







Efectos Hidrofóbicos en Suelos Quemados a Diferentes Intensidades Hydrophobic Effects in Soils Burned at Different Intensities

Adriana Karen García-Ledezma¹ , Israel Cantú-Silva¹ ,
Humberto González-Rodríguez¹ , Wibke Himmelsbach¹ ,
Emanuel Molina-Marchan¹  y María Inés Yáñez-Díaz^{1†} 

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional km 145, Colonia Centro. 67700 Linares, Nuevo León, México; (A.K.G.L.), (I.C.S.), (H.G.R.), (W.H.), (E.M.M.), (M.I.Y.D.).

† Autora para correspondencia: maria.yanezd@uanl.edu.mx

RESUMEN

Las altas temperaturas a la que se expone el suelo durante un incendio forestal generan diversos efectos que alteran la calidad del suelo. La presente investigación analiza las propiedades químicas de cuatro sistemas de usos del suelo de un Vertisol expuestos a diferentes intensidades de quemado (105, 200, 400, 750 y 900 °C) con énfasis en la propiedad de la hidrofobicidad. La determinación de la persistencia a la repelencia al agua del suelo se realizó a través de la metodología de tiempo de penetración de una gota de agua o WDPT por sus siglas en inglés, pH por el método AS-23 de la NOM-021-RECNAT-2000, materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black modificado y conductividad eléctrica (CE) por el método relación suelo - agua 1:5. Los resultados indican que el aumento de temperatura disminuyó significativamente la hidrofobicidad en los cuatro sistemas de uso del suelo; por otra parte, el potencial de hidrógeno (pH) y CE mostraron incremento. Estos valores se asocian a la combustión de la MO que generó ceniza que aporta óxidos, cationes básicos y sustancias de naturaleza hidrofílica.



Cita recomendada:

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. e1965. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1965>

Recibido: 20 de junio de 2024.
Aceptado: 9 de enero de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Mayo de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Francisco Bautista Zúñiga

Editor Técnico:
Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Palabras clave: ceniza, incendio forestal, intensidad de quemado, repelencia al agua, suelo Vertisol.

SUMMARY

The high temperatures to which the soil is exposed during a forest fire generate diverse effects that affect soil quality. The present investigation analyzes the chemical properties of four land use systems of a Vertisol exposed to different burning intensities (105, 200, 400, 750 and 900 °C) with emphasis on the property of hydrophobicity. The determination of soil water repellency persistence was carried out through the water drop penetration time (WDPT) methodology, pH by the AS-23 method of the NOM-021-RECNAT-2000, organic matter (OM) by the Walkley and modified Black method and electrical conductivity (EC) by the 1:5 soil - water ratio method. The results indicate that the increase in temperature significantly decreased hydrophobicity in the four soil use systems; On the other hand, the hydrogen potential (pH) and EC showed an increase. These values are associated with the combustion of OM, which generated ash that contributes oxides, basic cations and substances of a hydrophilic nature.

Index words: ash, forest fire, burn intensity, water repellency, Vertisol soil.

INTRODUCCIÓN

El suelo es parte fundamental del sistema terrestre, ya que en él se producen la mayoría de las transformaciones energéticas y de los flujos de materia en los ecosistemas; asimismo, interviene en el ciclo del agua y de los elementos biogeoquímicos (Bodí, Cerdà, Mataix y Doerr, 2012; Velázquez-Chávez *et al.*, 2022). Al ocurrir un disturbio como un incendio forestal, los efectos más notorios que ocurren son los cambios en las propiedades del suelo (Cadena, Flores-Garnica, Flores-Rodríguez y Lomelí-Zavala, 2020; Roshan y Biswas, 2023). Una de ellas es la hidrofobicidad, la cual indica la afinidad que poseen los suelos por el agua, lo que significa que la superficie de un suelo hidrofóbico resiste la humectación de forma intensa (Cerdà y Jordan, 2010). Esta propiedad puede persistir por segundos, hasta incluso semanas (Jordán, Zavala, Mataix, y Doerr, 2013; Dekker y Ritsema, 1994; Doerr y Thomas, 2000), y se considera de gran importancia debido a que regula los principales procesos hidrológicos y geomorfológicos de los suelos (Zavala, de Celis y Jordán, 2014). Por otra parte, al ser alterada esta característica llega a generar efectos negativos como la disminución de la tasa de infiltración, lo que aumenta la intensidad del flujo superficial y propicia el riesgo de erosión, así como la reducción en el tiempo de generación de escorrentías y mayor lixiviación de nutrientes y sustancias agroquímicas (Bodí *et al.*, 2012; Vázquez-Alvarado, Ortiz, Palacio y Muñoz, 2018).

Esto indica que la repelencia puede afectar negativamente la salud del suelo, además de impactos ambientales adversos (Ritsema, Dekker y Heijs, 1997; Doerr y Shakesby, 2009; Vogelmann, Reichert, Prevedello y Awe, 2013); lo que resulta en distintas controversias acerca de los beneficios que genera el uso del fuego como herramienta de mejoramiento y manejo de los ecosistemas. El objetivo del presente estudio es generar información mediante la técnica *ex situ* para comprender los cambios en las propiedades químicas que ocurren en los distintos sistemas de usos (matorral, pastizal, agrícola y plantación de eucalipto) del suelo Vertisol al ser quemado a distintas temperaturas, además, de emplear una muestra testigo, con un énfasis a la propiedad de hidrofobicidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El estudio se realizó en el campus de la Facultad de Ciencias Forestales (FCF) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Ubicado en el municipio de Linares, N.L. en las coordenadas geográficas 24° 47' 51.22" N y 99° 32' 29.71" O. De acuerdo con lo referido por Yáñez-Díaz *et al.* (2017), en el Campus se encuentran los cuatro sistemas de uso de suelo Vertisol analizados (Figura 1), y comprenden las distintas características:

Matorral espinoso tamaulipeco (MET). Es la vegetación arbórea nativa, constituida por especies espinosas y leñosas, donde predominan *Celtis pallida* Torr., *Acacia rigidula* Benth., *Randia aculeata* L., *Castela tortuosa* Liebm., *Condalia lycioides* (A. Gray) Weberb., *Condalia obovata* Ruiz & Pav., *Bernardia myricifolia* (Scheele) S.Watson, *Forestiera angustifolia* Torr., *Karwinskia humboldtiana* (Schult.) Zucc., entre otras.

Área de pastizal. Está formado por un sistema de ganadería intensiva y rotación de potreros con *Dichanthium annulatum* (Forssk.) Stapf.

Plantación de eucalipto. Fue realizada en 1983 con fines de investigación, establecida inicialmente bajo un sistema taungya donde se encuentran las especies de *Eucalyptus microtheca* F. Muell. y *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

Área agrícola. Es un campo de rotación de cultivos donde se siembra *Triticum* spp. y *Sorghum bicolor* (L.) Moench bajo un sistema de labranza cero con criterios de producción sostenible.

Colecta de Muestra

El sistema de muestreo que se empleó para la obtención de muestras de suelo fue de forma aleatoria. En cada sistema de uso de suelo se tomaron cinco muestras compuestas de diez submuestras de suelo a profundidad de 0-5 centímetros.

Preparación del Suelo Quemado

En el laboratorio de suelos de FCF, UANL, las muestras compuestas se secaron a temperatura ambiente durante siete días y se cribaron en malla de 2 mm, removiendo partículas gruesas y se homogeneizó la tierra fina.

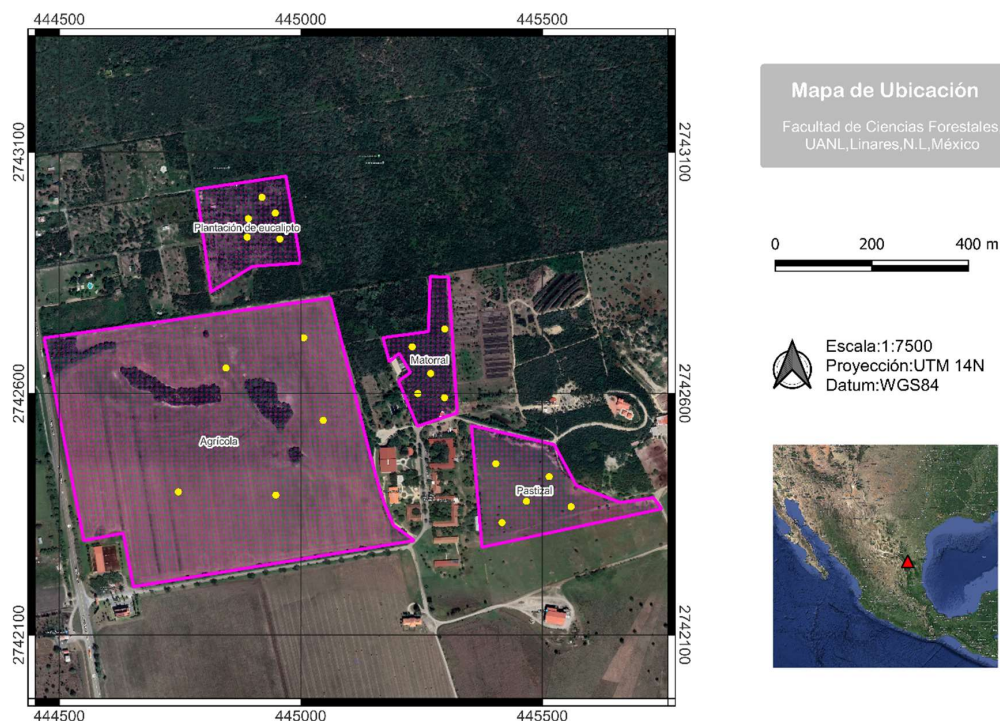


Figura 1. Ubicación del área de estudio localizada en la Facultad de Ciencias Forestales, en el municipio de Linares, N.L.
Figure 1. Site of the study area located in the Faculty of Forest Sciences, in the municipality of Linares, N.L.

Quema de Suelo en Mufla

En el laboratorio de tecnología de la madera perteneciente a la FCF, se depositaron 25 g de suelo cribado en crisoles para ser quemados a 105, 200, 400, 750 y 900 °C (cinco tratamientos) en la mufla marca Thermo Fisher Scientific, 220 V, durante un período de 30 minutos continuos. Cabe señalar, que los incendios pueden presentar un intervalo entre 30 minutos a diversos días (Vadrevu, Eaturu, Casadaban y Biswas, 2022); sin embargo, este periodo no se considera representativo de las quemas agrícolas, ya que su combustión tiene duración que oscila entre segundos y minutos (Lázaro-Sánchez, Bautista, Goguitchaichvili, López y Sánchez, 2021).

Test del Tiempo de Penetración de la Gota de Agua

A través del método de laboratorio de la prueba de tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT por sus siglas en inglés) se evaluó el grado de hidrofobicidad; este procedimiento consistió en colocar 5 g de suelo sobre la superficie de una caja Petri en la que posteriormente se colocaron cinco gotas de agua destilada, a una altura no mayor a 15 mm, y se registró el tiempo que persistió la hidrofobicidad en el suelo analizado y se categorizó de acuerdo a la clasificación de Dekker y Jungerius (1990) que se muestra en el Cuadro 1 (Cerdà y Jordan, 2010).

Potencial de Hidrógeno (pH)

La medición de pH se realizó mediante el método AS-23 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), mismo que consiste en pesar 5 g de suelo en un frasco de plástico y posteriormente añadir 10 mL de agua destilada para obtener una mezcla de suelo: solución de 1:2, después, se agitó con una varilla de plástico manualmente durante 30 minutos en periodos de cinco minutos; al concluir el tiempo la mezcla se dejó en reposo por 15 minutos y finalmente con el electrodo de un potenciómetro-conductivímetro marca CORNING Modelo 542 previamente calibrado se tomó la lectura de las muestras y se categorizaron de acuerdo a la clasificación de SEMARNAT (2002) que se ilustra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificaciones de las pruebas, WDPT propuesta por Dekker y Jungerius (1990); pH por NOM-021-REC NAT-2000 (SEMARNAT, 2002); y Conductividad eléctrica (Woerner, 1989).
Table 1. Test classifications, WDPT proposed by Dekker and Jungerius (1990); pH by NOM-021-REC NAT-2000 (SEMARNAT, 2002); and Electrical conductivity (Woerner, 1989).

Nivel de persistencia de la repelencia al agua	Valores del WDPT (s)	Clasificación	pH	Salinidad	CE dS cm ⁻¹
No repelente	< 5	Fuertemente ácido	<5.0	Muy Escasa	<0.005
Ligeramente repelente	5 - 60	Medianamente ácido	5.1 - 6.5	Escasa	0.005 - 0.01
Fuertemente repelente	60 - 600	Neutro	6.6 - 7.3	Moderada	0.01 - 0.02
Severamente repelente	600 - 3600	Moderadamente alcalino	7.4 - 8.5	Alta	0.02 - 0.04
Extremadamente repelente	> 3600	Fuertemente alcalino	>8.5	Extrema	>0.04

Materia Orgánica (MO)

La materia orgánica se determinó mediante una combustión húmeda y titulación según el método de Walkley/Black modificado (Woerner, 1989). En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se pesó 5 g de suelo, seguidamente se añadió 25 mL de dicromato de potasio 0.07 M cerciorándose que entre en contacto con toda la muestra de suelo, después, se agregaron 25 mL de H₂SO₄ y se agitó durante un minuto; dejando en estado de reposo la mezcla durante 30 minutos para posteriormente adicionar 150 mL de agua destilada, 10 mL de ácido fosfórico concentrado, 0.2 g de NaF y 0.5 mL de indicador de ferroina, para finalizar se tituló con disolución de sulfato ferroso hasta alcanzar una coloración verde claro. Los cálculos realizados se obtuvieron mediante las operaciones que se muestran a continuación:

$$\% \text{ Carbono Orgánico} = 0.779 * (B - M) (0.4) \quad (1)$$

$$0.779 = \frac{\frac{12}{4000} * \frac{100}{77} * 100}{0.5} \quad (2)$$

$$\% \text{ Materia Orgánica} = 1.343 * (B - M) (0.4) \quad (3)$$

$$1.343 = \left[\frac{\frac{12}{4000} * \frac{100}{77} * 100}{0.5} \right] \div 0.58 \quad (4)$$

Donde: B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (mL), M = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (mL), 0.4 = normalidad de la solución de Dicromato de Potasio y de la solución del sulfato ferroso 12/400 = peso equivalente del carbono en mg, 100/77 = factor de recuperación del carbono según Walkley/Black, 0.5 = peso de la muestra en g, 0.58 = porcentaje medio de carbono que contiene la materia orgánica.

Conductividad Eléctrica (CE)

La determinación de la conductividad eléctrica se realizó mediante una relación suelo - agua 1:5 (Woerner, 1989). En un frasco de plástico se colocaron 5 g de suelo, al que se le añadieron 25 mL de agua destilada y se homogeneizó con una varilla de plástico cada 20 minutos durante un periodo de 120 minutos. Posteriormente, con un electrodo de un potenciómetro-conductímetro (marca CORNING Modelo 542) previamente calibrado, se registró la lectura de CE para cada muestra y se categorizó de acuerdo con la clasificación de que se denota en el Cuadro 1.

Análisis Estadístico

Para determinar si existen diferencias significativas entre las temperaturas para cada uso de suelo, los datos se sometieron a la prueba de Kruskal-Wallis y la prueba de comparación de medias se realizó mediante comparaciones pareadas usando la prueba de Mann-Whitney U ($P \leq 0.05$), ya que los datos no presentaron distribución normal ni homogeneidad de varianza; este análisis se realizó mediante el software estadístico "IBM SPSS Statistics (versión 25)" (IBM SPSS Statistics, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos de hidrofobicidad para las temperaturas 400, 750 y 900 °C, en general mostraron descenso en comparación con las otras intensidades de quemado (Figura 2), este comportamiento puede ser explicado debido a la exposición que sufrió el suelo a altas temperaturas, ya que pueden ocasionar la combustión incompleta de la biomasa cuya característica hidrofóbica se incrementó debido a las sustancias orgánicas de origen pirolítico que se producen y desaparecen posterior a la temperatura de 400 °C, lo que genera la aparición de cenizas (Cerdà y Doerr, 2008; González-Pérez, Gonzales, Rosa y Gonzales, 2011); por otra parte, las temperaturas de 105 y 200 °C registraron el mayor grado de hidrofobicidad debido a que el umbral térmico de la MO aún no ha sido excedido; una vez que el límite sea sobrepasado, la propiedad presentará un decremento (Robichaud y Hungerford, 2000; Doerr, Shakesby y Walsh, 2000). Esto concuerda con lo reportado por Zavala, Granged, Jordán y Bárcenas (2010) y Villarruel, Sacchi y Zampar (2022), quienes señalan que la repelencia al agua en los suelos disminuye significativamente al aumentar la temperatura. Asimismo, Cuevas-Becerra (2006) y Jaramillo (2006) mencionan que el grado de hidrofobicidad de los suelos está relacionado con la naturaleza hidrofílica que presenta la MO. La muestra que presentó mayor grado de hidrofobicidad en este análisis fue la de 200 °C, en cambio, la muestra expuesta a 900 °C fue la que se mostró más hidrofílica; sin embargo, todas las muestras analizadas entraron en la clasificación del WDPT como "no repelentes al agua" (Cuadro 1).

La muestra testigo de la vegetación de eucalipto, registró la mayor hidrofobicidad en comparación con los demás usos de suelo y las diferentes temperaturas, esto posiblemente se deba a que *E. camaldulensis* y *E. microteca* desarrollan compuestos alopáticos (Chemlali, Dueñas, Ferreras y Saadaoui, 2024), que al mezclarse con las partículas del suelo ocasionan mayor nivel de repelencia al agua (Copaja, López y Bravo, 2023).

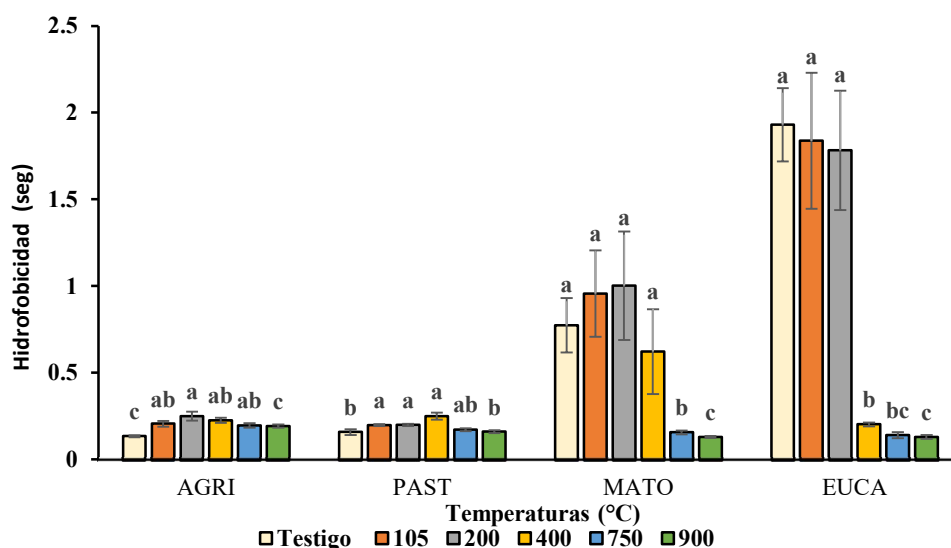


Figura 2 Prueba pareada de Hidrofobicidad con el análisis de Mann-Whitney U ($P \leq 0.05$) entre las temperaturas para cada uso de suelo. AGRI = suelo de uso agrícola; PAST = suelo con pastizal; MATO = suelo con vegetación de matorral; EUCA = plantación de eucalipto. Letras distintas indican que existe diferencia significativa entre la hidrofobicidad para cada uso de suelo.

Figure 2 Paired test of Hydrophobicity with Mann-Whitney U analysis ($P \leq 0.05$) between temperatures for each soil use. AGRI = soil with agricultural use; PAST = soil with pasture; MATO = soil with scrub vegetation; EUCA = Eucalyptus plantation. Different letters indicate that there is a significant difference between temperatures for each land use.

Escalante-Rebolledo *et al.* (2016) mencionan que, la aplicación de biocarbón (biochar), que es un subproducto de la pirólisis de biomasa residual, beneficia la sorción de compuestos orgánicos como herbicidas, insecticidas, enzimas, así como compuestos hidrofóbicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), entre otros.

En general, aunque el pH presentó aumento en todas las muestras conforme incrementó la temperatura (Figura 3), solo las de 750 y 900 °C pasaron de ser medianamente alcalino a fuertemente alcalino, de acuerdo con la clasificación de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Este comportamiento coincide con lo registrado por Fraser y Scott (2011) en tres localidades agrícolas, ya que señalan un cambio de pH ácido a neutro, posterior a la práctica de la quema de madera, principalmente de *Eucalyptus populnea* F. Muell, y como resultado de la combustión se produjo un efecto similar al que ocasiona el carbonato de calcio y el hidróxido de calcio, que se emplean en áreas de cultivo para aumentar el pH del suelo.

Los valores de la presente investigación se atribuyen a la creación de óxidos de diferentes elementos y a la liberación de cationes básicos de la MO; además, de la pérdida del grupo de OH de los constituyentes de las arcillas, pero principalmente este aumento se relaciona con la MO que a causa del incremento en la temperatura propicia la aparición de ceniza (Giovannini y Lucchesi, 1997; Wondafrash, Mariscal, Miguel y Serrano, 2005), que contiene amplia proporción de carbonato de potasio (CO_3K_2), ya que al provenir de un ácido débil y una base fuerte, genera aumento de pH (Rosero-Cuesta y Osorio, 2013). Además, estas observaciones son similares a lo reportado por Mogollón *et al.* (2018) y Memoli *et al.* (2020), quienes observaron que al aumentar la temperatura, se incrementa los niveles de alcalinidad. Asimismo, los cambios en el pH en su mayoría, son temporales debido a la constante formación de humus en el suelo; cabe señalar, que han llegado a existir casos donde se han necesitado hasta 50 años para regresar a su pH original (Verma y Jayakumar, 2012).

El análisis de los datos de MO en las distintas muestras de suelo quemado, muestran que las variaciones que se presentaron en las temperaturas de 105 y 200 °C con la muestra control (testigo) son mínimas. En cambio, en las muestras de 400, 750 y 900 °C se observó un claro decremento (Figura 4). Estos resultados posiblemente se deban a que han sobrepasado el umbral de temperatura de la MO, que oscila entre los 280 a 400 °C (Doerr *et al.*, 2000; Robichaud y Hungerford, 2000). Esta disminución en la propiedad del suelo se considera frecuente después de un disturbio de fuego, debido a los procesos de oxidación, volatilización y creación de ceniza que ocurren (Fatubarin y Olojugba, 2014; Minervini, Morrás y Taboada, 2018). No obstante, en la naturaleza los valores de MO posterior a un incendio incluso pueden presentar ligero incremento por el arrastre de partículas ocasionado por la lluvia (Garnica y Solorio, 1995).

La conductividad eléctrica en las muestras de los distintos usos de suelo se comportó de forma ascendente conforme aumentó la temperatura (Figura 5); principalmente, en los suelos expuestos a 900 °C se encuentran los máximos valores de CE. Este incremento puede asociarse a la liberación de cationes básicos originarios de la combustión de la MO que aún se encuentran presentes en el suelo (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Certini,

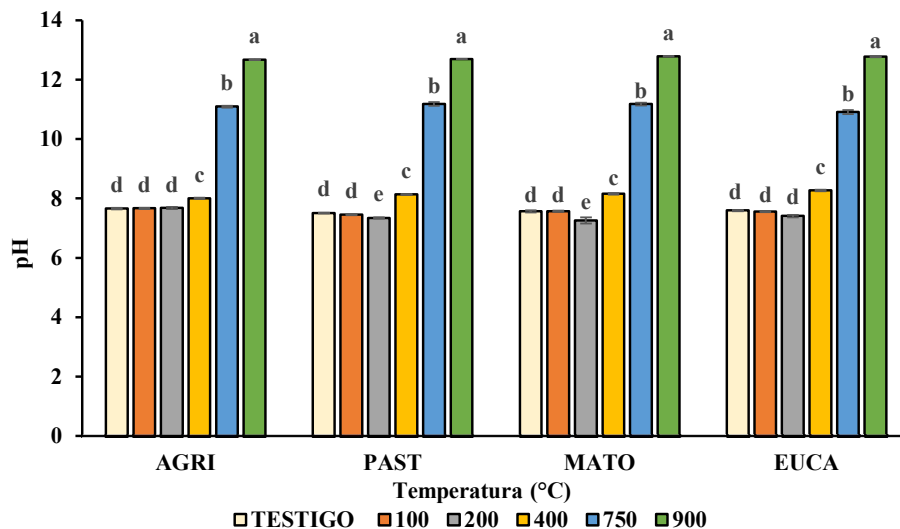


Figura 3. Prueba pareada de pH con el análisis de Mann-Whitney U ($P \leq 0.05$) entre las temperaturas para cada uso de suelo. AGRI = suelo de uso agrícola; PAST = suelo con pastizal; MATO = suelo con vegetación de matorral; EUCA = plantación de eucalipto. Letras distintas indican que existe diferencia significativa entre la hidrofobicidad para cada uso de suelo.

Figure 3. Paired test of pH with Mann-Whitney U analysis ($P \leq 0.05$) between temperatures for each land use. AGRI = soil with agricultural use; PAST = soil with pasture; MATO = soil with scrub vegetation; EUCA = Eucalyptus plantation. Different letters indicate that there is a significant difference between temperatures for each land use.

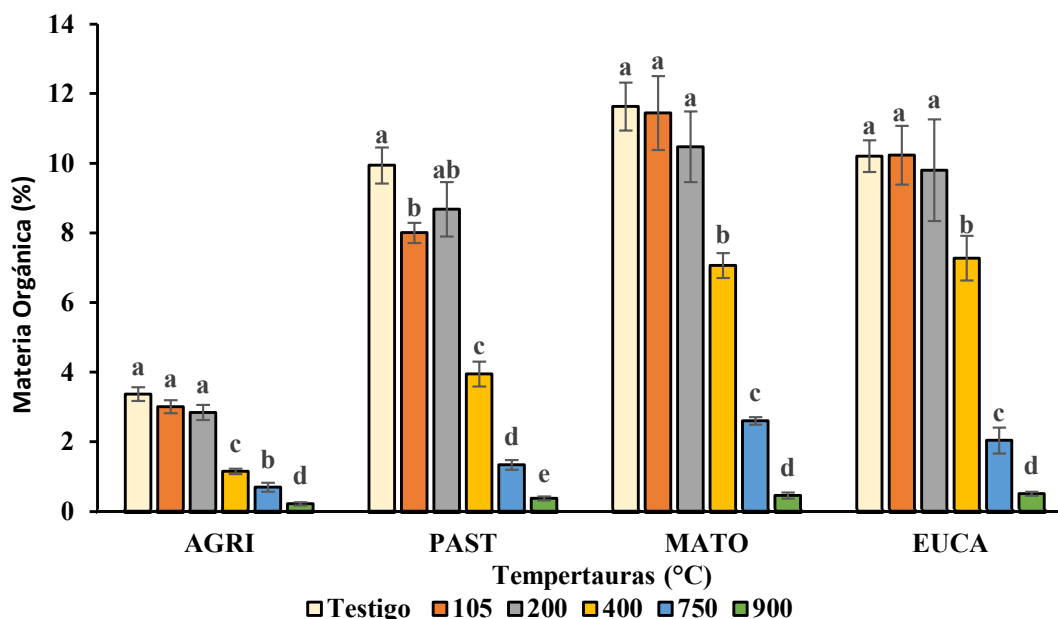


Figura 4. Prueba pareada de MO con el análisis de Mann-Whitney U ($P \leq 0.05$) entre las temperaturas para cada uso de suelo. AGRI = suelo de uso agrícola; PAST = suelo con pastizal; MATO = suelo con vegetación de matorral; EUCA = plantación de eucalipto. Letras distintas indican que existe diferencia significativa entre la hidrofobicidad para cada uso de suelo.

Figure 4. Paired OM test with Mann-Whitney U analysis ($P \leq 0.05$) between temperatures for each land use. AGRI = soil with agricultural use; PAST = soil with pasture; MATO = soil with scrub vegetation; EUCA = Eucalyptus plantation. Different letters indicate that there is a significant difference between temperatures for each land use.

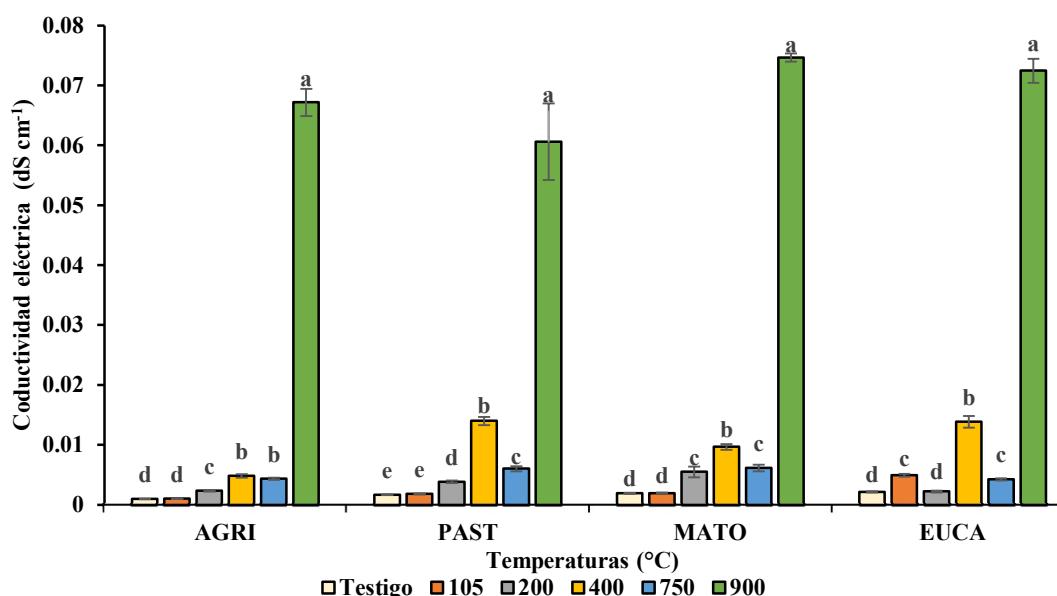


Figura 5. Prueba pareada de CE con el análisis de Mann-Whitney U ($P \leq 0.05$) entre las temperaturas para cada uso de suelo. AGRI = suelo de uso agrícola; PAST = suelo con pastizal; MATO = suelo con vegetación de matorral; EUCA = plantación de eucalipto. Letras distintas indican que existe diferencia significativa entre la hidrofobicidad para cada uso de suelo.

Figure 5. Paired test of EC with Mann-Whitney U analysis ($P \leq 0.05$) between temperatures for each soil use. AGRI = soil with agricultural use; PAST = soil with pasture; MATO = soil with scrub vegetation; EUCA = Eucalyptus plantation. Different letters indicate that there is a significant difference between temperatures for each land use.

Nocentini, Knicker, Arfaioli y Rumpel, 2011). Lo que coincide con lo reportado por Li, Ishikawa y Mihara (2012), quienes refieren incremento significativo de CE y pH en zona agrícola posterior a una quema de residuos vegetales; también, es similar a lo señalado por Lázaro-Sánchez *et al.* (2021), que obtuvieron aumento en la CE a distintas profundidades de suelo después de la quema en un área de producción de caña de azúcar. Del mismo modo, en otras investigaciones hechas en vegetación forestal, como las realizadas por Granged, Jordán, Zavala, Muñoz y Mataix (2011) en un experimento *in situ*, así como Alcañiz, Úbeda y Cerdà (2020) con dos quemas prescritas en un lapso de nueve años, refieren incremento en la CE posterior a los incendios, estos cambios se atribuyen a la producción de cenizas y a la intensificación de la temperatura que puede producir cambios químicos e intensificar los procesos de mineralización de los elementos presentes en la MO (Alcañiz, Outeiro, Francos y Úbeda, 2018).

Cabe mencionar, que debido al incremento de iones solubles inorgánicos después de un incendio, puede implicar mejora en la fertilidad de los suelos en la mayoría de los casos; sin embargo, no se puede considerar un indicador de aumento de fertilidad (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Mogollón *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES

Las muestras analizadas de los cuatro sistemas de uso de suelo en Vertisol, presentaron cambios significativos en las diversas propiedades químicas analizadas. La repelencia al agua evaluada mostró disminución progresiva conforme aumentó la temperatura; sin embargo, todas las muestras quemadas, al igual que la testigo, se clasifican como "no repelentes al agua" por el método de WDPT. De forma similar, la materia orgánica registró comportamiento descendente con el aumento de la intensidad de exposición a altas temperaturas, el mayor decremento se registró a 400, 750 y 900 °C, lo que se asocia principalmente a la formación de ceniza que contribuye a la formación de compuestos de naturaleza hidrofóbica.

La ceniza proveniente de la MO como resultado de la combustión, provocó que el pH registrara en general una tendencia ascendente en la alcalinidad y la temperatura en las muestras; además, se presentó cambio en la clasificación de medianamente alcalino a fuertemente alcalino entre las temperaturas de 400 a 750 °C. Asimismo, los valores de la conductividad eléctrica se comportaron de manera similar, lo que sugiere que los suelos tienden a aumentar su nivel de iones solubles inorgánicos con el ascenso de temperatura. Es importante destacar que, aunque los distintos usos de suelo mostraron tendencias similares, las temperaturas que registraron los mayores cambios son las de 750 y 900 °C.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Todos los intereses financieros y no financieros deben declararse en esta sección. Si no tiene intereses en cuestión, indique "Los autores declaran que no tienen intereses en competencia" en esta sección.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: A.K.G.L. Metodología: A.K.G.L. y M.I.Y.D. Validación: A.K.G.L., I.C.S. y M.I.Y.D. Análisis formal: A.K.G.L., I.C.S. y M.I.Y.D. Investigación: A.K.G.L., I.C.S. y M.I.Y.D. Preparación de borrador original: A.K.G.L., I.C.S., M.I.Y.D., H.G.R., E.M.M. y W.H. Escritura, revisión y edición: A.K.G.L., I.C.S., M.I.Y.D., H.G.R., E.M.M. y W.H.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por las facilidades otorgadas para el desarrollo de esta investigación y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca otorgada al primer autor.

LITERATURA CITADA

- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613, 944-957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Alcañiz, M., Úbeda, X., & Cerdà, A. (2020). A 13-year approach to understand the effect of prescribed fires and livestock grazing on soil chemical properties in Tivissa, NE Iberian Peninsula. *Forests*, 11(9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/f11091013>
- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2012). Repelencia al agua en suelos forestales afectados por incendios y en suelos agrícolas bajo distintos manejos y abandono. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38(2), 53-74. <https://doi.org/10.18172/cig.1282>
- Cadena, D. A., Flores-Garnica, J. G., Flores-Rodríguez, A. G., & Lomelí-Zavala, M. E. (2020). Efecto de incendios en la vegetación de sotobosque y propiedades químicas de suelo de bosques templados. *Agro Productividad*, 13(4), 1-8. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1684>
- Chemlali, I., Dueñas, M., Ferreras-Charro, R., & Saadaoui, E. (2024). Phytochemical profile and allelopathic activity of eight Eucalyptus species on the performance of initial growth stage of four local species in the southern Tunisia. *Ecological Genetics and Genomics*, 33, 100291. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2024.100291>
- Copaja, S. V., López, M. L., & Bravo, H. R. (2023). Dynamic of indole alkaloids in a soil and its relationships with allelopathic properties. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 68(1), 1-9. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072023000105787>
- Cerdà, A., & Doerr, S. H. (2008). The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74(3), 256-263. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.03.010>
- Cerdà A., & Jordan, A. (2010). *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. España: Universitat de València, Càtedra Divulgación de la Ciència. ISBN: 978-84-370-7887-8
- Certini, G., Nocentini, C., Knicker, H., Arfaioli, P., & Rumpel, C. (2011). Wildfire effects on soil organic matter quantity and quality in two fire-prone Mediterranean pine forests. *Geoderma*, 167-168, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.005>
- Cuevas-Becerra, J. (2006). Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 6(2). <https://doi.org/10.4067/s0718-27912006000200002>
- Dekker, L. W., & Jungerius, P. D. (1990). Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands. En T. W. Bakker, P. D. Jungerius, & J. A. Klijn (Eds.), *Dunes of the European coasts: Geomorphology-Hydrology-Soils* (pp. 173-183). Cremlingen-Destedt, Germany: Catena Verlag.
- Dekker, L., & Ritsema, C. (1994). How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research*, 30(9), 2507-2517. <https://doi.org/10.1029/94wr00749>
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51(1-4), 33-65. [https://doi.org/10.1016/s0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/s0012-8252(00)00011-8)
- Doerr, S. H., & Shakesby, R. A. (2009). Soil water repellency. Principles, causes and relevance in fire-affected environments. In A. Cerdà, J. M. Solera (Eds.), *Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España* (pp. 57-76). España: Universitat de València-Càtedra Divulgación de la Ciència. ISBN 978-84-370-7653-9
- Doerr, S. H., & Thomas, A. D. (2000). The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, 231-232, 134-147. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00190-6](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00190-6)
- Escalante-Rebolledo, A., Pérez-López, G., Hidalgo-Moreno, C., López-Collado, J., Campo-Alves, J., Valtierra-Pacheco, E., & Etchevers-Barra, J. D., (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34, 367-382.
- Fatubarin, A., & Olojugba, M. R. (2014). The influences of forest fire on the vegetation and some soil properties of a savanna ecosystem in Nigeria. *Journal of Social Science and Environmental Management*, 5(2), 28-34.
- Fraser, M. A., & Scott, B. J. (2011). Variability of acidity in agricultural soils—the impact of timber burning at land clearing. *Soil Research*, 49(3), 223-230. <https://doi.org/10.1071/sr10076>
- Garnica, J. G. F., & Solorio, J. D. D. B. (1995). Efecto de las quemas prescritas sobre algunas características del suelo en un rodal de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 20 (77), 113-128.
- Giovannini, G., & Lucchesi, S. (1997). Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. *Soil Science*, 162(7), 479-486. <https://doi.org/10.1097/00010694-199707000-00003>
- González-Pérez, J. A., González-Vázquez, R., Rosa-Arranz, J. M., & González-Vila, F. J. (2011). El fuego y la materia orgánica del suelo. *Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla*, 2(3), 8-14.
- Granged, A. J. P., Jordán, A., Zavala, L. M., Muñoz-Rojas, M., & Mataix-Solera, J. (2011). Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia). *Geoderma*, 167, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.011>
- IBM SPSS Statistics. (2017). *Statistical Package for the Social Sciences User's Guide. version 25*. Armonk, NY, USA: IBM Corp.
- Jaramillo-Jaramillo, D. F. (2006). Repelencia al agua en suelos: una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 30(115), 215-232. [https://doi.org/10.18257/raccefyn.30\(115\).2006.2242](https://doi.org/10.18257/raccefyn.30(115).2006.2242)
- Jordán, A., Zavala, L. M., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2013). Soil water repellency: origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena*, 108, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.05.005>
- Lázaro-Sánchez, G. D. R., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., López-Noverola, U., & Sánchez-Hernández, R. (2021). Efecto de la quema agrícola en un Vertisol de Tabasco México: fósforo, pH y conductividad eléctrica. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(1), 1-10. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3569>
- Li, L., Ishikawa, Y., & Mihara, M. (2012). Effects of burning crop residues on soil quality in wenshui, shanxi of China. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 3(1), 30-35. https://doi.org/10.32115/ijerd.3.1_30
- Mataix-Solera, J., & Guerrero, C. (2007). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. In: J. Mataix-Solera. (Ed.). *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica* (pp. 5-40). Alicante, España: Caja Mediterráneo.

- Memoli, V., Panico, S. C., Santorufo, L., Barile, R., Di-Natale, G., Di-Nunzio, A., ... & Maisto, G. (2020). Do wildfires cause changes in soil quality in the short term?. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155343>
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M., & Taboada, M. Á. (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>
- Mogollón, J. P., Chirino, L., Palencia, G., Muñoz, B., Rivas, W., & Colina, F. (2018). Efecto del fuego sobre las propiedades químicas del suelo en un ecosistema forestal de la Sierra de San Luis, estado Falcón, Venezuela. *Multiciencias*, 17(1), 9-18.
- Ritsem, C. J., Dekker, L. W., & Heijs, W. J. (1997). Three-dimensional fingered flow patterns in a water repellent sandy field soil. *Soil Science*, 162(2), 79-90. <https://doi.org/10.1097/00010694-199702000-00001>
- Robichaud, P. R., & Hungerford, R. D. (2000). Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology*, 231-232, 207-219. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(00\)00195-5](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(00)00195-5)
- Roshan, A., & Biswas, A. K. (2023). Fire-induced geochemical changes in soil: Implication for the element cycling. *Science Of The Total Environment*, 868, 161714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161714>
- Rosero-Cuesta, J., & Osorio-Giraldo, I. (2013). Efectos de los incendios forestales en las propiedades del suelo. Estado del arte. *Cuaderno Activa*, 5, 59-67.
- SEMARNAT (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*. D. F. México: SEGOB.
- Vadrevu, K. P., Eaturu, A., Casadaban, E., Biswas, S. (2022). Agricultural fires in south asian countries and implications. In K. P. Vadrevu, T. Le Toan, S. S. Ray, C. Justice, C. (Eds.). *Remote sensing of agriculture and land cover/land use changes in south and southeast asian countries*. Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-92365-5_29
- Vázquez-Alvarado, A., Ortiz-Rodríguez, A. J., Palacio-Aponte, A. G., & Muñoz Robles, C. A. (2018). Escorrentía y producción de sedimentos en encinares incendiados de la Sierra Madre Oriental, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 1-23. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.121>
- Velázquez-Chávez, L. D. J., Ortiz-Sánchez, I. A., Chávez-Simental, J. A., Pámanes-Carrasco, G. A., Carrillo-Parra, A., & Pereda-Solís, M. E. (2022). Influencia de la contaminación del agua y el suelo en el desarrollo agrícola nacional e internacional. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25, 1-13. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.482>
- Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: a review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences* 2(3), 1-9.
- Villarruel, G., Sacchi, G. A., & Zampar, V. P. (2022). Repelencia al agua en suelos afectados por incendio: comparación con experiencias de calentamiento en laboratorio. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 9(2), 69-76.
- Vogelmann, E. S., Reichert, J. M., Prevedello, J., & Awe, G. O. (2013). Hydro-physical processes and soil properties correlated with origin of soil hydrophobicity. *Ciencia Rural*, 43(9), 1582-1589. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782013005000107>
- Woerner, M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. Linares, Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Wondafrash, T. T., Sancho, I. M., Miguel, V. G., & Serrano, R. E. (2005). Relationship between soil color and temperature in the surface horizon of mediterranean soils. *Soil Science*, 170(7), 495-503. <https://doi.org/10.1097/01.ss.0000175341.22540.93>
- Yáñez-Díaz, M. I., Cantú-Silva, I., González-Rodríguez, H., Jurado, E., Monsiváism, J. G. M., & Gómez Meza, M. V. (2017). Respiración del suelo en cuatro sistemas de uso de la tierra. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 1-27. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.22>
- Zavala, L. M. M., de Celis, R. S., & Jordán, A. (2014). How wildfires affect soil properties. A brief review. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40(2), 311-331. <https://doi.org/10.18172/cig.2522>
- Zavala, L. M., Granged, A. J., Jordán, A., & Bárcenas-Moreno, G. (2010). Effect of burning temperature on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma*, 158(3), 366-374. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.004>