



DOI: [10.29298/rmcf.v17i97.1638](https://doi.org/10.29298/rmcf.v17i97.1638)

Artículo de investigación

Alteraciones físicas y químicas del suelo por incendios forestales en Bosques de San Miguel del Carrizal, Sinaloa

Physical and chemical soil alterations from wildfires in forests of *San Miguel del Carrizal, State of Sinaloa*

Erik Orlando Luna Robles¹, Ixchel Abby Ortiz Sánchez², José Guadalupe Colín¹, Silvia Janeth Bejar Pulido^{1*}

Fecha de recepción/Reception date: 10 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 29 de junio de 2026.

¹Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto. México.

²Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: siljan2411@gmail.com

*Corresponding author; e-mail: siljan2411@gmail.com

Resumen

Los incendios forestales son cada vez más frecuentes, alteran las propiedades físicas y químicas del suelo, afectando su productividad y salud. Por ello, en este estudio se evaluaron y compararon dichas propiedades en suelos afectados y no afectados por incendios forestales en El Carrizal, Sinaloa. Se consideraron dos áreas, una incendiada y otra testigo (sin incendio); en cada una se recolectaron muestras compuestas de suelo, para determinar las propiedades físicas (densidad aparente e hidrofobicidad) y químicas (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, carbono y el reservorio de carbono), a dos profundidades: 0-15 y 15-30 cm. Los resultados indicaron que la parte superficial del área incendiada presentó cambios más significativos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo; además de una repelencia al agua catalogada como fuerte y ligera para la segunda profundidad; mientras que en el área testigo fue nula. En particular la densidad aparente y porosidad del suelo disminuyeron e incrementaron, respectivamente en la zona incendiada, en comparación con la testigo. El pH y conductividad eléctrica aumentaron, lo que se atribuyó a la presencia de residuos derivados del incendio. El reservorio de carbono orgánico del suelo fue superior en el área de incendio coincidiendo con múltiples estudios que señalan que después de tres meses esta variable se incrementa significativamente. Las modificaciones sobre las propiedades del suelo fueron muy contrastantes, observándose en algunos casos aumentos y en otras disminuciones.

Palabras clave: dinámica, fuego, hidrofobicidad, reservorio de carbono, residuos, salud.

Abstract

Forest fires are becoming increasingly frequent; they alter the physical and chemical properties of the soil, affecting its productivity and health. Therefore, this study evaluated and compared these properties in soils affected and unaffected by wildfires in *El Carrizal, Sinaloa*. Two areas were considered: one that had been burned and one control area (unburned). In each area, composite soil samples were collected to determine physical properties (bulk density and hydrophobicity) and chemical properties (pH, electrical conductivity, organic matter, carbon, and carbon pool) at two depths: 0-15 and 15-30 cm. The results indicated that the surface layer of the burned area showed more significant changes in the soil's physical and chemical properties; in addition, water repellency was classified as strong and slight for the second depth, whereas in the control area, it was nonexistent. In particular, soil bulk density and porosity decreased and increased, respectively, in the burned area compared to the control area. The pH and electrical conductivity increased, an effect attributed to the presence of fire residues. The soil organic carbon pool was higher in the burned area, consistent with numerous studies indicating that this variable increases significantly after three months. Changes in soil properties varied widely, with increases observed in some cases and decreases in others.

Keywords: dynamics, fire, hydrophobicity, carbon pool, waste, health.

Introducción

Los bosques proveen de múltiples servicios ecosistémicos indispensables para la vida en general; dichos servicios están en función de los recursos suelo, agua y biodiversidad, por lo que un desbalance en uno de ellos provoca una reacción inmediata sobre la funcionalidad y armonía del ecosistema, del cual el ser humano forma parte (Luna-Robles et al., 2022).

Los bosques cubren una extensión global que supera los cuatro millones de hectáreas que equivalen a una tercera parte de la superficie terrestre; lo cual ofrece un panorama acerca de la importancia de estos ecosistemas (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [ONUAA], 2020).

En México, los bosques se distribuyen en 70.6 % del territorio (138.7 millones de hectáreas) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2020); donde 48.1 % de la superficie corresponde a bosques templados y selvas (66.7

millones de hectáreas). En este sentido, los suelos de los bosques tienen un papel primordial a través de los servicios ecosistémicos que proveen, tales como la regulación de las funciones del ciclo del agua, ya que actúan como reguladores, limpiadores y proveedores del recurso hídrico (Rodríguez-Reta *et al.*, 2024); desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático, debido a que tienen la capacidad de almacenar carbono entre 3 y 4.5 más veces que la biosfera (Luna-Robles *et al.*, 2024a).

Los incendios forestales causan impactos significativos en el suelo, especialmente en sus propiedades físicas y químicas; modifican el pH, aumentan la conductividad eléctrica y la densidad aparente; la porosidad se reduce considerablemente por la presencia de residuos (cenizas y restos carbonizados), además de generar hidrofobicidad, lo que reduce la capacidad de infiltración y aumenta el riesgo de erosión. Asimismo, provocan alteraciones en las concentraciones y reservorios de carbono orgánico del suelo (COS) (Alfaro-Leranoz *et al.*, 2024; Gonzáles *et al.*, 2024; Luna-Robles *et al.*, 2024b).

En México, la ocurrencia de incendios forestales y superficies afectadas se han incrementado significativamente durante los últimos cinco años, como resultado de factores antropogénicos, así como cambios en los regímenes de sequía y precipitación (Luna-Robles *et al.*, 2024b). En este sentido, la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2026) registró para el año 2025 un total de 6 996 incendios y una superficie afectada de 1 208 376 ha; el estado de Sinaloa se posicionó en el 4to lugar de las entidades con mayor superficie afectada (106 815 ha), solo por debajo de Chihuahua (215 462 ha), Guerrero (108 974 ha) y Durango (107 472 ha). Cabe señalar que las posibles causas, en la mayoría, fueron clasificadas como intencionales.

Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar las propiedades físicas y químicas en suelos afectados por incendios forestales en la localidad de El Carrizal, perteneciente al estado de Sinaloa. La selección de esta área es importante, porque representa un área forestal susceptible a perturbaciones que pueden alterar la calidad del suelo y la dinámica del ecosistema; los cuales constituyen un componente fundamental para el suministro de servicios ecosistémicos en la región sur de Sinaloa.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se ubica en bosques de la localidad de San Miguel del Carrizal, municipio Concordia, Sinaloa; ubicado en la Sierra Madre Occidental, a una altitud promedio de 1 990 m, entre las coordenadas 23°35'21" N y 105°49'11" O (Figura 1). La vegetación está dominada por las especies *Pinus herrerae* Martínez y *Pinus douglasiana* Martínez (González-Elizondo et al., 2012). El relieve del área está conformado por una meseta y pendientes ligeramente pronunciadas; el clima es cálido subhúmedo/seco con alta evaporación, precipitaciones concentradas en verano, con un promedio de 600-790 mm anuales (García, 2004). El suelo dominante es el Leptosol, caracterizado por ser un suelo somero y pedregoso, con baja retención de humedad, presente en zonas montañosas y relieves accidentados (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2017).

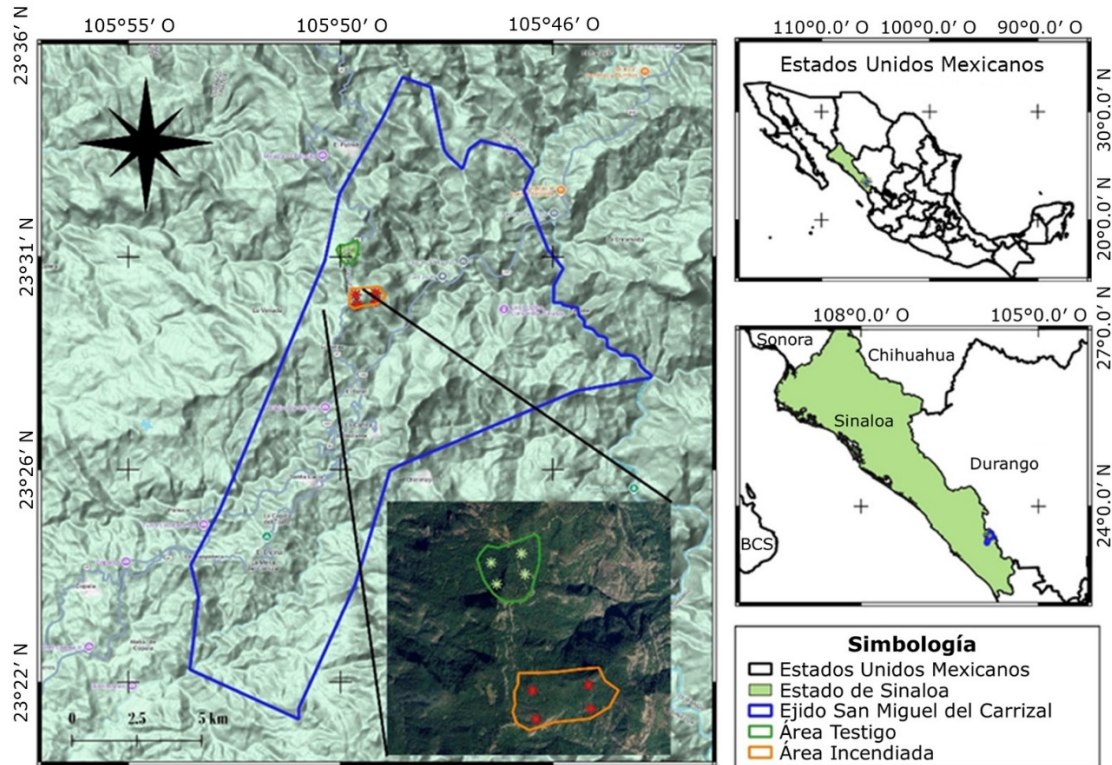


Figura 1. Localización del área de estudio, ejido San Miguel del Carrizal, municipio Concordia, Sinaloa, México.

Diseño experimental

La evaluación se realizó en dos áreas de bosque, una de ellas fue afectada por un incendio forestal durante 13 días entre los meses de mayo a junio de 2025; la superficie afectada fue de 91 ha, dicho incendio se clasificó como de alta severidad debido a que los efectos del fuego ocasionaron una mortalidad alta en la densidad arbórea (>60 % de afectación), con impacto significativo en el suelo y vegetación remanente (Lydersen et al., 2016). Específicamente, se consumió gran parte del material vegetal, lo que causa erosión ligera y pérdida de materia orgánica (Clemente-Quezada et al., 2025). Debido a la orografía del sitio, el fuego se extendió

por las copas de los árboles afectando de manera significativa a todos los componentes del ecosistema (fustes, copas, cobertura del suelo).

Dicha área se comparó con una contigua que no fue afectada por el incendio forestal (testigo), con una superficie de 57 ha, en la cual se midió el espesor de la capa de hojarasca y humus que fueron de 20 y 8 cm, respectivamente; es importante destacar que la zona incendiada no presentaba dichas capas.

Muestreo y análisis de suelo

El muestreo se realizó en bloques al azar, tres meses después de ocurrido el incendio forestal (Muñoz-Rojas et al., 2016), se consideró que las alteraciones sobre las propiedades físicas y químicas del suelo suelen conservarse hasta los seis meses posteriores a la ocurrencia del incendio (Agbeshie et al., 2022), ya que después tiende a presentarse una recuperación gradual tras la revegetación y presencia de precipitaciones; no obstante, la estructura del suelo puede tardar más tiempo en estabilizarse (Vega-Martínez et al., 2023). Con base en lo anterior, en cada área se llevaron a cabo mediciones *in situ* y *ex situ* considerando la naturaleza de la variable por evaluar, las cuales se describen a continuación.

Para la obtención de las muestras de suelo se establecieron cuatro parcelas de 100×100 m en cada una de las áreas evaluadas con nula o baja pendiente; se recolectaron ocho muestras compuestas de 1 kg (mezcla de cuatro submuestras individuales) a dos profundidades (cuatro de 0-15 cm y cuatro de 15-30 cm), para un total de 16 muestras; las cuales se secaron a temperatura ambiente y pasaron por un tamiz de 2 mm. Posteriormente, se trasladaron al laboratorio de suelos del Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana para su análisis.

Variables químicas del suelo

En el Cuadro 1 se muestran las propiedades químicas evaluadas, el método de determinación y la unidad de medición utilizadas.

Cuadro 1. Métodos de evaluación de las propiedades químicas del suelo.

Variable	Método de determinación	Unidad
<i>pH</i>	AS-23 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002)	Escala: 0 a 14
<i>CE</i>	Determinación rápida en suspensión suelo-agua 1:5. AS-18 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002)	$\mu\text{S cm}^{-1}$
<i>MOS</i>	Walkley y Black modificado. AS-07 de la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002)	%
<i>C</i>	Factor de corrección 0.58 (Nelson & Sommers, 1982)	%

CE = Conductividad eléctrica; *MOS* = Materia orgánica del suelo; *C* = Contenido de carbono orgánico de la muestra de suelo.

El reservorio de carbono orgánico del suelo se determinó a partir de la ecuación señalada por Cantú-Silva y Bejar-Pulido (2024), la cual se expresa a continuación:

$$COS = DA \times C\% \times RP \quad (1)$$

Donde:

COS = Carbono orgánico del suelo expresado en Mg ha^{-1}

DA = Densidad aparente del suelo expresado en g cm^{-3}

C% = Contenido en porcentaje de carbono orgánico de la muestra de suelo

RP = Rango de profundidad analizada expresada en cm

Variables físicas

Densidad aparente y porosidad total del suelo. Las muestras de suelo para densidad aparente se secaron en una estufa de aire forzado (*Yamato Scientific America Inc.*®, modelo DNE910) de 24 a 48 horas a 105 °C; se pesaron con una balanza analítica de precisión (*Sartorius*®, modelo CP2202S, Alemania); una vez determinado el peso de las muestras se calculó la densidad aparente con la Ecuación 2 (Yáñez-Díaz et al., 2019):

$$DA = \frac{P}{VC} \quad (2)$$

Donde:

DA = Densidad aparente (g cm^{-3})

P = Peso seco de la muestra con el cilindro (g)

VC = Volumen del cilindro (cm^3)

La porosidad total del suelo se estimó a partir de los valores calculados de densidad aparente, asumiendo un valor promedio de la densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} (Yáñez-Díaz et al., 2019), la ecuación se anota a continuación:

$$P = \left[1 - \left(\frac{DA}{DP} \right) \right] \times 100 \quad (3)$$

Donde:

P = Porosidad expresada en porcentaje

DA = Densidad aparente del suelo en g cm^{-3}

DP = Densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3}

Hidrofobicidad. Se empleó el método *Water Drop Penetration Time (WDPT)* (Veneris & Farid, 2024), el cual consiste en la aplicación de gotas de agua sobre una superficie plana del terreno y se cuantifica el tiempo de penetración. Para ello se establecieron parcelas de 0.50×0.50 m en cada área; las cuales se limpiaron cuidadosamente, con el fin de dejar el suelo mineral desnudo. Posteriormente, sobre la superficie del suelo se colocaron 20 gotas de agua destilada de manera aleatoria y registraron los tiempos de penetración. El procedimiento se repitió a 2 cm de profundidad, ya que que la respuesta hidrofóbica suele disminuir de manera significativa en los siguientes centímetros (Dekker & Jungerius, 1990; García-Ledezma *et al.*, 2025).

Los registros promedios de tiempo por área y profundidad se utilizaron para catalogar el nivel de repelencia con base en la valoración que se indica en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de la repelencia al agua.

Grado de persistencia	Rango de valoración en segundos	Nivel de repelencia al agua
0	<5	Nulo
1	5-60	Ligero
2	60-600	Fuerte
3	600-3 600	Severo
4	>3 600	Extremadamente severo

Fuente: Dekker y Jungerius (1990).

Análisis estadísticos

Todas las variables (*MOS*, *C*, *pH*, *CE*, *DA*, *P* y *COS*) se sometieron a pruebas de normalidad (*Shapiro-Wilk*) y homogeneidad de varianzas (*Levene*), se realizaron las transformaciones necesarias (arco tangente [$\tan^{-1}(x)$] y exponencial [e^x] en *DA* y *P*,

respectivamente), a excepción de hidrofobicidad. Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza de dos factores para evaluar la varianza significativa en la respuesta del suelo al incendio por área y profundidad evaluada. Los análisis se hicieron con un nivel de confianza de 95 %. Para hidrofobicidad, se efectuó una prueba *U* de *Mann-Whitney* para cada factor (área y profundidad). Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico *SPSS* versión 22.0 (International Business Machines [IBM], 2025).

Resultados

En el Cuadro 3 se presentan los análisis de normalidad y homogeneidad de cada varianza, cumpliendo con los supuestos.

Cuadro 3. Pruebas de normalidad (*Shapiro-Wilk*) y homogeneidad de varianzas (*Levene*) para las variables físicas y químicas del suelo.

Variable	<i>Shapiro-Wilk</i>		<i>Levene</i>	
	<i>W</i>	Sig.	<i>F</i>	Sig.
<i>MOS</i> (%)	0.838	0.058	4.533	0.064
<i>C</i> (%)	0.838	0.058	4.532	0.064
<i>pH</i>	0.891	0.059	3.905	0.057
<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	0.752	0.071	1.037	0.411
<i>DA</i> (g cm^{-3})	0.905	0.096	0.964	0.441
<i>P</i> (%)	0.898	0.075	0.935	0.454
<i>COS</i> (Mg ha^{-1})	0.885	0.056	0.778	0.528
Hidrofobicidad (S^{-1})	0.614	0.001	387.339	0.001

MOS = Materia orgánica del suelo; *C* = Contenido de carbono; *CE* = Conductividad eléctrica; *DA* = Densidad aparente; *P* = Porosidad; *COS* = Carbono orgánico del suelo. *W* = Estadístico de prueba; *F* = Valor de *F*; Sig. = Significancia.

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza, todas las variables presentaron diferencias significativas entre áreas y profundidad ($p < 0.05$), a excepción del pH, mientras que el efecto de los dos factores fue significativo solo en las variables de pH, *CE* y reservorio de carbono ($p < 0.05$) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de varianza de dos vías para las variables físicas y químicas del suelo.

Factor	Variable	SC	gl	CME	F	Sig.
Area	<i>MOS</i> (%)	11.54	1	11.54	11.73	0.005
	<i>C</i> (%)	3.88	1	3.88	11.73	0.005
	<i>pH</i>	1.46	1	1.46	25.51	0.000
	<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	720 376.56	1	720 376.56	3 278.47	0.000
	<i>DA</i> (g cm^{-3})	0.21	1	0.21	15.85	0.002
	<i>P</i> (%)	1.40	1	1.40	16.29	0.002
	<i>COS</i> (Mg ha^{-1})	8 427.16	1	8 427.16	38.72	0.000
Profundidad	<i>MOS</i> (%)	23.11	1	23.11	23.48	0.000
	<i>C</i> (%)	7.78	1	7.78	23.53	0.000
	<i>pH</i>	0.01	1	0.01	0.09	0.767
	<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	10 353.06	1	10 353.06	47.12	0.000
	<i>DA</i> (g cm^{-3})	0.19	1	0.19	14.23	0.003
	<i>P</i> (%)	1.25	1	1.25	14.58	0.002
	<i>COS</i> (Mg ha^{-1})	10 626.24	1	10 626.24	48.83	0.000

MOS = Materia orgánica del suelo; *C* = Contenido de carbono; *CE* = Conductividad eléctrica; *DA* = Densidad aparente; *P* = Porosidad; *COS* = Carbono orgánico del suelo. *SC* = Suma de cuadrados; *gl* = Grados de libertad; *CME* = Cuadrado medio del error; *F* = Valor de *F*; Sig. = Significancia.

MOS (%) y C (%)

De acuerdo con la Figura 2, los contenidos de *MOS (%)* y *C (%)* fueron mayores en la capa superficial en ambas áreas evaluadas; no obstante, en la profundidad de 0-15 cm del área incendiada se registraron los mayores contenidos de *MOS* (15.94 ± 1.84 %) y *C* (9.25 ± 1.07 %). Por otra parte, la *MOS* en el área testigo fue en promedio de 12.6 % y el *C (%)* de 7.3 %.

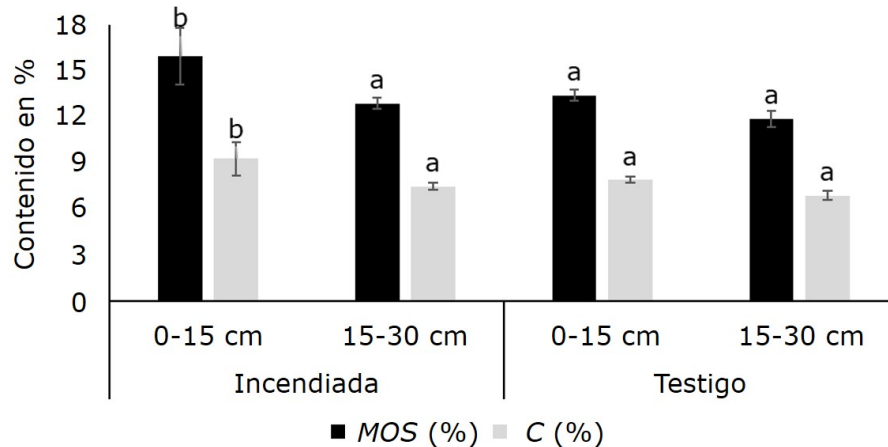


Figura 2. Contenidos (%) de *MOS* y *C* de las áreas evaluadas.

pH y conductividad eléctrica (*CE*)

En el Cuadro 5 se presentan los estadísticos descriptivos del pH y *CE*. El área incendiada presentó los valores más altos de pH en ambas profundidades, en cambio el pH para el área testigo fue de 6.92 y 7.15 en la primera y segunda profundidad, respectivamente. En ambos casos las desviaciones estándar fueron bajas, lo que

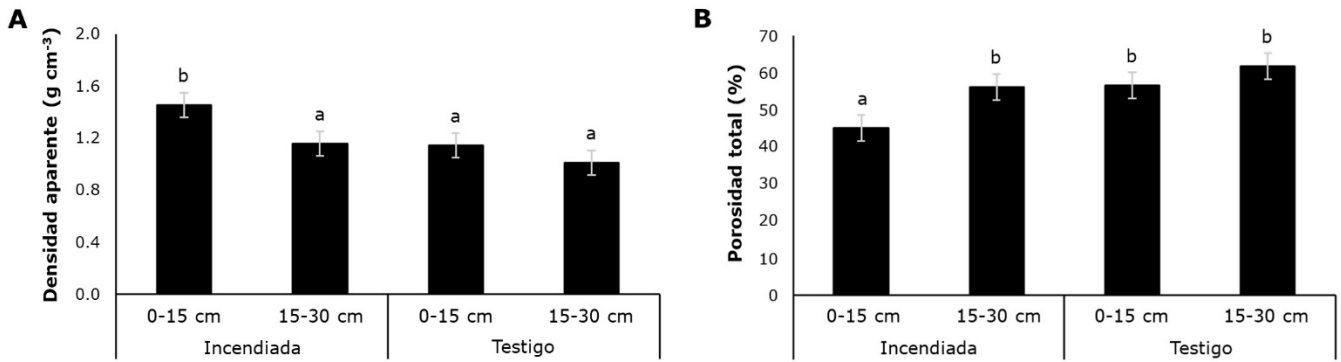
indica poca dispersión de los datos. En cuanto a la *CE*, el área incendiada registró cambios más notorios respecto al testigo, en ambas profundidades las desviaciones estándar oscilaron de 8.27 a 23.38 ($\mu\text{S cm}^{-1}$).

Cuadro 5. Estadísticos descriptivos, valores medios $\pm$ desviación estándar del *pH* y *CE* de las áreas evaluadas.

Áreas	Profundidad	<i>pH</i>	<i>CE</i> ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
Incendiada	0-15 cm	7.79 $\pm$ 0.34a	656.50 $\pm$ 10.63d
	15-30 cm	7.48 $\pm$ 0.33a	626.50 $\pm$ 8.27c
Testigo	0-15 cm	6.92 $\pm$ 0.17a	253.00 $\pm$ 23.38b
	15-30 cm	7.15 $\pm$ 0.05a	181.25 $\pm$ 12.28a

Densidad aparente y porosidad total del suelo

En la Figura 3 se muestran los valores para la *DA* y *P* del suelo. En particular, el área incendiada tuvo un valor de *DA* de 1.45 g cm⁻³ de 0 a 15 cm; mientras que el testigo registró una *DA* inferior a 20 % de la incendiada. Para la profundidad de 15-30 cm la *DA* disminuyó significativamente en ambas áreas ($p<0.05$) (incendiada: 1.16 g cm⁻³ y testigo: 1.02 g cm⁻³). Por otra parte, el valor de la *P* media de la primera profundidad del suelo del área incendiada fue de 45 % y de 56 % en la testigo. De 15-30 cm, la *P* media fue de 56 % para el área incendiada y 61 % para el área testigo.



A = Densidad aparente; B = Porosidad total.

Figura 3. Valores medios de densidad aparente y porosidad total por profundidad de cada área evaluada.

Hidrofobicidad

Los resultados de la prueba de penetración del agua de las dos áreas y para ambas profundidades se muestran en la Cuadro 6. De acuerdo con la prueba *U* de *Mann-Whitney* presentaron diferencias significativas entre áreas ($W=36$, $p=0.001$). Entre profundidades para el área incendiada se observaron diferencias significativas ($W=10$, $p=0.029$); caso contrario para el área testigo ($W=13$, $p=0.200$). Al considerar la valoración sugerida por Dekker y Jungerius (1990), la parte superficial del área incendiada tuvo el daño más evidente y significativo, respecto a la siguiente profundidad y al área testigo. A los 2 cm en el área incendiada, el grado de persistencia se categorizó como de nivel ligero; mientras que en las dos profundidades del área testigo fue 0, lo cual significa que carecen de hidrofobicidad.

Cuadro 6. Categorización de la hidrofobicidad por área y profundidades.

Áreas	Profundidad	Penetración en s ⁻¹	GP	Nivel
Incendiada	1 cm	68.97	2	Fuerte
	2 cm	6.02	1	Ligero
	Promedio	36.86	1	Ligero
Testigo	1 cm	2.42	0	Nulo
	2 cm	1.89	0	Nulo
	Promedio	2.05	0	Nulo

s⁻¹ = Tiempo de penetración del agua en el suelo; GP = Grado de persistencia de la repelencia.

Reservorio de COS (Mg ha⁻¹)

La reserva de carbono orgánico en el suelo para la profundidad 0-15 cm en el área incendiada presentó un incremento de 67 %, respecto al testigo; en la siguiente profundidad la reserva de COS disminuyó, y fueron estadísticamente similares en ambas áreas evaluadas (Cuadro 7). Al considerar las dos profundidades del perfil de 0 hasta 30 cm, la reserva de COS presentó el siguiente orden descendente: incendiada (331.3 Mg ha⁻¹)>testigo (239.5 Mg ha⁻¹).

Cuadro 7. Reservorio de COS por profundidad de cada área evaluada.

Áreas	Profundidad	COS (Mg ha ⁻¹)
Incendiada	0-15 cm	201.66±20.44b
	15-30 cm	129.63±14.69a
Testigo	0-15 cm	135.27±12.53a
	15-30 cm	104.22±8.93a

Discusión

Los resultados muestran que las propiedades físicas y químicas de un Leptosol se modifican a corto plazo tras la ocurrencia de un incendio forestal. Lo anterior coincide con Mongil-Manso et al. (2024) quienes definen a estas variables como sensibles y de respuesta inmediata a la presencia de incendios, conduciendo a la degradación del suelo. Para *MOS* y *C* se observó que el fuego incrementó significativamente la materia orgánica y el carbono, que concuerda con lo registrado por González-Pérez et al. (2004) y Luna-Robles et al. (2024b), quienes vinculan esa tendencia a la intensidad del incendio (alta) y al grupo de suelo. No obstante, la variabilidad de estas propiedades sugiere transformaciones en la estabilidad química de la fracción orgánica (Pellegrini et al., 2022). Minervini et al. (2018) indican que el fuego apresura la partición y destrucción de la materia orgánica, y ello repercute de manera directa en los contenidos de carbono orgánico del suelo. Asimismo, el aumento (26.5 % *MOS*, 26.7 % *C*), respecto al área no incendiada podría también atribuirse al arrastre de partículas por lluvias (García-Ledezma et al., 2025); por lo anterior, los resultados parecen condicionados por la temporalidad del muestreo, el cual se llevó a cabo al inicio del periodo pluvial.

pH y *CE*

García-Ledezma et al. (2025) y Sousa-Lima et al. (2025) señalan que los incendios impactan directamente en los valores de pH y *CE*. Estos tienden a incrementarse en comparación con áreas no afectadas por el fuego. Lo anterior puede deberse a la eliminación de los ácidos orgánicos del suelo y a la acumulación de cenizas ricas en

calcio, magnesio y potasio (Pellegrini et al., 2022; Santana et al., 2018). Por otra parte, Bielińska et al. (2008) señalan que la materia orgánica pirolizada influye en la dinámica del pH. El cambio del pH tras un incendio también depende de la naturaleza del suelo (textura, mineralogía y contenido previo de materia orgánica) (Bárcenas-Moreno et al., 2022). Según la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), el pH del área quemada fue moderadamente alcalino en ambas profundidades. En cambio, el área testigo presentó un pH neutro.

Respecto a la *CE*, hubo un incremento significativo en el área incendiada. Sin embargo, se valoró con niveles despreciables de salinidad (Semarnat, 2002). Esto permite que las plantas asimilen nutrientes sin estrés osmótico, ni toxicidad.

DA y porosidad

Las propiedades físicas del suelo tales como la densidad aparente, porosidad e hidrofobicidad suelen considerarse como las más sensibles y que se afectan de manera inmediata por los incendios forestales. Los primeros centímetros presentan los mayores impactos, e incluso algunas como la hidrofobicidad pueden llegar a tener afectaciones a largo plazo con efectos negativos en el ecosistema (Luna-Robles et al., 2025).

En los primeros 15 cm del área incendiada, los valores de densidad aparente se incrementaron en 20 %; se redujo su espacio poroso y aumentó la resistencia a la repelencia del agua, lo anterior puede atribuirse a que el fuego provocó la combustión de la vegetación y la materia orgánica del suelo, cuyas cenizas y fracciones carbonizadas ocuparon los macro y microporos del suelo (Roshan & Biswas, 2023).

Los resultados en el área testigo presentan una baja densidad aparente, alta porosidad y nula hidrofobicidad que coincide con lo citado por Or et al. (2021), quienes señalan que la ausencia de perturbaciones físicas favorece el desarrollo de la

estructura del suelo. Dicha estabilidad se observa en ambas profundidades analizadas, evidenciando una resiliencia intrínseca del sistema en condiciones exentas de estrés térmico. Asimismo, Rodríguez-Reta et al. (2024) indican que la cobertura vegetal y la biomasa favorecen la estructura del suelo y la mineralización.

Hidrofobicidad

La parte superficial del área incendiada presentó una repelencia al agua muy fuerte (60 a 600 segundos), lo cual puede responder a que en esta zona la acumulación y redistribución de compuestos hidrófobos derivados del incendio (terpenos, lípidos, ceras, ácidos grasos, etc.) es más alta que en otras partes del perfil edáfico (Jiménez-Morillo et al., 2022).

COS

El aumento significativo del COS tras el incendio sugiere cambios profundos en los ciclos biogeoquímicos. Cheng et al. (2023) documentan que los incendios pueden incrementar los depósitos de carbono edáfico mediante la incorporación de biomasa carbonizada y carbono pirogénico (PyC), el cual es resistente a la degradación (Hudiburg et al., 2023). Sin embargo, Pellegrini et al. (2022) advierten que la intensidad y recurrencia del fuego son determinantes, ya que incendios severos agotan el nitrógeno y limitan la futura entrada de materia orgánica.

La variabilidad de los resultados coincide con Ribeiro-de Faria et al. (2026), pues factores como la humedad y el tipo de vegetación determinan si el carbono se gana por cenizas o se pierde por combustión. Así, el aumento de *COS* sugiere que el suelo actúa como un sumidero resiliente, si las condiciones permiten estabilizar la materia orgánica restante.

Conclusiones

Tres meses después de la ocurrencia del incendio forestal el Leptosol presenta modificaciones significativas en sus variables físicas y químicas, las cuales son muy contrastantes, con aumentos y disminuciones.

Los resultados demuestran que la ocurrencia de incendios puede afectar los procesos hidrológicos del ecosistema, dado que el fuego provoca aumentos en la densidad aparente, reducción de la porosidad y condiciones de hidrofobicidad, como resultado disminuye la infiltración de agua en el suelo.

Asimismo, el aumento significativo en el pH y en la conductividad eléctrica (*CE*) puede atribuirse a la acumulación de cenizas en los primeros centímetros del suelo, resultado de la combustión o incineración de la materia orgánica.

En general, los resultados evidencian que el Leptosol evaluado posee una gran capacidad de secuestro de carbono, lo que resalta su importancia en la mitigación del cambio climático, debido a que el carbono se estabiliza en la materia orgánica y en agregados del suelo, lo cual favorece su permanencia en el mismo y evita su liberación como CO_2 a la atmósfera.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de El Salto y al Instituto Tecnológico del Valle del Guadiana por las facilidades otorgadas para la realización del presente estudio.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Erik Orlando Luna Robles: dirección y diseño del experimento, trabajo en campo y elaboración del manuscrito; Ixchel Abby Ortiz Sánchez: revisión de manuscrito y trabajo en campo; José Guadalupe Colín: trabajo en campo y correcciones del manuscrito; Silvia Janeth Bejar Pulido: trabajo de campo, revisión y corrección del manuscrito.

Referencias

- Agbeshie, A. A., Abugre, S., Atta-Darkwa, T., & Awuah, R. (2022). A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, 33(5), 1419-1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Alfaro-Leranz, A., Badía-Villas, D., Martí-Dalmau, C., Escuer-Arregui, M., & Quintana-Esteras, S. (2024). The effects of fire intensity on the biochemical properties of a soil under scrub in the Pyrenean Subalpine stage. *Fire*, 7(12), Article 452. <https://doi.org/10.3390/fire7120452>

- Bárcenas-Moreno, G., Jiménez-Compán, E., San Emeterio, L. M., Jiménez-Morillo, N. T., & González-Pérez, J. A. (2022). Soil pH and soluble organic matter shifts exerted by heating affect microbial response. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), Article 15751. <https://doi.org/10.3390/ijerph192315751>
- Bielińska, E. J., Mocek-Płócinia, A., & Kaczmarek, Z. (2008). Eco-chemical forest soil indices from a forest fire. *Polish Journal of Environmental Studies*, 17(5), 665-671. <https://www.pjoes.com/pdf-88152-22010?filename=Eco-Chemical%20Forest%20Soil.pdf>
- Cantú-Silva, I., & Bejar-Pulido, S. J. (2024). Impacts of land use change on carbon and nitrogen stocks in an Andosol in Michoacan, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(3), 1305-1314. https://www.researchgate.net/publication/382077228_Impacts_of_land_use_change_on_carbon_and_nitrogen_stocks_in_an_Andosol_in_Michoacan_Mexico
- Cheng, Y., Luo, P., Yang, H., Li, H., Luo, C., Jia, H., & Huang, Y. (2023). Fire effects on soil carbon cycling pools in forest ecosystems: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 895, Article 165001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165001>
- Clemente-Quezada, J. A., Farfán, M., Albores-Arzate, R. H., & Moreno-Ceballos, R. (2025). Impacto del fuego en el Parque Nacional Cañón del Sumidero, México: cartografía de su probabilidad de ocurrencia. *Madera y Bosques*, 31, Artículo e312664. <https://doi.org/10.21829/myb.2025.312664>
- Comisión Nacional Forestal. (2026, 13 de febrero). *Concentrado nacional de incendios forestales* [Base de datos interactiva]. Gobierno de México. https://monitor_incendios.cnf.gob.mx/incendios_tarjeta_semanal
- Dekker, L. W., & Jungerius, P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. In T. W. Bakker, P. D. Jungerius & J. A. Klijn (Eds.), *Dunes of the European coasts: geomorphology-hydrology-soils* (pp 173-183). Catena Verlag. <https://research.wur.nl/en/publications/water-repellency-in-the-dunes-with-special-reference-to-the-nethe/>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Serie Libros Núm. 6). Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México. <https://publicaciones.geografia.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>

- García-Ledezma, A. K., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Himmelsbach, W., Molina-Marchan, E., & Yáñez-Díaz, M. I. (2025). Efectos hidrofóbicos en suelos quemados a diferentes intensidades. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.1965>
- Gonzáles, H., Ocaña, C. L., Cubas, J. A., Vega-Nieva, D. J., Ruíz, M., Santos, A., & Barboza, E. (2024). Impact of forest fire severity on soil physical and chemical properties in pine and scrub forests in high Andean zones of Peru. *Trees, Forests and People*, 18, Article 100659. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100659>
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la sierra madre occidental, México: una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351-403. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-71512012000300012&script=sci_abstract&lng=pt
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter—a review. *Environment International*, 30(6), 855-870. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.02.003>
- Hudiburg, T., Mathias, J., Bartowitz, K., Berardi, D. M., Bryant, K., Graham, E., Kolden, C. A., Betts, R. A., & Lynch, L. (2023). Terrestrial carbon dynamics in an era of increasing wildfire. *Nature Climate Change*, 13, 1306-1316. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01881-4>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Sinaloa* [Libro blanco]. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825094898.pdf
- International Business Machines. (2025, December 22). *SPSS Statistics 22.0 Available for Download* [Software]. IBM SPSS Statistics. <https://www.ibm.com/support/pages/spss-statistics-220-available-download>
- Jiménez-Morillo, N. T., Almendros, G., Miller, A. Z., Hatcher, P. G., & González-Pérez, J. A. (2022). Hydrophobicity of soils affected by fires: An assessment using molecular markers from ultra-high resolution mass spectrometry. *Science of the Total Environment*, 817, Article 152957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152957>

- Luna-Robles, E. O., Hernandez, F. J., Cantu-Silva, I., Bejar-Pulido, S. J., & Dominguez-Gomez, T. G. (2024a). Sequence of soil organic carbon through the Silvicultural Development Method (MDS) in temperate forests of Durango, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(3), 731-738. https://www.researchgate.net/publication/379446289_Secuencia_de_Carbono_Orgánico_del_Suelo_a_traves_del_Metodo_de Desarrrollo_Silvicola_MDS_en_bosques_templados_de_Durango_Mexico_Sequence_of_Soil_Organic_Carbon_through_the_Silvicultural_Development_Met
- Luna-Robles, E. O., Alvarez-Favela, D. O., Rodriguez-Reta, I., Torres-Siqueiros, U., Hernandez, F. J., & Bejar-Pulido, S. J. (2024b). A case study of the physical and hydrological characteristics of the soil after the occurrence of forest fires in Durango, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, 64(4), 1511-1524. https://www.researchgate.net/publication/383916422_A_case_study_of_the_physical_and_hydrological_characteristics_of_the_soil_after_the_occurrence_of_forest_fires_in_Durango_Mexico
- Luna-Robles, E. O., Cantú-Silva, I., & Bejar-Pulido, S. J. (2022). Efectos del cambio climático en la gestión sostenible del recurso suelo. *Tecnociencia Chihuahua*, 16(3), Artículo e1097. <https://doi.org/10.54167/tch.v16i3.1097>
- Luna-Robles, E. O., Hernández, F. J., Bejar-Pulido, S. J., Rodríguez-Reta, I., Colín, J. G., & Luján-Soto, J. E. (2025). Evaluation of soil physical and hydrological properties in burned grasslands in Durango, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, 65(3), 1543-1553. https://www.researchgate.net/publication/395154149_Evaluation_of_soil_physical_and_hydrological_properties_in_burned_grasslands_in_Durango_Mexico
- Lydersen, J. M., Collins, B. M., Miller, J. D., Fry, D. L., & Stephens, S. L. (2016). Relating fire-caused change in forest structure to remotely sensed estimates of fire severity. *Fire Ecology*, 12(3), 99-116. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1203099>
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M., & Taboada, M. A. (2018). Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral*, 28, 12-27. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.127>

- Mongil-Manso, J., Ruiz-Pérez, V., & López-Sánchez, A. (2024). Infiltration and hydrophobicity in burnt forest soils on Mediterranean Mountains. *Forests*, 15(11), Article 2033. <https://doi.org/10.3390/f15112033>
- Muñoz-Rojas, M., Erickson, T. E., Martini, D., Dixon, K. W., & Merritt, D. J. (2016). Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. *Ecological Indicators*, 63, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.038>
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1982). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9.2.2 (2nd ed., pp. 961-1010). American Society of Agronomy, Inc., Soil Science Society of America, Inc. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
- Or, D., Keller, T., & Schlesinger, W. H. (2021). Natural and managed soil structure: On the fragile scaffolding for soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 208, Article 104912. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Principales resultados*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>
- Pellegrini, A. F. A., Harden, J., Georgiou, K., Hemes, K. S., Malhotra, A., Nolan, C. J., & Jackson, R. B. (2022). Fire effects on the persistence of soil organic matter and long-term carbon storage. *Nature Geoscience*, 15(1), 5-13. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00867-1>
- Ribeiro-de Faria, A. L., Soares-da Costa, M. N., Monteiro-Benício de Melo, J. L., Padilha, J., Gallo-Silva, G. H., Feitosa-Braga, D. G., Pereira, M. G., & Coll-Delgado, R. (2026). Climate-vegetation-soil interactions in wildfire risk prediction: evidence from two Atlantic Forest Conservation Units, Brazil. *Forests*, 17(5), Article 526. <https://doi.org/10.3390/f17050526>
- Rodríguez-Reta, I., Luna-Robles, E. O., Aguirre-Calderón, C. E., Bejar-Pulido, S. J., & Álvarez-Favela, D. O. (2024). Evaluación de las propiedades físicas e hidrológicas de

- un Vertisol con diferentes usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84), 105-131. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i84.1463>
- Roshan, A., & Biswas, A. (2023). Fire-induced geochemical changes in soil: Implication for the element cycling. *Science of The Total Environment*, 868, Article 161714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161714>
- Santana, N. A., Morales, C. A. S., da Silva, D. A. A., Antonioli, Z. I., & Jacques, R. J. S. (2018). Soil biological, chemical, and physical properties after a wildfire event in a *Eucalyptus* forest in the Pampa Biome. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, Article e0170199. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170199>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma oficial mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020, 21 de marzo). *Día Internacional de los Bosques 2020*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/dia-internacional-de-los-bosques-2020#:~:text=La%20superficie%20arbolada%20de%20M%C3%A9xico,y%20el%20de%20las%20luci%C3%A9rnagas>
- Sousa-Lima, L. V., Saggiaro, E. M., Dorneles, P. R., & Parente, C. E. T. (2025). Fire on the ground: Wildfires impacts on soil health and biodiversity—A review. *Chemosphere*, 388, Article 144686. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144686>
- Vega-Martínez, E., Molina, J. R., Barrón, V., Rodríguez y Silva, F., del Campillo, M. del C., & Sánchez-Rodríguez, A. R. (2023). Spatio-temporal assessment of soil properties immediately and eight months after a high intensity-controlled burn in the south of Spain. *Science of the Total Environment*, 898, Article 165368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165368>
- Veneris, M., & Farid, A. (2024). Finer measurement scales for induced hydrophobicity using the water droplet penetration test. *Geotechnics*, 4(2), 581-603. <https://doi.org/10.3390/geotechnics4020032>
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., & Sánchez-Castillo, L. (2019). Effects of land use change and seasonal variation in the hydrophysical

properties in Vertisols in northeastern Mexico. *Soil Use and Management*, 35(3), 378-387. <https://doi.org/10.1111/sum.12500>



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.