicas diseñadas específicamente para tala en áreas quemadas y así reducir el impacto que tienen los equipos de tala convencionales.

### CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este estudio fueron las siguientes:

- Severidades de incendio moderada-baja y moderada-alta afectan considerablemente el contenido de MO al comparar una zona afectada y no afectada.
- Las imágenes satelitales Sentinel-2 y

el índice  $\Delta$ NBR permitieron identificar la severidad del incendio Atltzayanca-Libres, identificando tres tipos de severidades, de las cuales, la severidad moderada-baja y severidad moderada-alta se concentraron en la parte central de la afectación con altitud entre los 2700 y 3000 metros sobre el nivel del mar mientras que la severidad baja se concentró en los en la mayor parte de los exteriores, se identificó un área total de afectación de 2714.87 ha.

- Las áreas de vegetación que resultaron afectadas incluyen ecosistemas de pino, pino-encino, oyamel y pastizales.
- La relación entre severidades de incendio moderada-baja y moderada-alta y pérdida de MO refuerzan la importancia de monitoreo post-incendio en zonas forestales y agrícolas.

De acuerdo con las afectaciones observadas, se recomienda implementar programas de restauración ecológica y monitoreo continuo, como herramientas de teledetección y tecnología GIS.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no tienen ningún conflicto de intereses con el contenido de este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Impulso Agropecuario por las instalaciones y equipos prestados. A la brigada Frente Frío 12 de octubre y la fundación Raíces Unidas, a los ejidatarios del municipio

de Atltzayanca, así como a la Secretaría de Impulso Agropecuario del Gobierno del Estado de Tlaxcala.

## REFERENCIAS

- [1]. Jiménez-Morillo NT, Almendros G, De la Rosa JM, Jordán A, Zavala LM, Granged AJP, *et al*. Effect of a wildfire and of post-fire restoration actions in the organic matter structure in soil fractions. *Science of the Total Environment*. 2020; 1:728. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720322324>
- [2]. Agbeshie AA, Abugre S, Atta-Darkwa T, Awuah R. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*. 2022; 33: 1419–1441. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11676-022-01475-4>
- [3]. Dymov AA, Startsev VV, Milanovsky EY, Valdes-Korovkin IA, Farkhodov YR, Yudina A V, *et al*. Soils and soil organic matter transformations during the two years after a low-intensity surface fire (Subpolar Ural, Russia). *Geoderma*. 2021; 404: 115278. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001670612100358X>
- [4]. Chen H, Rhoades CC, Chow AT. Characteristics of soil organic matter 14 years after a wildfire: A pyrolysis-gas-chromatography mass spectrometry (Py-GC-MS) study. *J Anal Appl Pyrolysis*. 2020; 1:152. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/>

[abs/pii/S0165237020304228](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.03.028)

[5]. Barreiro A, Díaz-Raviña M. Fire impacts on soil microorganisms: Mass, activity, and diversity. *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 2021; 22: 100264. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584421000362>

[6.]. Santín C, Doerr SH. Fire effects on soils: The human dimension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Royal Society of London; 2016; 371(1696): 20150171. Disponible en: <https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/371/1696/20150171/22899/Fire-effects-on-soils-the-human-dimension>

[7]. Saccá ML, Barra Caracciolo A, Di Lenola M, Grenni P. Ecosystem Services Provided By Soil Microorganisms. In: *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience*. Springer International Publishing; 2017: 9–24. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-63336-7\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-63336-7_2)

[8]. da Silva LJ, Dick DP, Neckel D, Nóbrega GN, Rodrigues R de AR, Barbosa RI, *et al*. Effects of fire on soil organic matter in northern Amazonian forest fragments. *Acta Amazon*. 2022;52(1):13–22. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/aa/a/z6dzN6HWy3FDfn4Cv7Cfbzy/?format=html&lang=en>

[9]. Pulido-Chavez MF, Alvarado EC, DeLuca TH, Edmonds RL, Glassman SI. High-severity wildfire reduces richness and alters composition of ectomycorrhizal fungi in low-

severity adapted ponderosa pine forests. *For Ecol Manage*. 2021;1:485. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721000128>

[10]. Merino A, García-Oliva F, Fontúrbel MT, Vega JA. The high content of mineral-free organic matter in soils increases their vulnerability to wildfire in humid-temperate zones. *Geoderma*. 2021; 395: 115043. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706121001178>

[11]. Roscoe R, Buurman P, Velthorst EJ, Pereira JAA. Effects of fire on soil organic matter in a “cerrado sensu-stricto” from Southeast Brazil as revealed by changes in  $\delta^{13}C$ . *Geoderma* 2000; 95:141–60. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706199000890>

[12]. Korontzi S, McCarty J, Loboda T, Kumar S, Justice C. Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Global Biogeochem Cycles*. 2006; 20(2): GB2021. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GB002529>

[13]. Causas de los incendios forestales. Disponible en: [http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_RFORESTA05\\_04&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RFORESTA05_04&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREANIO=*)

[14]. Silva SP, Bontemps LC, Trejo DAR.



Spatial analysis of fire interaction in the rural interface of La Malinche National Park, Mexico. *Investigaciones Geograficas*. 2025;116. Disponible en:

[https://classic.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0188-46112025000100103&lng=en&nrm=iso](https://classic.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46112025000100103&lng=en&nrm=iso)

[15]. Ayuntamiento de Atltzayanca. Medio físico del municipio de Atltzayanca. <https://atltzayanca.gob.mx/tu-municipio/medio-fisico>

[16]. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) 2025. Geoportal de Información 2025 Edafología. [https://conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis\\_root/edafo/tsuelo/eda251mgw](https://conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/edafo/tsuelo/eda251mgw)

[17]. Arellano S, Vega JA, Rodríguez y Silva F, Fernández C, Vega-Nieva D, Álvarez-González JG, *et al*. Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013. *Revista de Teledeteccion*. 2017;49:49–61. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6226391>

[18]. Issa M, Abboud M. Forest Fire Disaster Risk Analysis using Sentinel 2 and Landsat Images Case Study: Al-Qoubaiyat and Tyre regions, Lebanon. *Turkish Journal of Geosciences*. 2022;3(2):84–94. Disponible en: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2661407>

[19]. Keeley JE. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *Int J Wildland Fire*. 2009;18(1):116–26.

Disponible en:

<https://www.usgs.gov/publications/fire-intensity-fire-severity-and-burn-severity-a-brief-review-and-suggested-usage>

[20]. Flores-Rodríguez AG, Flores-Garnica JG, González-Eguiarte DR, Gallegos-Rodríguez A, Zarazúa-Villaseñor P, Mena-Munguía S. Revisión de métodos de sensores remotos para la detección y evaluación de la severidad de incendios forestales. *Gestión y Ambiente*. 2020;23(2):273–83. Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/2593122221?pq-origsite=primo&searchKeywords=trabajos+remotos+en+espa%C3%B1ol+usa&sourcetype=Scholarly%20Journals>

[21]. Lutes DC, Keane RE. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Forest Service - Rocky Mountain Research Station US. 2006. Disponible en: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/24042>

[22]. NOM-021-RECNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2000. Disponible en: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280.pdf>

[23]. Fang L, Yang J, White M, Liu Z. Predicting potential fire severity using vegetation, topography and surface moisture availability in a Eurasian boreal forest landscape. *Forests*. 2018; 9(3): 130. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/3/130>

[24]. Jílková V, Adámek M, Angst G, Tůmová

M, Devetter M. Post-fire forest floor succession in a Central European temperate forest depends on organic matter input from recovering vegetation rather than on pyrogenic carbon input from fire. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=4186671>

[25]. Badía D, Martí C, Aguirre AJ, Aznar JM, González-Pérez JA, De la Rosa JM, *et al*. Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE Spain: Changes at cm-scale topsoil. *Catena* (Amst). 2014;113:267–75. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816213001926?via%3Dihub>

[26]. Dicen GP, Rallos RV, Labides JLR, Navarrete IA. Vulnerability of soil organic matter to microbial decomposition as a consequence of burning. *Biogeochemistry*. 2020;150(2):123–37. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10533-020-00688-1>

[27]. Roth HK, McKenna AM, Simpson MJ, Chen H, Srikanthan N, Feghel TS, *et al*. Effects of burn severity on organic nitrogen and carbon chemistry in high-elevation forest soils. *Soil and Environmental Health*. 2023;1(3): 100023. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949919423000237>

[28]. Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia*. 2005; 143: 1–10. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-004-1788-8>

[29]. Nave LE, Vance ED, Swanston CW,

Curtis PS. Fire effects on temperate forest soil C and N storage. *Ecological Applications*. 2011; 21: 1189-1201. Disponible en: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1890/10-0660.1>

[30]. Pereira P, Francos M, Brevik EC, Ubeda X, Bogunovic I. Post-fire soil management. *Current Opinion in Environmental Science and Health*. 2018; 5: 26–32. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468584418300217>

[31]. Adámek M, Hadincová V, Wild J. Long-term effect of wildfires on temperate *Pinus sylvestris* forests: Vegetation dynamics and ecosystem resilience. *For Ecol Manage*. 2016;380:285–95. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112716304881>

[32]. Elakiya N., Keerthana G., Safiya S. Effects of Forest Fire on Soil Properties. *Int J Plant Soil Sci*. 2023;35(20):8–17. Disponible en: <https://journalijpss.com/index.php/IJPSS/article/view/3780>

[33]. Marcolin E, Marzano R, Vitali A, Garbarino M, Lingua E. Post-fire management impact on natural forest regeneration through altered microsite conditions. *Forests*. 2019; 10(11): 1014. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/11/1014>

[34]. Marañón-Jiménez S, Castro J, Kowalski AS, Serrano-Ortiz P, Reverter BR, Sánchez-Cañete EP, *et al*. Post-fire soil respiration in relation to burnt wood management in a Mediterranean mountain ecosystem. *For Ecol*

Management. 2011; 261(8): 1436–47.  
Disponibile en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112711000624>

[35]. Juan-Ovejero R, Molinas-González CR, Leverkus AB, Martín Peinado FJ, Castro J. Decadal effect of post-fire management treatments on soil carbon and nutrient concentrations in a burnt Mediterranean forest.

For Ecol Manage. 2021; 498: 119570.  
Disponibile en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112721006605>

[36]. Wagenbrenner JW, Robichaud PR, Brown RE. Rill erosion in burned and salvage logged western montane forests: Effects of logging equipment type, traffic level, and slash treatment. J Hydrol (Amst). 2016;541:889–901.  
Disponibile en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169416304796>