

Impacto de altas temperaturas sobre la textura y agregación de un suelo del bosque de caldén: implicancias para la erosión eólica

Larroulet, María Sofía ¹ , AVECILLA, Fernando ² , de Oro, Laura Andrea ^{2,3} 
Correa, Adriana Noemí ⁴ , Comas, Rocío Noelia ^{2,3} 

1 Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía, La Pampa, Argentina

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Ciencias de la Tierra y Ambientales de la Pampa, Argentina

3 Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Ciencias. Exactas y Naturales, La Pampa, Argentina

4 Actividad privada

@ sofialarroulet@agro.unlpam.edu.ar

Recibido: 04/06/2024

Aceptado: 06/11/2024

Resumen. El objetivo del trabajo fue evaluar, en un suelo franco del bosque de caldén con menor y mayor cobertura vegetal (Abierto y Cerrado respectivamente), el efecto de la temperatura sobre contenidos de carbono orgánico total (COT) y distribución del tamaño de partículas (DTP), que definen la microagregación. Se tomaron muestras compuestas de ambos sitios y se calcinaron 5 minutos en mufla a 100, 200, 300, 400, 500 y 600 °C. Sobre muestras calcinadas y sin calcinar se determinó COT y DTP con tratamiento de alta y baja dispersión. Se calculó la fracción erosionable (FE, partículas $\leq 0,84$ mm), que define la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por viento y un índice de microagregación (MiA). En ambos sitios, aumentos de temperatura redujeron el COT a partir de 400 °C. La DTP mostró reducciones de la fracción arcilla e incrementos de limo grueso a partir de 400-500 °C. La fracción arena <250 μm aumentó a 500-600 °C, mientras que la >250 μm disminuyó. Incrementos en el contenido de arena y reducciones en el de arcilla, con aumento de temperatura, incrementaron la FE en ambos sitios, lo que indica mayor susceptibilidad a ser erosionado por el viento. A 600 °C, en ambos sitios, los cambios en la granulometría produjeron cambios en la textura del suelo. Reducciones en COT, en las fracciones de arcilla y limo fino redujeron MiA con el incremento de la temperatura. Esto indica que los agentes que favorecen la formación y estabilidad de los agregados se pierden o transforman a altas temperaturas. Disminuyeron los microagregados de 125-1000 μm y se incrementaron los de 30-250 μm . Estos agregados estarían formados por la recristalización de los compuestos de Fe y Al (microagregados densos), debido a la combustión del COT y reducción de la fracción más fina y reactiva del suelo.

Palabras clave: microagregación; carbono orgánico del suelo; efecto del fuego; bosque.

Abstract. High temperatures impact on soil texture and aggregation in caldén forest: implications for eolian erosion. The objective of this work was to evaluate, in a loamy soil of the caldén forest with lower and higher vegetation cover (Open and Closed respectively), the effect of temperature on total organic carbon contents (TOC) and particle size distribution (PSD), which define micro-aggregation. Composite samples were taken from both sites and calcined for five minutes at 100, 200, 300, 400, 500 and 600 °C for 5 minutes. On calcined and un-calcined samples, TOC and PSD under high and low dispersion treatment were analyzed. The erodible fraction (EF, particles ≤ 0.84 mm), which defines the susceptibility of the soil to wind erosion and, a microaggregation index (MiA) were calculated. At both sites, temperature increases reduce TOC from 400 °C onwards. PSD showed reductions in clay fraction and increases in coarse silt from 400-500 °C. Sand fractions <250 μm increased at 500-600 °C, while those >250 μm decreased. Increases in sand content and reductions in clay content, with increasing temperatures, increased EF at both sites, indicating greater susceptibility of the soil to wind erosion. At 600 °C, in both sites, changes in granulometry produced changes in soil texture. Reductions in TOC, clay and fine silt fractions decreased MiA with increasing temperature. This indicate that agents favoring aggregate formation and stability are lost or transformed at high temperatures. Microaggregates of 125-1000 μm decreased and those of 30-250 μm increased. These aggregates would be formed by the recrystallization of Fe and Al compounds (dense microaggregates), due to the combustion of TOC and reduction of the finest and most reactive soil fraction.

Key words: microaggregation; soil organic carbon; effect of fire; forest.

INTRODUCCIÓN

El área del Caldén es altamente propensa a la ocurrencia de fuegos naturales en épocas estivales, donde se combinan altas temperaturas, baja humedad del aire y escasas precipitaciones. Además, debido al uso silvopastoril del bosque, frecuentemente se realizan quemas prescriptas para mejorar la disponibilidad de recursos forrajeros para el ganado (Estelrich et al., 2022).

Cómo citar este trabajo:

Larroulet, M. S., AVECILLA, F., de Oro, L. A., Correa, A. N. y Comas, R. N. (2025). Impacto de altas temperaturas sobre la textura y agregación de un suelo del bosque de caldén: implicancias para la erosión eólica. *Semiárida*, 35(1), 21-34.

Las altas temperaturas del fuego pueden provocar cambios físicos y/o químicos a nivel superficial en el suelo post fuego, los que pueden afectar el restablecimiento de la vegetación hacia un sistema similar al previo al evento. Algunos autores, establecieron que la temperatura alcanzada en un fuego sólo tiene consecuencias considerables en los primeros cinco centímetros del suelo, aunque la profundidad de afectación dependerá de las características tanto del fuego como del suelo (Denegri et al., 2014; Larroulet et al., 2016). El impacto del fuego sobre el suelo, depende de numerosos factores, tales como, tipo de vegetación presente, intensidad y severidad del fuego, tipo de suelo, contenido de humedad en el momento del fuego, duración e intensidad de la precipitación post fuego y calidad y grado de incorporación de cenizas (Agee, 1993; DeBano et al., 1998). Hasta la actualidad se han realizado algunos estudios relacionados con los efectos del fuego sobre las propiedades químicas de suelos del Caldenal pampeano (Hepper et al., 2008; Larroulet et al., 2016), y en menor medida sobre los efectos en las propiedades morfológicas, físicas y mineralógicas de los suelos (Are et al., 2009; Minervini et al., 2018).

La región central de la provincia de La Pampa, es un área ocupada en gran medida por el bosque de caldén (*Neltuma caldenia* (Burkart) C.E Hughes & G.P Lewis). Hepper et al. (2013) analizaron los efectos del tipo de vegetación dominante sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo del caldenal pampeano y encontraron que ésta influía sobre algunas propiedades edáficas, como el carbono orgánico total. En los parches con presencia de árboles de caldén, la descomposición de los residuos vegetales podría estar restringida por la presencia de estos y por la mayor cobertura del suelo, tanto por vegetación como por broza. Estos factores determinan una menor temperatura del suelo y por lo tanto menor descomposición por los microorganismos. En el mismo sentido, Buschiazzo et al. (2004) demostraron para el mismo ambiente (caldenal) que la acumulación de la materia orgánica (MO) estaba condicionada por la cobertura arbórea y la textura del suelo, particularmente por la fracción limo y arcilla. Además, que la mayor o menor influencia de estas dos variables sobre la distribución de MO estaba condicionada por la densidad y uniformidad de la cobertura arbórea.

En general, la intensidad y la temperatura alcanzadas durante las quemas prescriptas que se realizan en otoño-invierno (aproximadamente 200 – 300 °C) son menores que las que ocurren durante un incendio natural, que comúnmente se produce en época estival (en el caldenal pueden llegar a superar los 600 °C). En un estudio realizado por Hepper et al. (2008) en muestras de suelo provenientes de áreas de bosque de caldén (*N. caldenia*) sometidas a distintas temperaturas (rango de 100 a 600 °C) se evidenciaron cambios importantes sobre las propiedades químicas del suelo. A medida que aumentó la temperatura se observaron disminuciones del contenido de carbono orgánico, de nitrógeno total, de la relación C/N, de la capacidad de intercambio catiónico e incluso se identificaron cambios texturales superficiales. La fracción erosionable por el viento (FE) de un suelo es un indicador de la susceptibilidad del riesgo a la erosión eólica. El mismo indica la proporción de agregados que son fácilmente erosionables por el viento (<0,84 mm), y está directamente relacionado con las tasas potenciales de erosión eólica. La FE ha sido utilizado para evaluar el riesgo de erosión y la influencia de diferentes parámetros en la región semiárida pampeana (Colazo y Buschiazzo, 2010; de Oro et al., 2019), aunque no existen antecedentes que evalúen cuál es el efecto del fuego sobre suelos de bosque nativos desde el punto de vista del control de la erosión eólica. Otros estudios han reportado entre los cambios físicos una disminución de la fracción arcilla (Buschiazzo et al., 2007) que, sumado a disminuciones en el contenido de compuestos orgánicos puedan afectar la microagregación y conducir a la degradación de la microestructura del suelo, lo que puede aumentar la susceptibilidad de estas superficies a erosionarse por la acción del viento. Posiblemente, el tipo de vegetación dominante, ya sea herbácea o leñosa, que determina los contenidos iniciales de COT a nivel superficial, puedan influir de manera diferencial en los cambios físicos del suelo a altas temperaturas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la temperatura (rango de 100-600 °C), en un suelo de bosque de caldén con diferente cobertura vegetal sobre las propiedades físicas del suelo: textura, microagregación y fracción erosionable.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la ecorregión del Espinal, distrito del Caldén, en la provincia de La Pampa (Figura 1) y pertenece a la Región Semiárida Pampeana Central (RSPC). El Caldén, característico de la RSPC, se extiende entre las isohietas de 400 y 600 mm, y ocupa principalmente áreas bajas y depresiones. La temperatura media anual es de 15,5 °C, mientras que para los meses más fríos (junio a septiembre) es de 8 °C y para los meses de verano es de 23,2 °C (Cano et al., 1980). Los vientos predominantes son del noroeste (cálido y húmedo) y del suroeste (frío y seco). La velocidad promedio es de 10 km.h⁻¹ y los valores máximos se registran en primavera. Suelen formarse tormentas eléctricas en los meses de verano (Cano et al., 1980).

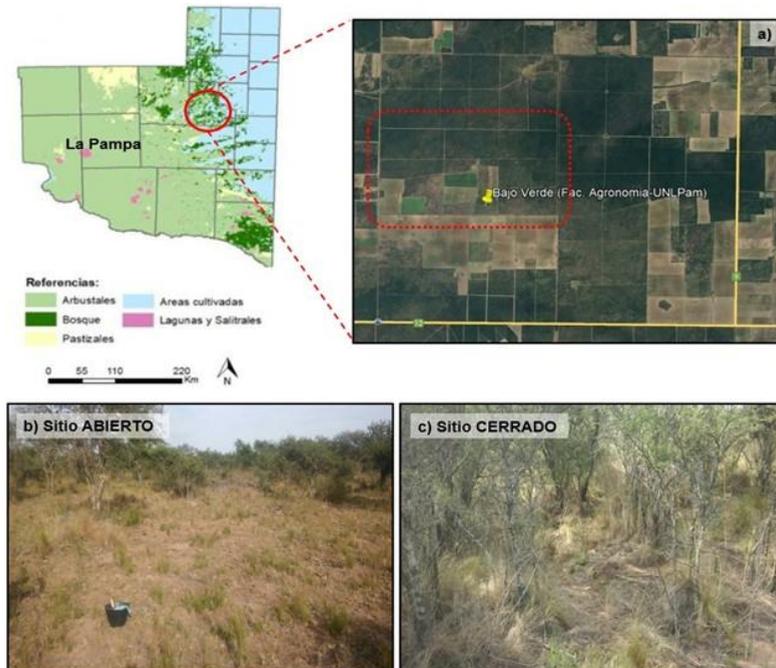


Figura 1. a) Ubicación del sitio de muestreo "Bajo Verde (FA, UNLPam)" en la provincia de La Pampa. b) Sitio de muestreo con parche de vegetación Abierta y c) Sitio de muestreo con parche de vegetación Cerrado.

Figure 1. a) sampling site location "Bajo Verde (FA, UNLPam)" in La Pampa province. b) Sampling site with an open vegetation patch and c) Sampling site with a closed vegetation patch.

Este distrito se caracteriza por tener como especie dominante al caldén (*N. caldenia*) que forma bosques xerófilos más o menos densos, sabanas con gramíneas, áreas medianosas con vegetación psammófila y matorrales o estepas halófilas (Cabrera, 1976). Según Morici et al. (2009) en la actualidad posee una gran heterogeneidad estructural con la vegetación distribuida en parches por efecto del pastoreo. En el bosque abierto (denominado en el presente trabajo como "sitio Abierto") la cobertura arbórea no supera el 20 % (*N. caldenia* y *Schinus fasciculatus*) y la proporción de especies forrajeras es importante (*Poa ligularis*, *Piptochaetium napostaense*, *Nassella tenuis*, *Digitaria californica*, *Bothriochloa springfieldii*).

Por su parte, en el bosque denso (denominado en el presente trabajo como "sitio Cerrado") la cobertura arbórea supera el 50 % y entre las gramíneas predominan las especies no forrajeras

(*Jarava ichu*, *Nassella trichotoma*, *Nassella tenuissima*, *Amelichloa brachychaeta*). Las especies más relevantes del estrato arbustivo son: *Condalia microphylla*, *Lycium chilense*, *Lycium gilliesianum*, *Ephedra triandra*, *Chuquiraga erinacea*, *Larrea divaricata* y *Prosopidastrum angusticarpum* (Estelrich et al., 2005). Los suelos son Molisoles (Soil Survey Staff, 1993), que presentan cierta evolución genética con un horizonte superficial fértil y oscurecido (presencia de materia orgánica) conocido como epipedón mólico y leve estructuración. La textura varía entre franca y franca arenosa y el pH varía entre 6 y 8, además son suelos susceptibles a la erosión eólica (Buschiazzo et al., 2007).

Este estudio se llevó a cabo en el establecimiento “Bajo Verde” (36° 28' 48" S - 64° 35' 03" O) propiedad de la UNLPam, en el departamento de Toay (Figura 1a), el cual está inserto dentro del distrito del Caldén. El suelo del sitio seleccionado para el presente estudio tiene una textura franca (USDA).

Dentro del establecimiento “Bajo Verde” se seleccionaron dos sitios de muestreo: un sitio con parche de vegetación abierto (Figura 1b), dominado por estrato gramíneo-herbáceo sin influencia de leñosas y otro sitio con parche de vegetación cerrado (Figura 1c), dominado por estrato arbustivo y arbóreo. Dentro de cada sitio se tomaron, al azar, cinco muestras compuestas de suelo sin disturbar, de la parte superficial (2,5 cm). Las principales características de las muestras seleccionadas dentro de cada sitio se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físico-químicas de las muestras de suelo en los sitios de estudio. Donde DGM: diámetro geométrico medio y COT: contenido de carbono orgánico total. Los valores entre paréntesis para COT y pH indican el desvío estándar de los valores determinados en cada sitio (n= 5).

Table 1. Physicochemical characteristics of soil samples at the study sites. Where GMD: geometric mean diameter and TOC: total organic carbon content. Values in parentheses for TOC and pH indicate the standard deviation of the values determined at each site (n= 5).

Parámetros analizados	Sitio Abierto	Sitio Cerrado
Arcilla (0 – 3,9 µm)	13,86	12,74
Limo fino (3,9 – 31 µm)	19,99	20,44
Limo grueso (31 – 62,5 µm)	14,17	14,92
Distribución del tamaño de partículas (%)		
Arena muy fina (62,5 – 125 µm)	28,85	29,56
Arena fina (125 – 250 µm)	18,06	17,98
Arena media (250 – 500 µm)	4,37	3,8
Arena gruesa (500 – 1000 µm)	0,71	0,57
DGM (µm)	66,26	65,96
COT (g kg suelo ⁻¹)	24,1 (7,4)	27,2 (6,4)
pH	6,79 (0,40)	6,03 (0,72)

Ensayo y determinaciones de laboratorio

De cada una de las muestras para cada sitio de vegetación se tomó una masa de 100 g secada al aire y tamizada por 2 mm y se colocó en una cápsula de porcelana de 10 cm de diámetro. El tratamiento con diferentes temperaturas consistió en calcinar las muestras en mufla a 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C y 600 °C, con un tiempo de exposición a la temperatura máxima de 5 minutos (modificado de Hepper et al., 2008). Luego de que las muestras fueran sometidas a diferentes temperaturas, una alícuota de cada una y otra del testigo (sin calcinación, 0 °C), se conservaron en bolsas de polietileno con sus respectivos rótulos, hasta el momento de realizar los análisis físico-químicos.

Sobre las muestras testigo y las sometidas a diferentes temperaturas (0 – 600 °C) se determinó:

- Carbono orgánico total (COT) por el método de oxidación húmeda de Walkley y Black (Walkley y Black, 1934).
- Granulometría: distribución del tamaño de partículas (DTP) con contador de partículas láser (Modelo Malvern Mastersizer) en dos condiciones: con tasas de dispersión altas y bajas. El tratamiento con dispersión alta (c/d) implicó la oxidación de la materia orgánica con peróxido de hidrógeno y un tratamiento ultrasónico durante 20 segundos. El tratamiento con dispersión baja consistió en colocar las muestras solo en agua, razón por la cual para simplificar nomenclatura lo denominaremos sin dispersión (s/d). A partir del análisis DTP, se calculó un índice relativo de microagregación (MiA) a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{MiA (\%)} = ([\text{Arcilla(c/d)} - \text{Arcilla(s/d)}] + [\text{Limo(c/d)} - \text{Limo(s/d)}]) * \text{COT} \quad \text{Ec. (1)}$$

donde, el primer término corresponde a la fracción arcilla (< 3,9 μm , en %) y el segundo a la fracción limo (3,9 – 31 μm , en %) ambos con (c/d) y sin dispersión (s/d), y COT son los contenidos de carbono orgánico total expresando en %. Ambas fracciones (limo y arcilla) se eligieron debido a que algunos autores (Iturri y Buschiazzi, 2014) han encontrado que en suelos loésicos de la región central de Argentina se potencian las propiedades electroquímicas que pueden mejorar la agregación no sólo por arcilla, sino también por limo, principalmente limo fino y medio que representan un 79 % de la capacidad de intercambio catiónico de la fracción total de limo. La alta carga electrostática de la fracción limo fino y medio puede permitir la formación de microagregados mediante la asociación con otras partículas minerales (arcilla y limo) y orgánicas (COT). Además, Mataix-Solera et al. (2011) encontraron que en suelos de textura arenosa las fracciones texturales finas y el carbono orgánico son los principales componentes que favorecen la formación y estabilidad de los microagregados en el suelo.

A partir de los datos de DTP obtenidos para los tratamientos con baja dispersión (s/d) de muestras se determinó la proporción de microagregados <1000 μm por rango de temperaturas para cada sitio, lo cual permitió evaluar los cambios producidos sobre la proporción de microagregados por el efecto de la temperatura. Debido a que para obtener la información del tamaño de microagregados las muestras en este tratamiento son inmersas en agua, puede considerarse que los microagregados tienen cierta estabilidad, resistiendo las fuerzas de dispersión que el propio medio líquido otorga.

La fracción erosionable por el viento (FE) de un suelo se calculó mediante la ecuación (2) desarrollada por López et. al. (2007) para suelos de la región semiárida pampeana donde la relación arena/arcilla es menor que el rango definido por la ecuación de Fryrear et al. (1994).

$$\text{FE} = 9,98 + 6,91 (\text{arena/arcilla}) + 14,1/\text{MO} \quad \text{Ec. (2)}$$

donde, arena es el porcentaje de partículas de un tamaño entre 62,5-1000 μm , arcilla es el porcentaje partículas < 3,9 μm ambos determinados mediante el contador de partículas laser y MO es el porcentaje del contenido de materia orgánica del suelo.

Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos para las variables estudiadas se analizaron mediante regresiones simples, gráficos de barra, ANOVA y Test LSD de Fisher de comparación de medias con el fin de comparar las proporciones de COT con el incremento de la temperatura en cada sitio. Se utilizó el programa estadístico InfoStat (Di Renzo et al., 2002) con un nivel de significancia (α) de 0,05 y las relaciones entre las distintas variables fueron analizadas con Microsoft Excel.

RESULTADOS

Carbono orgánico total

La Figura 2 muestra los contenidos de COT a medida que se incrementa la temperatura en cada sitio de muestreo con diferente cobertura vegetal (Abierto y Cerrado). En el sitio Abierto, los contenidos de COT variaron entre 24,11 g.kg suelo⁻¹ a 0 °C y 1,97 g.kg suelo⁻¹ a 600 °C, mientras

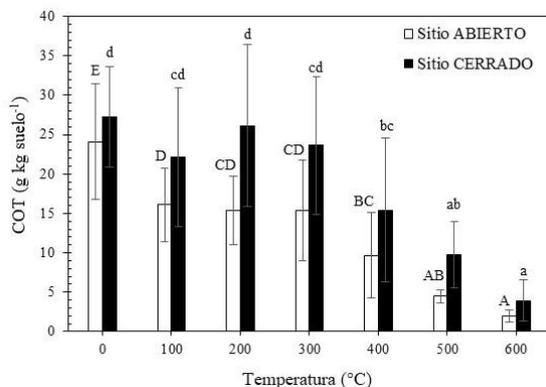


Figura 2. Contenido de carbono orgánico total (COT, en g.kg de suelo⁻¹) del suelo a diferentes temperaturas en los sitios Abierto y Cerrado. Letras diferentes dentro de un mismo sitio indican diferencias significativas entre las temperaturas evaluadas ($p < 0,05$; $n = 35$). Las barras de error muestran el desvío estándar del contenido de COT a cada temperatura para cada sitio ($n = 5$).

Figure 2. Total soil organic carbon content (TOC, g.kg soil⁻¹) at different temperatures in open and closed sites. Different letters within the same site indicate significant differences between the evaluated temperatures ($p < 0.05$; $n = 35$). Error bars show standard deviation of TOC content at each temperature for each site ($n = 5$).

que en el sitio Cerrado los contenidos de COT oscilaron entre 27,24 g.kg suelo⁻¹ a 0 °C y 3,91 g.kg suelo⁻¹ a 600 °C.

En el sitio Abierto, el testigo presentó los contenidos de COT más altos, los cuales disminuyeron con el incremento de la temperatura ($p < 0,05$). Entre 100 y 300 °C se redujeron significativamente con respecto al testigo ($p < 0,05$) y fueron similares entre sí (~15,6 g.kg suelo⁻¹). A partir de los 400 °C (9,7 g.kg suelo⁻¹) se redujeron hasta los 600 °C, temperatura a la cual se encontraron los valores más bajos de COT (1,97 g.kg suelo⁻¹) ($p < 0,05$).

En el sitio Cerrado, aunque las tendencias en las reducciones de COT con la temperatura fueron similares a lo que ocurrió en el sitio Abierto, no hubo reducciones significativas hasta los 400 °C. Los contenidos de COT fueron similares entre los 0 °C y 300 °C, con un valor promedio para el rango de temperatura de 24,8 g.kg suelo⁻¹ ($p > 0,05$). A partir de los 400 °C, los contenidos de COT disminuyeron (15,4 g.kg suelo⁻¹), siendo significativa esta reducción solo a los 500 °C (9,8 g.kg suelo⁻¹) y 600 °C (3,9 g.kg suelo⁻¹) ($p < 0,05$).

Además, la vegetación predominante sobre la superficie, condicionó el grado de descomposición/combustión del COT con el incremento de la temperatura. En el sitio Abierto la reducción en el contenido de COT, en relación al testigo, fue de 33, 36, 36, 60 y 81 % a los 100, 200, 300, 400 y 500 °C, respectivamente. Mientras que en el sitio Cerrado la reducción fue de 19, 4, 13, 43 y 64 % a los 100, 200, 300, 400 y 500 °C, respectivamente.

Distribución del tamaño de partículas del suelo

La Figura 3 muestra el cambio en la distribución del tamaño de partículas en las muestras de suelo sometidas a las diferentes temperaturas, para cada sitio de muestreo. En ambos sitios, se observó que hasta los 400 °C los contenidos de arcillas no cambiaron sustancialmente, en ninguno de los dos sitios, en relación al testigo. A partir de los 500 °C se observó una disminución del contenido de arcillas, con un valor promedio para el rango de 500-600 °C de 34 % en el sitio Abierto y de 37 % en el sitio Cerrado, en relación al testigo. Sin embargo, los contenidos de arcilla más bajos se dieron, para ambos sitios, a los 600 °C con valores de 7,4 y 7 % respectivamente.

En ambos sitios, los contenidos de limo (fino y grueso) aumentaron a temperaturas superiores a los 500 °C, aunque dicho incremento fue más importante en la fracción limo grueso donde alcanzaron, para el rango 500-600 °C, valores promedio del 20,8 y 22 % para sitio Abierto y Cerrado respectivamente, en relación al testigo. Las fracciones más finas de las arenas (<250 µm), en ambos sitios, tuvieron un leve incremento a las temperaturas más elevadas (500-600 °C) mientras que, las fracciones más gruesas (>250 µm) se redujeron, y por encima de los 500 °C esta reducción fue más marcada. La fracción arena muy fina (62,5-125 µm) en ambos sitios, se incrementó un 8 %

(promedio para el rango 500-600 °C) mientras que la fracción arena fina (125-250 µm) no superó el 4 %, en relación al testigo. Por otra parte, los contenidos de arenas medias y gruesas tuvieron una mayor diferencia entre sitios y, a pesar de que ambos contenidos disminuyeron en relación al testigo, los mayores valores de reducción se dieron en el sitio Abierto y a las máximas temperaturas evaluadas (500-600 °C). En el sitio Abierto, las arenas medias (250-500 µm) decrecieron un 30 % para el rango de temperatura de 100 a 400 °C, y un 50 % para el rango de temperaturas 500-600 °C, mientras que las arenas gruesas (500-1000 µm) decrecieron un 14 y un 75 % para los mismos rangos de temperaturas. Por otra parte, en el sitio Cerrado las reducciones para los contenidos de ambas fracciones, media y gruesa, no superaron el 15 % para el rango 100-400 °C y el 35 % para el rango 500- 600 °C. En ambos sitios a los 600 °C la textura del suelo cambio de franco a franco arenoso, principalmente por el aumento de las arenas totales y la disminución del contenido de arcilla.

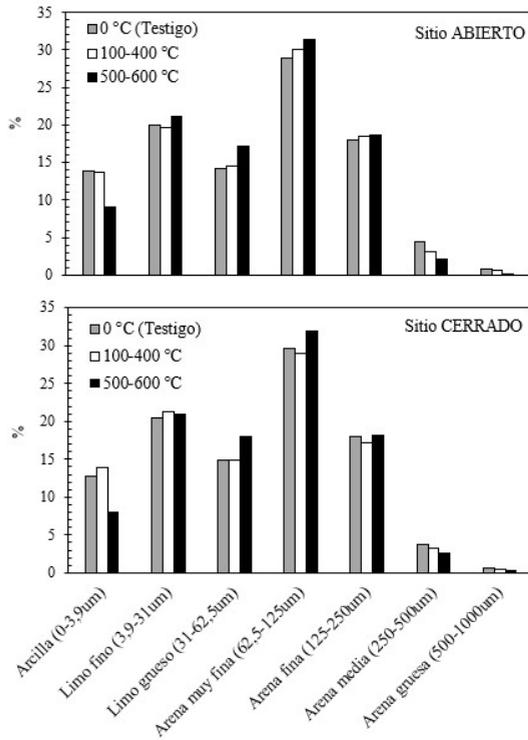


Figura 3. Distribución del tamaño de partículas (%) para los rangos de temperatura (0, 100-400°C y 500-600 °C), para el sitio Abierto y el sitio Cerrado.

Figure 3. Particle size distribution (%) for temperature ranges (0, 100-400°C and 500-600 °C), at open and closed sites.

Microagregación

En la Figura 4 se muestra la relación entre el índice de microagregación calculado (MiA) y el incremento de la temperatura, para ambos sitios. Las variables se relacionaron de manera lineal y negativa ($p < 0,05$) en ambos sitios, es decir, que hubo una reducción del MiA con el incremento de la temperatura. Sin embargo, en el sitio Cerrado a los 200 °C el índice MiA aumentó a niveles inclusive superiores a los del testigo, para luego reducirse gradualmente con el incremento de la temperatura. Esto pudo deberse al aumento de los contenidos de las fracciones de arcilla y de limo fino (Figura 3) y a las variaciones en los contenidos de COT (Figura 2) a esa temperatura. Sin embargo, los mayores cambios, en comparación al testigo, se observaron a partir de los 400 °C, en ambos sitios. Hasta los 400 °C, el sitio Cerrado presentó mayores diferencias de MiA respecto al sitio Abierto.

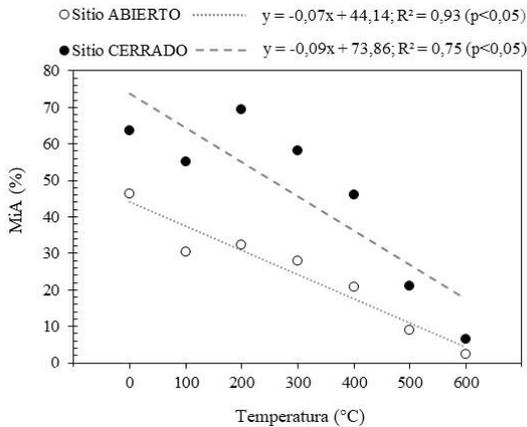


Figura 4. Correlación entre el Índice de microagregación (MiA%) de las muestras de suelo para las distintas temperaturas, para el sitio Abierto y el sitio Cerrado.

Figure 4. Correlation between Microaggregation Index (MiA%) of soil samples and temperatures, at open and closed sites.

En el mismo sentido, se puede observar que el cambio en el MiA en función de la temperatura varió entre sitios, a pesar de que estadísticamente las pendientes son iguales ($p < 0,05$). En el sitio Cerrado, inicialmente ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) el MiA fue mayor que en el sitio Abierto, pero a los $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ dado que el cambio fue ligeramente superior ($b = -0,09$), alcanzó valores de MiA similares al sitio Abierto. La disminución en la proporción de microagregados del suelo con el incremento de la temperatura, principalmente a partir de los $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, se debe posiblemente a la eliminación de la MO por combustión y a la destrucción de la estructura (Alcañiz et al., 2018). Hasta los $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, el sitio Cerrado presentó mayores diferencias de MiA respecto al sitio Abierto.

El incremento encontrado en este trabajo en las fracciones texturales tamaño limo, principalmente limo grueso, podría exponer a los suelos afectados por fuegos a mayores riesgos de erosión. Esto se debe al mayor contenido de fracciones granulométricas que no desarrollan cargas superficiales y, por lo tanto, a la menor posibilidad de la formación de microagregados (Sacchi et al., 2015). García-Corona et al. (2003) encontraron un incremento en el tamaño de microagregados del suelo con un aumento de la temperatura hasta los $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ aproximadamente, e inclusive un incremento en la resistencia a los agentes erosivos.

En la Figura 5 se muestran los cambios en la proporción de microagregados $<1000\text{ }\mu\text{m}$ para los rangos de temperaturas $100\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$, en relación al testigo. En el sitio Abierto, los microagregados $<30\text{ }\mu\text{m}$ no sufrieron variaciones importantes con un incremento de la temperatura. Se observó una leve reducción en el rango de temperaturas $100\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero luego se incrementó a los niveles iniciales en el rango de temperatura $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, se observó un aumento de los microagregados de $30\text{-}125\text{ }\mu\text{m}$ y $125\text{-}250\text{ }\mu\text{m}$ con el incremento de la temperatura, aunque los aumentos más significativos se produjeron en los microagregados de $30\text{-}125\text{ }\mu\text{m}$. En el sitio Cerrado, se observó que los microagregados $<30\text{ }\mu\text{m}$ se redujeron significativamente en el rango de temperaturas $100\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ en relación al testigo. Sin embargo a mayores temperaturas la proporción de microagregados se incrementó a niveles comparables al testigo. Para los agregados de $30\text{-}125\text{ }\mu\text{m}$ se observaron tendencias similares al sitio Abierto, con aumentos de la temperatura. Sin embargo, los microagregados de $125\text{-}250\text{ }\mu\text{m}$, aunque inicialmente aumentaron con la temperatura ($100\text{-}400\text{ }^{\circ}\text{C}$), entre los $500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ se redujeron. En relación a los microagregados de mayor tamaño ($250\text{-}1000\text{ }\mu\text{m}$), en ambos sitios se observó una reducción en la proporción con el incremento de la temperatura.

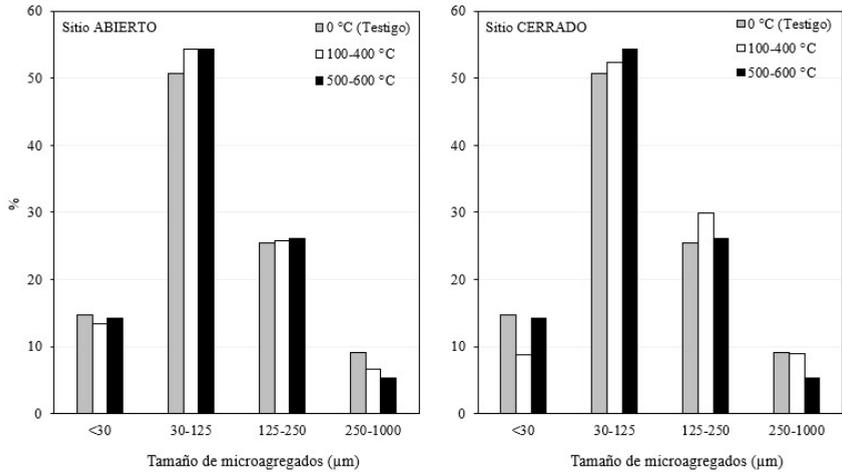


Figura 5. Distribución de microagregados ($\leq 1000 \mu\text{m}$) a los distintos rangos de temperaturas evaluadas, para cada sitio (Abierto y Cerrado).

Figure 5. Distribution of micro-aggregates ($\leq 1000 \mu\text{m}$) at different temperature ranges tested, at each site (open and closed).

En la figura 6 se muestra la relación entre el índice de microagregación (MiA) y la fracción erosionable (FE), a las distintas temperaturas evaluadas en los sitios Abierto y Cerrado.

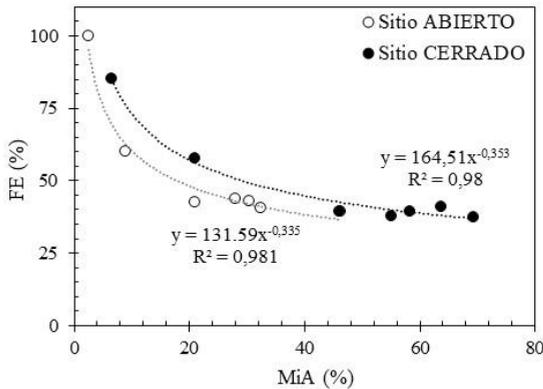


Figura 6. Relación entre el índice de microagregación (MiA) y la fracción erosionable (FE), a las distintas temperaturas y para cada sitio.

Figure 6. Relation between Microaggregation index (MiA) and erodible fraction (EF), at different temperatures and for each site.

Para ambos sitios, la FE no cambió sustancialmente hasta los 400 °C (42 % para el sitio Abierto y 39 % para el sitio Cerrado), en comparación con el sitio testigo. Sin embargo, a partir de 500 °C, la FE aumentó a 60 y 58 % para los sitios Abierto y Cerrado, respectivamente, con los valores más altos de FE a 600 °C (100 y 85 % para los sitios Abierto y Cerrado, respectivamente). Este aumento en la FE fue en detrimento de la microagregación del suelo (MiA), en ambos sitios (Figura 6). Los valores de FE alcanzados cuando se superaron los 400 °C, en ambos sitios, están por encima del

valor equivalente al umbral considerado para una erosión tolerable, determinado en 40 % (Colazo et al., 2023; Woodruff & Siddoway, 1965)

DISCUSIÓN

Las reducciones observadas en el contenido de COT con el incremento de la temperatura en el presente estudio concuerdan con Hepper et al. (2008), quienes encontraron que en un suelo de textura franca del Caldenal pampeano el COT disminuyó a partir de los 500 °C. Esto puede asociarse a la combustión de la materia orgánica, ya que a temperaturas de entre 200–250 °C esta comienza a alterarse y a los 500 °C se destruye por completo (Armas-Herrera et al., 2016; Ulery et al., 2017). En el mismo sentido, Denegri et al. (2014) en un estudio realizado sobre un suelo de textura franco arenoso del bosque de las Sierras de la provincia de Córdoba, encontraron que con un incremento de la temperatura el COT disminuyó gradualmente y que a los 500 °C se eliminó casi por completo. Sacci et al. (2015) en un estudio realizado sobre un suelo de textura franco limoso y franco fino del monte de las Sierras de Córdoba, observaron disminuciones del contenido de COT a partir de los 200-300 °C, e indicaron que partir de los 500 °C se producen pérdidas de entre un 80 % y 90 % debido a la combustión de la materia orgánica. Además, indicaron que a las mayores temperaturas las modificaciones son complejas de revertir debido al colapso de la fracción inorgánica coloidal y a la disminución del 90 % de la fracción orgánica. Por otro lado, García Corona et al. (2003) encontraron pérdidas de COT entre el 80 y 90 % para suelos forestales de textura franco arenoso y franco limoso cuando fueron sometidos a temperaturas superiores a los 380 °C. En el presente estudio, las reducciones en el contenido de COT a los 600 °C, respecto al testigo, fueron del 92 y 86 % para los sitios Abierto y Cerrado, respectivamente. Si bien todos los estudios previamente mencionados se desarrollaron en condiciones controladas de laboratorio (calentamiento del suelo en mufla) similares a las del presente estudio, las diferencias encontradas en los resultados podrían deberse a las diferentes texturas utilizadas en los distintos estudios.

Por otra parte, los resultados del presente estudio muestran que las disminuciones del COT difieren según el tipo de vegetación (material combustible) predominante en el sistema del bosque de Caldén, más allá de que se trate de sitios con un suelo de similar textura. Para un mismo suelo, la vegetación predominante sobre la superficie, podría afectar el grado de descomposición/combustión del COT con el incremento de la temperatura. La gran diversidad de resultados en la literatura consultada en relación a esta temática se debería a las diferentes propiedades de los suelos, los distintos tipos de fuego utilizados y las múltiples combinaciones entre dichos parámetros (Minervini et al., 2018).

En relación a la distribución del tamaño de partículas, se determinó que, en general, para ambos sitios, los cambios más importantes en los contenidos de las distintas fracciones texturales se produjeron a partir de los 500 °C, con los mayores cambios a los 600 °C. Estos resultados concuerdan en parte con Hepper et al. (2008) quienes encontraron en un suelo de textura franca, similar al utilizado en el presente estudio, reducciones en los contenidos de arcilla y limo, y aumentos de las fracciones arena fina, media y gruesa a partir de los 500 °C. Los autores atribuyen las reducciones en los contenidos de arcilla y limo a la descomposición térmica de las arcillas, que produce liberación de compuestos amorfos de silicio y aluminio los que actuarían como cementantes de partículas. El colapso de las partículas de arcilla conduce a la agregación de partículas más finas para formar partículas de tamaño arena y limo, es decir de mayor granulometría (Agbeshie et al., 2022). A diferencia de los resultados encontrados por Hepper et al. (2008), en el presente estudio se encontró un incremento de los limos, principalmente gruesos (31-62,5 µm). Tales diferencias podrían deberse a la interpretación de los resultados en función del sistema de clasificación granulométrico utilizado. En nuestro estudio, la fracción limo está representada por los tamaños de partículas entre 3,9 y 62,5 µm, debido a la utilización del sistema de clasificación granulométrica de Wentworth, mientras que en el estudio de Hepper et al. (2008) la fracción limo comprendió los tamaños de 2 a 50 µm debido a la utilización del sistema de clasificación USDA. Este desfasaje en los tamaños de partículas seleccionados podría haber ocasionado que el

incremento encontrado en nuestro estudio en los contenidos de la fracción de limo grueso se corresponda con el incremento de la fracción arena muy fina en el estudio antes mencionado. Heydari et al. (2017) presentaron hallazgos similares, y su explicación se basa en que cuando el suelo está expuesto a altas temperaturas hay una eliminación irreversible de los iones hidroxilo (OH⁻) y la destrucción de la estructura de la arcilla cristalina, lo que produce la cementación y agregación de partículas de arcilla al tamaño de arena. Asimismo, Minervini et al. (2018) manifiestan que uno de los efectos habituales del fuego en el suelo es el incremento de las fracciones de limo y arena en detrimento de la arcilla, lo cual en algunas circunstancias podría aumentar también la erodabilidad de los suelos quedando más propensos a la acción erosiva del viento. Estos autores además mencionan que el calentamiento del suelo resulta, en general, en la generación de texturas más gruesas debido principalmente a que la fracción granulométrica más afectada por el fuego es la arcilla que se agrega o se descompone y a que a temperaturas cercanas a los 400 °C se inicia el colapso de la estructura de los filosilicatos arcillosos. Blake et al. (2007), en un estudio sobre suelos quemados con vegetación de Eucalipto nativo de Australia, encontraron una disminución en la fracción de limo fino y un incremento en la fracción de arena fina (125-250 µm), debido a la formación de microagregados densos. Más allá de los distintos efectos de la temperatura reportados en numerosos estudios sobre las distintas fracciones texturales del suelo, la mayoría concuerda en que con temperaturas superiores a los 400-500 °C se pueden producir cambios importantes en las distintas fracciones, incluso se puede llegar a modificar la textura del suelo (Arocena et al. 2003; Blake et al., 2007; Hepper et al., 2008; Sacchi et al., 2015), como ocurrió en el presente estudio para la temperatura de 600 °C.

En relación al índice de microagregación (MiA), los resultados muestran una disminución a medida que se incrementó la temperatura, principalmente a partir de los 400 °C. Esto se debió posiblemente al incremento en los contenidos de arcilla y limo y a la reducción en los contenidos de COT, a partir de la eliminación de la MO por combustión y a la destrucción de la estructura (Alcañiz et al., 2018). Mataix-Solera et al. (2011), en una revisión acerca de los efectos del fuego sobre la agregación del suelo mencionan que, en suelos de textura arenosa, poco desarrollados, en los cuales el COT es quizá el principal agente responsable de la formación de agregados y de su estabilidad, su pérdida favorece una fuerte desagregación y una reducción en la estabilidad de los agregados.

El incremento encontrado en este trabajo en las fracciones texturales tamaño limo, principalmente limo grueso, podría exponer a los suelos afectados por fuegos a mayores riesgos de erosión. Esto se debe al mayor contenido de fracciones granulométricas que no desarrollan cargas superficiales y, por lo tanto, a la menor posibilidad de la formación de microagregados (Sacchi et al., 2015). Estudios previos han demostrado que la proporción de agregados del suelo (micro y macroagregados) puede cambiar por el efecto de la temperatura (Andreu et al., 2001; García-Corona et al., 2003). García-Corona et al. (2003) encontraron que el incremento de la temperatura favorece la fragmentación de los macroagregados en microagregados, por lo que se observa una ligera reducción en el tamaño de los agregados a bajas temperaturas, y una importante desagregación a partir de los 380 °C con desaparición casi total de los agregados mayores de 1 mm. Estos resultados los relacionan con las pérdidas de carbono por combustión. Los cambios en el tamaño de los microagregados del suelo están directamente relacionados con la estabilidad de los mismos, la que depende de la cohesividad interna entre las partículas de arcilla que los constituyen. Esta cohesividad está mediada por agentes aglutinantes como las sustancias húmicas, que forman fuertes complejos con Fe, Al y Mg. Estos aglutinantes se ven profundamente afectados por la temperatura del fuego y, en relación con las arcillas, promueven cambios importantes en la estructura del suelo. Cuando estos agentes aglutinantes, principalmente la MO, se ven reducidos con el incremento de la temperatura se produce una ruptura o desagregación de los agregados y una reducción de la proporción de microagregados. Sin embargo, también puede ocurrir un aumento en la agregación y estabilidad de los agregados con la temperatura debido a las transformaciones térmicas (recristalización) de los compuestos de Fe y Al (Giovannini et al., 1988; Mataix-Solera et al., 2011).

Posiblemente, el incremento de la proporción de los microagregados con el aumento de la temperatura, principalmente los comprendidos entre los 30 y 250 μm , dé como resultado agregados más estables por la cementación de componentes inorgánicos del suelo. A pesar de esto la estabilidad de los mismos podría verse afectada debido a los bajos contenidos de MO que contendrían, lo que favorecería la formación de microagregados densos.

El aumento del contenido de arena y la disminución de la arcilla al aumentar la temperatura produjeron un aumento en la fracción erosionable (FE) del suelo. Minervini et al. (2018) mencionan que uno de los efectos comunes del fuego sobre el suelo es el aumento de las fracciones de limo y arena en detrimento de la arcilla, lo que en algunas circunstancias también podría aumentar la erosionabilidad de los suelos. Los resultados encontrados en el presente estudio indican que, los cambios superficiales en relación a la granulometría y agregación por el efecto de las altas temperaturas ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$), incrementa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por el viento.

CONCLUSIONES

Los resultados indican que, con un incremento de la temperatura, los contenidos de carbono orgánico total disminuyeron en ambos sitios, y las reducciones más importantes se dieron a partir de los $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además, el tipo de vegetación presente en cada sitio determina el grado de combustión del carbono orgánico con el incremento de la temperatura. El material combustible que caracteriza al sitio Cerrado favorecería un menor grado de combustión, al actuar como amortiguadores del efecto de las altas temperaturas.

Los cambios en la distribución del tamaño de partículas, para ambos sitios, se evidenciaron claramente a partir de los $400\text{-}500\text{ }^{\circ}\text{C}$, con reducciones en los contenidos de arcilla e incrementos en los contenidos de limo, principalmente limo grueso. En relación a las arenas, en general y para ambos sitios, las fracciones $<250\text{ }\mu\text{m}$ se incrementaron a las temperaturas más elevadas ($500\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$), mientras que las fracciones $>250\text{ }\mu\text{m}$ se redujeron, con una reducción más acentuada por encima de los $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir de los $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, en ambos sitios, los cambios en las fracciones granulométrica produjeron cambios en la textura del suelo, y se pasó de un suelo de textura franca a uno de textura franca arenosa.

Las reducciones en los contenidos de carbono orgánico total y los cambios en los contenidos de arcilla y limo fino, produjeron una fuerte reducción en el índice de microagregación del suelo con el incremento de la temperatura, en ambos sitios. Esto indica que los agentes que favorecen la formación y estabilidad de los agregados del suelo se pierden o transforman durante fuegos de altas temperaturas. Además, se encontró una disminución en los microagregados de $125\text{-}1000\text{ }\mu\text{m}$ y un incremento de los de $30\text{-}250\text{ }\mu\text{m}$. Sin embargo, a pesar de que con el incremento de la temperatura se incrementó la proporción de una parte de los microagregados, debido a la alta combustión del carbono orgánico y reducción de la fracción más fina y reactiva del suelo, posiblemente dichos agregados estén formados a partir de la recristalización de los compuestos de Fe y Al, lo que produce la formación de microagregados densos.

Los aumentos de las fracciones de arena y disminuciones en la de arcilla con la temperatura, incrementaron la fracción erosionable del suelo (FE). Este aumento fue en detrimento del índice de microagregación, en ambos sitios. Estos resultados indican que, los cambios superficiales en relación a la granulometría y agregación por el efecto de las altas temperaturas ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$), incrementan la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por el viento. Tanto el índice MiA como el parámetro FE podrían utilizarse como indicadores para monitorear el efecto de las temperaturas de quema en estos ambientes de bosque xerófilo, en el cual el fuego es una herramienta ampliamente utilizada para mejorar la calidad y disponibilidad de forraje. Estudios complementarios de campo son necesarios para reforzar y profundizar los resultados encontrados en condiciones de laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por un proyecto de investigación acreditado en la Facultad de Agronomía, UNLPam (Res. 129/23).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, 1419-1441. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01475-4>
- Agee, J. K. (1993). *Fire ecology of Pacific Northwest forest*. Island Press.
- Alcañiz, M., Outeiro, L., Francos, M., & Úbeda, X. (2018). Effects of prescribed fires on soil properties: A review. *Science of the Total Environment*, 613-614, 944-957. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.144>
- Andreu, V., Imeson, A. C., & Rubio, J. L. (2001). Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44, 69-84. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00177-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00177-6)
- Are, K. S., Oluwatosin, G. A., Adeyolanu, O. D., & Oke, A. O. (2009). Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 103(1), 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.08.011>
- Armas-Herrera, C. M., Martí, C., Badía, D., Ortiz-Perpiñá, O., Girona-García, A. y Porta, J. (2016). Immediate effects of prescribed burning in the Central Pyrenees on the amount and stability of topsoil organic matter. *Catena*, 147, 238-244. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.016>
- Arocena, J. M., & Opio, C. (2003). Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 113, 1-16. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00312-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00312-9)
- Blake, W., Droppo, G. I., Wallbrink, P. J., Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Humphreys, G. S. (2007). Structural characteristics and behavior of fire-modified soil aggregates. *Geophysical Research*, 112, 143-150. <https://doi.org/10.1029/2006JF000660>
- Buschiazzo, D. E., Estelrich, H. D., Aimar, S. B., Viglizzo, E., & Babinec, F. J. (2004). Soil texture and tree coverage influence on organic matter. *Journal of Range Management*, 57, 511-516. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/81859/CONICET_Digital_Nro.c87357a6-968f-4d8f-b76b-8130d4bec153_B.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Buschiazzo, D. E., Zobeck, T. M., & Abascal, S. A. (2007). Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina. *Journal of Arid Environments*, 69, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.08.013>
- Cabrera, A. L. (1976). *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería. Regiones Fitogeográficas Argentinas*. Segunda edición. Tomo II, Fascículo 1. Editorial Acme S. A. C. I.
- Cano, E., Fernández, B. y Montes, M. (1980). La Vegetación de la Provincia de La Pampa y Carta de Vegetación 1:500000. En *Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la provincia de La Pampa*. INTA – Facultad de Agronomía, UNLPam.
- Colazo, J. C., Scherger, E., Torregrosa, R., Álvarez, C. y Almirón, S. (2023). Riesgo de erosión eólica en diferentes sistemas productivos del sur de Córdoba. *Ciencia del Suelo*, 41(2), 213-222.
- Colazo, J. C., & Buschiazzo, D. E. (2010). Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina. *Geoderma*, 159, 228-236.
- DeBano, L. F., Neary, D. & Folliott, D. G. (1998). *Fire's effects on ecosystems*. John Wiley and Sons.
- de Oro, L. A., Colazo J. C., Avelilla, F., Buschiazzo, D. E., & Asensio, C. (2019). Relative soil water content as a factor for wind erodibility in soils with different texture and aggregation. *Aeolian Research*, 37, 25-31.
- Denegri, A., Toranzo, L., Rubenacker, A., Campitelli, P. y Karlin, M. (2014). Efecto de los incendios forestales sobre las propiedades del suelo. *NEXO Agropecuario*, 2(1-2), 10-14.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2002). InfoStat versión 1.1. Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>
- Estelrich, H. D., Fernández, B., Morici, E. F. A. y Chirino, C. C. (2005). Persistencia de los cambios provocados por los fuegos controlados en diferentes estructuras del bosque de caldén (*Prosopis caldenia* Burk). *Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 16(1-2), 23-30. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/4619>
- Estelrich, H. D., Suárez, C. E., Morici, E. F. A. (2022). Capítulo 4: El fuego en área de bosque con pajonal y fachinales. En H. D. Estelrich y C. E. Suárez (Eds.), *El bosque de Caldén: un abordaje multidisciplinario para su manejo y conservación* (pp. 69-83). EdUNLPam.
- Fryrear, D. W., Krammes, C. A., Williamson, D. L., & Zobeck, T. M. (1994). Computing the wind erodible fraction of soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49, 183-188.
- García-Corona, R., Benito, E. y de Blas, E. (2003). Efectos del calentamiento sobre la agregación de los suelos. *Edafología*, 10(3), 175-180. <https://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/2003/documento%2020.pdf>
- Giovannini, G., Lucchesi, S. y Giachetti, M. (1988). Effect on heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 146, 255-262. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1988/10000/Effect_of_Heating_on_Some_Physical_and_Chemical.6.aspx
- Hepper, E. N., Urioste, A. M., Belmonte, V. y Buschiazzo, D. E. (2008). Temperaturas de quema y propiedades físicas y químicas de suelos de la región semiárida pampeana central. *Ciencia del Suelo*, 26(1), 28-38. https://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_26n1/Hepper%2026%201.pdf

- Hepper, E. N., Larroulet, M. S., Belmonte, V. y Urioste, A. M. (2013). Propiedades edáficas de un suelo del caldenal pampeano en parches con diferente vegetación. *Revista de la Facultad de Agronomía UNLPam*, 23(2), 5-15. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/3146/3057>
- Heydari, M., Rostamy, A., Najafi, F. y Dey, D. C. (2017). Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran. *Journal of Forestry Research*, 28(1), 95-104. https://www.researchgate.net/publication/305630488_Effect_of_fire_severity_on_physical_and_biochemical_soil_properties_in_Zagros_oak_Quercus_brantii_Lindl_forests_in_Iran
- Iturri, L. A., & Buschiazzo, D. E. (2014). Cation exchange capacity and mineralogy of loess soils with different amounts of volcanic ashes. *Catena*, 121, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.04.021>
- Larroulet, M. S., Hepper, E. N., Álvarez Redondo, M. P., Belmonte, V. y Urioste, A. M. (2016). The Caldenal ecosystem: Effects of a prescribed burning on soil chemical properties. *Arid Land Research and Management*, 30(1), 105-119. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1046198>
- López, M. V., de Dios Herrero, J. M., Hevia, G. G., Gracia, R., & Buschiazzo, D. E. (2007). Determination of the wind-erodible fraction of soils using different methodologies. *Geoderma*, 139, 407-411. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.03.006>
- Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., & Zavala, L. M. (2011). Fire effects on soil aggregation: A review. *Earth-Science Reviews*, 109, 44-60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.08.002>
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M. y Taboada, M. A. (2014). Efectos del fuego en la selva pedemontana de las yungas jujeñas. Resúmenes XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas". Bahía Blanca, Argentina.
- Minervini, M. G., Morrás, H. J. M. y Taboada, M. A. (2018). Efectos del fuego en la matriz del suelo. Consecuencias sobre las propiedades físicas y mineralógicas. *Ecología Austral*, 28, 012-027. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.127>
- Morici, E. F. A., Doménech García, V., Gómez Castro, G., Kin, A. G., Saenz, A. M. y Rabortnikof, C. M. (2009). Diferencias estructurales entre parches de pastizal del caldenal y su influencia sobre el banco de semillas, en la provincia de La Pampa, Argentina. *Agrociencia*, 43, 529-537. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/738/738>
- Sacchi, G., Campitelli, P., Soria, P. y Ceppiu, S. (2015). Influencia de temperaturas de calentamiento sobre propiedades físicas y químicas de suelos con distinto material parental y uso antrópico. *Spanish Journal of Soil Science*, 5, 3. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6474644>
- Soil Survey Division Staff. (1993). *Soil Survey Manual*. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- Ulery, A. L., Graham, R. C., Goforth, B. R., & Hubbert, K. R. (2017). Fire effects on cation exchange capacity of California forest and woodland soils. *Geoderma*, 286, 125-130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.028>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Woodruff, N. P., & Siddoway, F. H. (1965). A wind erosion equation. *Soil Science Society of America, Proceedings*, 29(5), 602-608.