

ESTIMACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL ANTE INCENDIOS FORESTALES EN CUENCA DEL ARROYO VENTANA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Rodríguez Souilla J.^{ab}, y Gaspari F. J. ^a

^a Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCyF. Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA

^b Becario de Estímulo a las Vocaciones Científicas (EVC) - Consejo Interuniversitario Nacional (CIN), ARGENTINA

e-mail: cuencas@agro.unlp.edu.ar

RESUMEN

Los pastizales pampeanos están adaptados ecológicamente a la ocurrencia de incendios. Si bien estos eventos representan un componente natural del ecosistema, el avance de especies exóticas y el manejo de los sistemas agropecuarios han modificado su frecuencia e intensidad. En caso de incendios forestales, el impacto del evento dependerá de la intensidad, recurrencia y duración, y se manifiesta especialmente al poco tiempo de sucedido el evento, que principalmente desencadenan procesos erosivos. El objetivo fue cuantificar la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial en la Cuenca del Arroyo Ventana, Provincia de Buenos Aires, sitio donde se registraron dos incendios que afectaron gran superficie en los años 2013 y 2018. El método de estimación aplicado fue la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) mediante un procesamiento espacial de datos (vectoriales, ráster y tabulares) y aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes satelitales y cartografía, con el Software de código abierto QGIS. También se aplicó la USLE para el año 2020 para evaluar momentos posteriores a los eventos mencionados. Se obtuvo que la erosión hídrica superficial actual es >50 Mg/ha.año en el 58 % de la Cuenca. Los incendios en áreas boscosas aumentan aún más la erodabilidad de los suelos que en pastizales, consecuentemente, la vulnerabilidad de estos a la erosión hídrica superficial ante eventos torrenciales. Por su parte, la ventana de perturbación es mayor en el tiempo ante incendios forestales que sobre pastizales, observando que este ecosistema presenta gran resiliencia ante incendios. Asimismo, se evidenció el importante rol que tienen los sitios forestales como reguladores hídricos y de protección de sitios altamente erodables de cuencas hidrográficas. Si bien este ecosistema sin vegetación arbórea presenta una alta vulnerabilidad luego de los incendios, la ocurrencia de incendios forestales empeora dicha situación.

Palabras clave: Incendios forestales; USLE; Cuenca hidrográfica; Erosión hídrica.

INTRODUCCIÓN

En áreas rurales, el reemplazo de coberturas naturales puede ocurrir por la ocurrencia de incendios. En caso de incendios forestales, el impacto del evento dependerá de la intensidad, recurrencia y duración del mismo, y se manifiesta, sobre todo, al poco tiempo de sucedido el evento. Estos efectos pueden ser directos tales como pérdida de animales, de vegetación y degradación del suelo. Los efectos indirectos, por su parte, corresponden desde la erosión del suelo y la contaminación del agua hasta el ensuciamiento de represas y deslizamientos de tierra. El suelo después de un incendio es susceptible a sufrir erosión, debido a lo expuesto que queda al viento y agua (Caon, 2014, Shakesby, 2011).

Las repercusiones en el suelo dependen de la topografía del lugar, intensidad del proceso de erosión, tasa de regeneración de la cubierta vegetal post-incendio, recurrencia, intensidad y duración del fuego. Los principales impactos de los incendios forestales son a nivel de las propiedades (físicas, químicas y biológicas) y productividad del suelo y se expresan por la generación de erosión, pérdida de nutrientes, disminución de la materia orgánica, alteración de la vegetación. Además, éstos se ven afectados principalmente en sus propiedades físicas, como la repelencia y la estabilidad de los agregados, aumentando su erosionabilidad de acuerdo con la severidad del incendio.

Resulta un desafío la cuantificación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica después de un incendio, dependiendo esta de la ocurrencia de precipitaciones los primeros meses luego del evento (“ventana de alteración” (Prosser & Williams, 1998)) y sus respectivas intensidades y duraciones.

Con relación a los incendios, la mayor pérdida de suelo por erosión suele producirse en los primeros meses inmediatamente posteriores a estos, y puede verse especialmente incrementada si durante este período, considerado crítico, se producen episodios de lluvias torrenciales (Ramos, 2010).

El modelo Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (*Universal Soil Loss Equation* (USLE)) es un modelo paramétrico para estimar la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas, formulado por Wischmeier y Smith, en el año 1965. Es un modelo matemático empírico, que utiliza información sobre precipitación, suelo, pendiente del terreno y de uso y manejo del suelo, y combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica, para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación (Wischmeier & Smith, 1978). La USLE es una función de la erosividad de las precipitaciones, de la erodabilidad del suelo y de uso del suelo que permite determinar las tasas de erosión para diferentes sistemas y manejo de suelos. Al comparar estas tasas de erosión con la tolerancia edáfica, se pueden seleccionar las combinaciones de cultivo y manejo apropiadas para el control adecuado de la degradación por erosión hídrica superficial.

En la zona serrana del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires, la erosión hídrica superficial provoca una decreciente producción agropecuaria, consecuencia del actual manejo del suelo, la pérdida del horizonte superficial y de la disponibilidad de agua superficial y subterránea. En las últimas décadas, dada la capacidad productiva de los suelos de esta región, los pastizales pampeanos, han sido sustituidos por agroecosistemas y evidencian una importante degradación y un escaso grado de conservación (Vázquez & Zulaica, 2011) con la manifestación de incendios de diversa agresividad.

Los incendios representan un componente natural del ecosistema de pastizal pampeano. Sin embargo, el avance de la urbanización sobre espacios naturales tuvo como consecuencia que la sociedad los considere un disturbio que debe ser controlado. El hombre al avanzar sobre áreas de pastizales y forestales e intentar reducir los efectos de los incendios, alteró su frecuencia, intensidad y extensión. La Comarca de la Sierra de la Ventana no es ajena a esta situación, anualmente se registran fuegos con efectos cada vez más preocupantes. Dicho sitio ha sufrido naturalmente incendios a lo largo de su historia, pero en los últimos 20 años la ocurrencia es mayor y ha tenido consecuencias negativas para la sociedad (Mihcalijos, 2018).

El objetivo del presente trabajo fue realizar una cuantificación de la pérdida anual de suelo debido a incendios en la Cuenca del Arroyo Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina, e interpretar variabilidad debida a dichos eventos.

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio corresponde a la Cuenca del Arroyo Ventana, cabecera este del río Sauce Chico, cuya superficie es de 75,95 km², ubicada en el Sistema Bonaerense de Ventania (38° 01' y 38° 07' S y 61° 57' y 62° 08' O) (Gaspari et al. 2009) (ver Fig. 1). Está formada por los arroyos La Ventana y San Juan y su curso principal corre en sentido E-O, siendo el afluente más caudaloso del Sauce Chico.

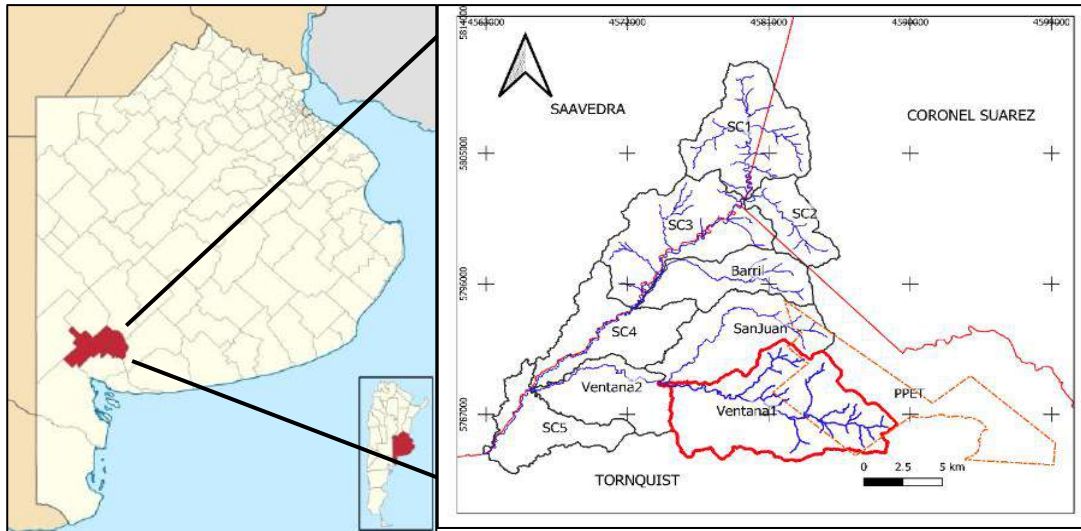


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio con la cuenca del Arroyo Ventana.

Fuente: Gaspari et al. (2019) Adaptación propia.

Las Sierras Australes de la Provincia de Buenos Aires conforman una unidad orográfica que representa uno de los ejemplos más puros de estructura de plegamiento conocido en el mundo (Harrington, 1947), está compuesta por cordones subparalelos los cuales forman un conjunto de elevaciones bien definidos, en sentido noroeste-sudeste, de 180 km de longitud.

La vegetación nativa predominante es la estepa gramínea que cubren las Sierras Australes, ubicada en la Región Fitogeográfica Neotropical, Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Austral (Frangi & Bottino, 1995). La vegetación natural está siendo invadida por especies introducidas de rápida propagación y elevada combustibilidad (cardos, coníferas, eucaliptos y retamas), que compiten por el nicho ecológico con las nativas. Además, la actividad humana ha provocado cambios en el ecosistema al convertir las tierras a la actividad agrícola-ganadera, que se visualiza en algunas comunidades dominadas por pastizales y arbustos que están aparentemente relacionadas a áreas con pastoreo excesivos y otras a suelos erosionados principalmente en forma natural. La vegetación vinculada a la intervención humana está representada por un ambiente serrano, donde las modificaciones se deben principalmente a la introducción de especies vegetales para la producción agropecuaria, pastoreo de animales silvestres y domésticos introducidos, usos del fuego, forestaciones, extracción de especies de interés en florería y el trazado de caminos y sendas.

Según la clasificación de Thornthwaite, el clima es templado subhúmedo seco (C1) (Burgos, 1968) quedando la región comprendida en la franja zonal de clima templado húmedo pampeano, con veranos secos y cálidos e inviernos secos y fríos. Presenta una temperatura media anual es de 13,9 °C y precipitación media histórica de 723 mm (últimos 30 años), con una máxima de 1056 mm y mínima de 396 mm. En los últimos 10 años se ha registrado un aumento anual de las precipitaciones de 120 mm comparado con la media histórica, registrando mayores aumentos en los meses de enero, febrero, octubre y noviembre, y

disminución en el mes de diciembre, momento clave donde se registran altos valores de evapotranspiración y temperaturas medias.

Los suelos serranos se desarrollaron a partir de sedimentos loésicos arenosos que cubrieron las pendientes y cumbres con espesor variable, donde se mezclan clastos, detritos de rocas y afloramientos rocosos. Las unidades cartográficas de suelo (E 1:50.000) (IGN, 1870), se conforman con las series según: Asociación Bonete (Haplustol petrocálcico, franco fino, mixta); Asoc. Tornquist (Argiustol típico, limosa fino, mixta); Asoc. Dufaur (Paleustol petrocálcico, limosa fina, mixta); Asoc. Erize (Argiustol petrocálcico, franco fina, mixta); Complejo Cerro del Chimango (Haplustol petrocálcico, arenosa, térmica); Complejo Cura Malal (Argiustol típico, limosa fina, mixta); Grupo Fuerte Argentino (Argiustol ácuico, franca fina, térmica); Grupo Arroyo Cura Malal Grande (Haplustol típico, franco fino, somero); Misceláneas Afloramientos rocosos.

Con el objetivo de cuantificar las pérdidas anuales de suelo para el área de estudio debido a incendios en la Cuenca del Arroyo Ventana e interpretar la vulnerabilidad edáfica por dichos eventos, se aplicó el modelo USLE (ver Ec. 1) a nivel geoespacial mediante el procesamiento de datos vectoriales, ráster y tabulares, aplicando técnicas de procesamiento digital de imágenes satelitales y de cartografía con el Software de código abierto QGIS Madeira 3.4.6.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad \text{Ecuación 1}$$

donde: A= pérdida de suelo por erosión pluvial ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$); R = factor de erosionabilidad del aguacero ($\text{J cm m}^{-2} \text{ h}^1$); K = factor de erodabilidad del suelo ($\text{Mg m}^2 \text{ h ha}^{-1} \text{ J}^{-1} \text{ cm}^{-1}$); LS = factor topográfico, donde L: factor longitud de pendiente; S = factor de gradiente de pendiente; C = factor ordenación de cultivos; P = factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

A partir de un análisis de antecedentes y una consulta bibliográfica, el factor R adquirió un valor anual de $289,65 \text{ J cm m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ para la zona de estudio (Gaspari, 2000).

Para la confección del mapa del factor K, se partió de datos provenientes de análisis de suelo, principalmente los referidos a la granulometría y al contenido de materia orgánica, y en función de las características propias de cada suelo. Esta información fue obtenida mediante el sitio web anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/index.htm del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), previa consulta con las cartas de las series de suelos presentes en el área de estudio.

Las modificaciones del factor K tras un incendio forestal afectaría tanto a los componentes como a las propiedades del suelo que intervienen en su cálculo, por lo que sería necesario determinar esos factores sobre el suelo quemado para su posterior evaluación. Para ello, se consideró a Díaz-Fierros et al., (1994) que mostraron las posibles variaciones tras fuegos de tres intensidades diferentes (ver Tabla I). Los cambios que se produzcan en las propiedades edáficas, tras un incendio forestal, permiten medir la influencia del fuego en la susceptibilidad del suelo a la erosión determinada mediante este factor.

Tabla I. Variación relativa (1: ligera, 2: moderada, 3: fuerte), en función de la intensidad del incendio, de los factores necesarios para calcular el factor K de la USLE en la capa superficial del suelo modificada de Díaz-Fierros et al. (1994). Fuente: Benito et al. (2010).

Intensidad del fuego	Partículas			
	< 50 μm	M.O	Estructura	Permeabilidad
Bajo	0	-1	+1	-1
Moderado	0	-1	+1	-2
Alto	-2	-3	-1	-2

Para las zonas incendiadas, se recalculó el factor K, considerando la severidad, la cobertura y las características edáficas, como los factores determinantes, ajustados según la Tabla I. Por su parte, los valores de permeabilidad fueron considerados con valores relativos mayores para áreas boscosas por la incorporación de resinas al suelo, factor que aumenta la repelencia al agua, independientemente de la severidad registrada.

La zonificación de la pendiente (%), para definir el factor topográfico (LS), se estableció en base al Modelo Digital del Elevaciones (MDE) a partir de un recorte del archivo proveniente del MDE-Ar de la carta topográfica 3963-5 (IGN) y reclasificadas según Tabla II.

Tabla II. Valores de LS según rangos de pendiente. Fuente: Mintegui Aguirre (1988).

Pendiente (%)	Factor LS
< 3	0,3
3 - 12	1,5
12 - 18	3,4
18 - 24	5,6
24 -30	8,7
> 30	14,6

Con los datos de la información obtenida de datos a campo y a partir de una clasificación supervisada del área y análisis del índice de vegetación normalizada NDVI, se procedió a digitalizar y zonificar a los usos del suelo y generar la cartografía actual del factor C, según la clasificación de Mintegui Aguirre & López Unzú (1990) que se presenta en la tabla III.

Tabla III. Factor ordenación de cultivos (C) en la cuenca del Arroyo Ventana (Gaspari et al, 2009).

Uso de suelo	Valor de factor C
Pinar	0,001
Pinar incendiado	0,03
Pastizal	0,15
Uso agrícola	0,25
Matorral con buena cobertura	0.08
Roca en superficie	0,042

El valor del factor P se ajustó únicamente a cultivo agrícolas con prácticas conservacionistas, discriminado estos de acuerdo con la pendiente del terreno (Mintegui Aguirre y López Unzú 1990) y discriminados mediante observación y procesamiento digital de Imágenes de Google Earth.

El análisis temporal y la zonificación de las áreas incendiadas se realizó utilizando el servidor del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se identificaron dos eventos de importancia y luego se procedió por fecha (previas y posteriores a los eventos), a la búsqueda y descarga de imágenes satelitales Landsat 8 (imágenes OLI) y Sentinel 2 que debido a sus características de resolución temporal, espectral y radiométrica resultan adecuadas para el estudio de variación de cobertura vegetal. Las imágenes se pre-procesaron con un sistema de información geográfica (SIG) mediante el software QGIS 3.4.6. Madeira, con el cual se corrigieron atmosféricamente, obteniendo así valores de reflectancia. En función de incendios registrados en el área de estudio se realizó una previa zonificación

de severidades de incendios, según USGS, mediante índice dNBR (Diferencial de Proporción de Quema Normalizada) (Hunt Jr. & Rock, 1989).

De acuerdo con las severidades y coberturas afectadas por los incendios se consideraron los nuevos valores de Factor C, aplicable para los primeros meses luego del evento considerando una “ventana de alteración” (Prosser & Williams, 1998). Asimismo, la zonificación de severidades se utilizó para estimar nuevos valores de Factor K, como se mencionó previamente.

Por último, los valores nuevos estimados fueron relacionados y comparados con los definidos según Pacheco et al. (2014), quien correlacionó valores de Factor C de USLE con valores de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) obteniendo un $r^2 = 0,99$ (ver Tabla IV).

Tabla IV. Correlación entre NDVI y Factor C de la USLE. (Pacheco et al., 2014).

NDVI	FACTOR C
0	1
0,1	0,9
0,2	0,7
0,3	0,4
0,4	0,2
0,5	0,1
0,6	0,001
0,7	0,0001
0,8	0,00001
0,9	0,000001

El resultado final de la aplicación del modelo USLE se obtuvo procesando la cartografía de cada factor mediante el uso del QGIS 3.4.6. Madeira, como se representa en la Fig. 2.

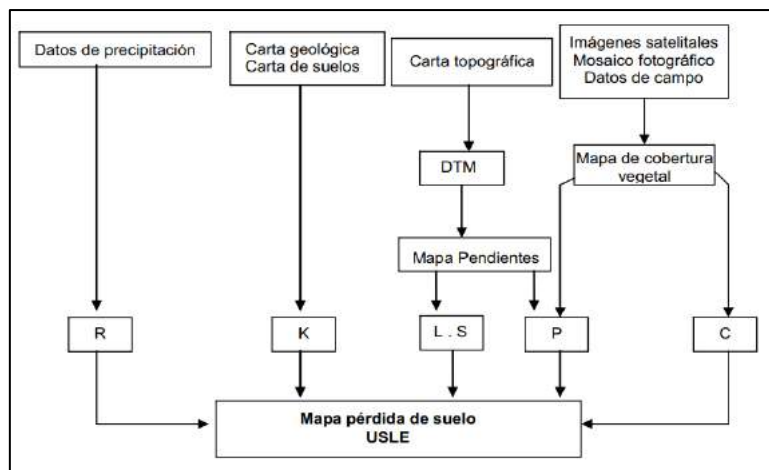


Figura 2. Secuencia de procesamiento para la zonificación de la pérdida de suelo. Fuente: Gaspari et al. (2013).

Con la cartografía obtenida, se realizó una reclasificación para la evaluación de la degradación del suelo por erosión superficial, según rangos de la USLE (ver Tabla V) (Mintegui Aguirre & López Unzú, 1990), aplicada en la zonificación de la Cuenca del A° Ventana.

Tabla V. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial, según FAO, PNUMA y UNESCO.

Pérdida de suelo (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Grado de erosión
<10	Nulo o leve
10-50	Moderado
50-200	Alto
>200	Muy alto

Por último, se calculó la USLE para situaciones de incendios, estimando valores de factor K y C para sitios afectados por el fuego, categorizados estos según la cobertura afectada y la severidad calculada anteriormente. Se realizaron comparaciones con la situación actual (año 2020), con los de los eventos de incendios estudiados.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se han identificado dos eventos de incendios de gran magnitud ocurridos en la cabecera de la cuenca en los años 2014 y 2018, en los cuales se definió su severidad por análisis espectral.

En cuanto a los valores obtenidos para factor K en la Cuenca del A° Ventana ajustado a severidad por incendio, el mayor ocurre para severidades alto / muy alto, que ocupan gran parte de las superficies afectadas sobre afloramientos rocosos (ver Tabla VI). Es importante destacar que suelos de Series Bonete y SHCura Malal pasan de una categoría de moderada susceptibilidad a alta susceptibilidad para incendios de severidad alto / muy alto (aumento de 53% para la Bonete y un 51% para SH Cura Malal) según la clasificación de Soil and Water Conservation Society (1995) ($>0,45 \text{ Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) Los incendios forestales causan mayor aumento de erodabilidad en comparación con incendios que afectan vegetación herbácea. En el caso de la Serie Bonete y SH Cura Malal Grande presentan un 10% más de aumento de Factor K, mientras que Erize, un 5%.

Tabla VI. Valores de Factor K [$\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$] luego de los incendios, según suelo, cobertura y severidad.

FACTOR K - INCENDIOS		Severidad		
Suelo (Factor K actual)	Cobertura	Bajo	Moderado	Alto/ Muy Alto
Roca (0,95)	Arbóreo	1	1	1
	Herbáceo	1	1	1
Erize (0,51)	Arbóreo	0,58	0,62	0,77
	Herbáceo	0,55	0,59	0,74
Bonete (0,32)	Arbóreo	0,37	0,41	0,52
	Herbáceo	0,34	0,37	0,49
SH Cura Malal (0,35)	Arbóreo	0,41	0,44	0,56
	Herbáceo	0,37	0,41	0,53

Se observa en la Fig. 3 que el factor C ha variado debido a la afectación de los incendios registrados. Se muestra como los sitios incendiados aumentan notoriamente el valor de Factor C (entre 0,7 y 1). Por otra parte, se destaca una disminución del valor en los pinares ubicados al sureste de la cuenca, que presentan gran regeneración post-incendio.

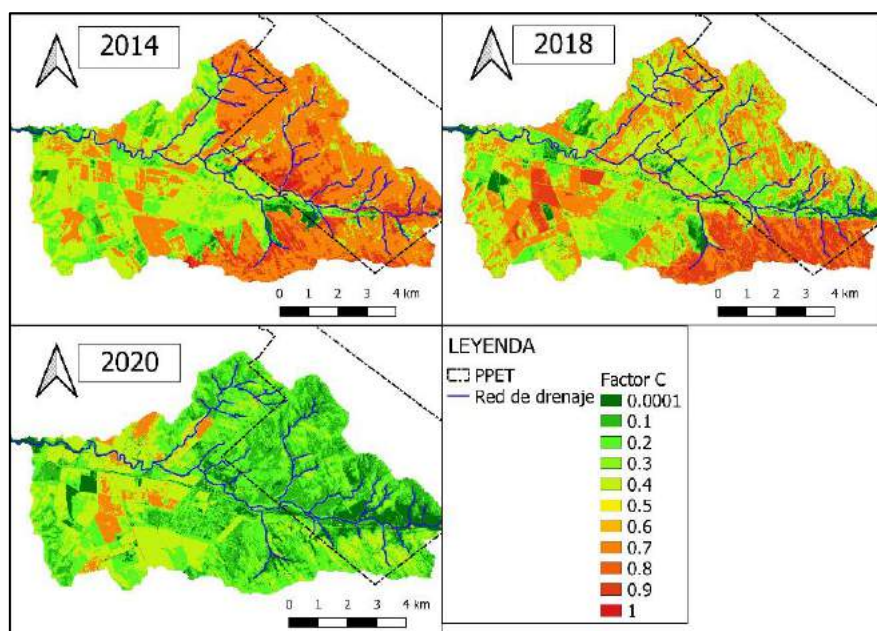


Figura 3. Factor de ordenación de cultivos (C): incendio de 2014, incendio de 2018, actual 2020.

Los resultados alcanzados de los cálculos de la USLE permitieron definir valores de pérdida de suelo superficial (A) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para la cuenca del A° Ventana en el año 2020 y para ambos eventos de incendios. En la actualidad se observan valores excesivos de pérdida de suelo, asociados a las zonas altas, donde las pendientes son pronunciadas, con altos valores de factor K (roca en superficie), de factor LS (pendientes muy marcadas) y factor C (coberturas que no amortiguan el impacto de la lluvia ni protegen suficientemente el suelo), representando el 30% de la cuenca, como categoría muy alto. (ver tabla VII).

Tabla VII. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial, según FAO, PNUMA y UNESCO.

Categoría	Pérdida de suelo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Área (ha)	Superficie de ocupación (%)
Nulo o leve	<10	1.052	14
Moderado	10-50	2.100	28
Alto	50-200	2.038	27
Muy alto	>200	2.256	30

En la Fig. 4 se visualiza un aumento de la pérdida de suelo en las categorías alto y muy alto para los años en que se registraron incendios.

Se observan mayores valores de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial en los años donde se registraron incendios, habiendo variaciones de 10% para categoría nula, 5 a 10% para moderado y de hasta 15% para muy alto (ver Fig. 5). Los incendios vulneran la cobertura de pastizales y arbórea que regulan la erosión hídrica, bajo las cuales se destaca la categoría leve o nula. Las zonas incendiadas con alta severidad resultan desencadenantes de incrementos notorios de erosión hídrica superficial. Se destaca una mejoría de la categoría leve o nula en el año 2020, debido probablemente a regeneración de especies arbóreas y arbustivas.

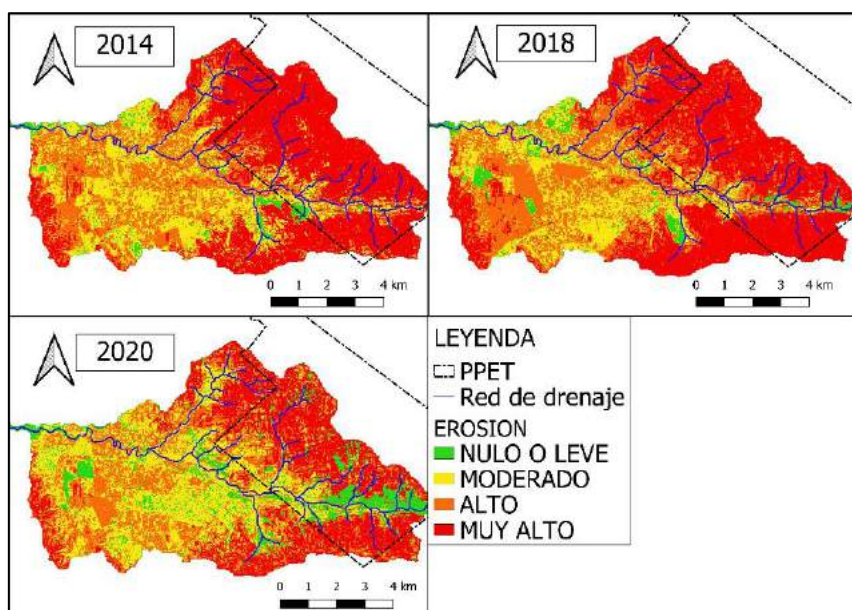


Figura 4. Pérdida de suelo (USLE): incendio de 2014, incendio de 2018, actual 2020.

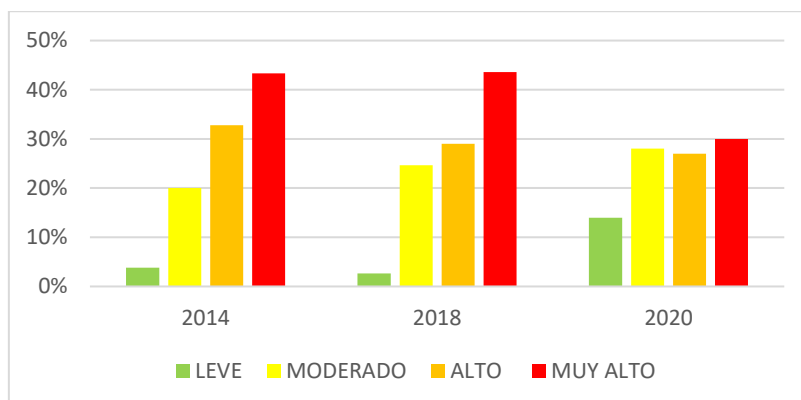


Figura 5. Pérdida de suelo (%) según años 2014, 2018 (con eventos de incendios) y 2020 (actual).

Se identifica que, independientemente de la severidad del incendio, los valores de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial para ambos eventos se clasifican como muy alto mayoritariamente en todas las superficies, siendo la categoría leve o nulo, casi inapreciable (ver Fig 6).

En las Figuras 7 y 8 se presenta la zonificación por diferencia de los tres momentos para cada evento. En ambas, la figura superior muestra la variación de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial entre los momentos previo al incendio y extintos estos. Por otro lado, la imagen inferior muestra la variación de pérdida de suelos por erosión hídrica superficial entre los momentos una vez extintos los incendios y tiempo posterior, dando lugar a la recuperación de cobertura por parte del ecosistema, tanto por efectos de los incendios como condiciones climáticas.

La comparación de cantidades diferenciales entre momentos estudiados arrojó para ambos casos aumentos del orden de 1.000 a 3.000 Mg/ha.año luego del incendio, variando dichos valores según la pendiente, el suelo afectado y la cobertura incendiada, denotando que la interacción de dichos factores se relaciona con las severidades registradas (a mayor severidad, mayor pérdida de suelo). Asimismo, se observa que en sitios que no han sido incendiados también muestran un aumento considerable de pérdida de suelo, especialmente

por las condiciones climáticas que se registraron al momento de los incendios, representando peores coberturas de suelos o coberturas menos vigorosas.

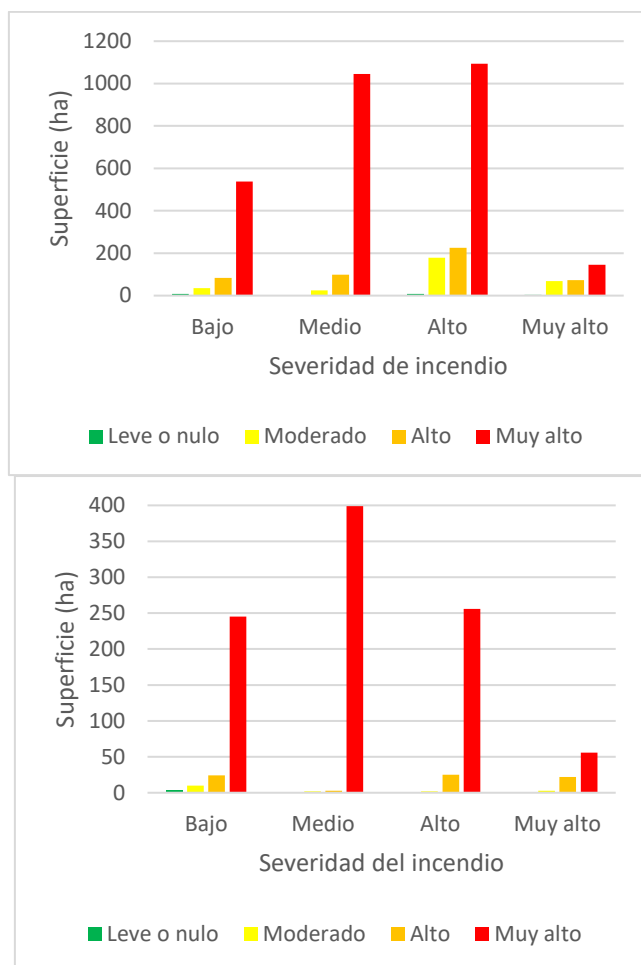


Figura 6. Severidad de los incendios en relación a la clasificación de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial para ambos eventos. Izquierda: Evento 2013 - 2014. Derecha: Evento 2018.

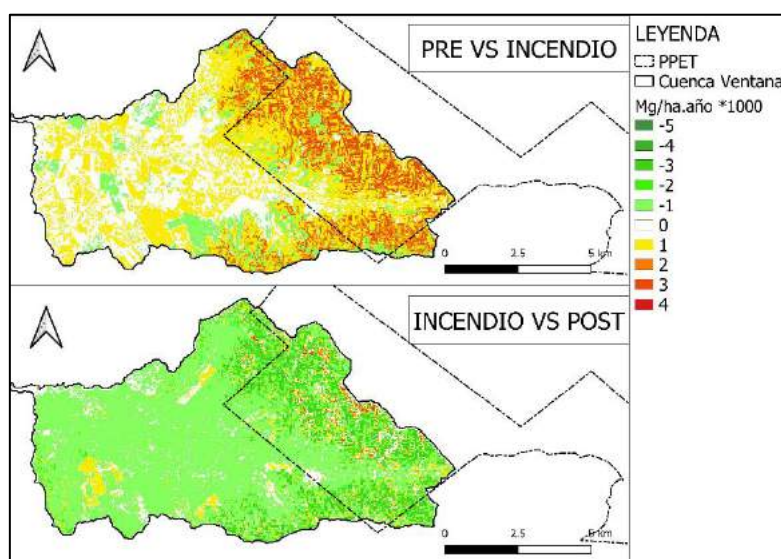


Figura 7. Diferencia de pérdida de suelo en miles de ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) para el evento 2013-2014. Superior: previo al evento y posterior al evento. Inferior: posterior al evento y tres meses luego de extinto el incendio.

Se observa la recuperación notoria que tiene el ecosistema a estos eventos, registrándose que entre los 3 y 6 meses posteriores a los eventos, los valores de pérdida de suelo disminuyen en el orden de los 2.000 a 4.000 Mg/ha.año, debido a la recuperación de la cobertura del suelo. Sin embargo, sitios que presentaban cobertura arbórea y fueron afectados por incendios severos, no se registraron dichos valores de recuperación.

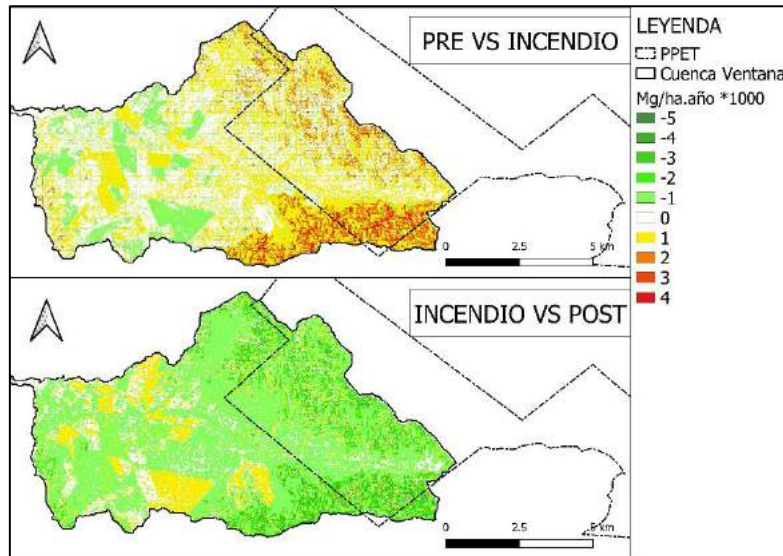


Figura 8. Diferencia de pérdida de suelo en miles de ($\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) para el evento 2018. Superior: previo al evento y posterior al evento. Inferior: posterior al evento y tres meses luego de extinto el incendio..

Por último, en la Figura 9 se observa la diferencia de valores registrados en los eventos, comparado con valores del año 2020, donde se registran diferencias en áreas incendiadas superiores a $2.000 \text{ Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ de aumentos de pérdida de suelo por erosión hídrica superficial.

Como diferencia entre ambos eventos, además de las superficies afectadas, vale mencionar que en el año 2018 se alcanzan diferencias de hasta $4.000 \text{ Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, sobre todo en áreas de alta severidad. Asimismo, debe considerarse que el área incendiada en el año 2018 también lo fue en evento previo.

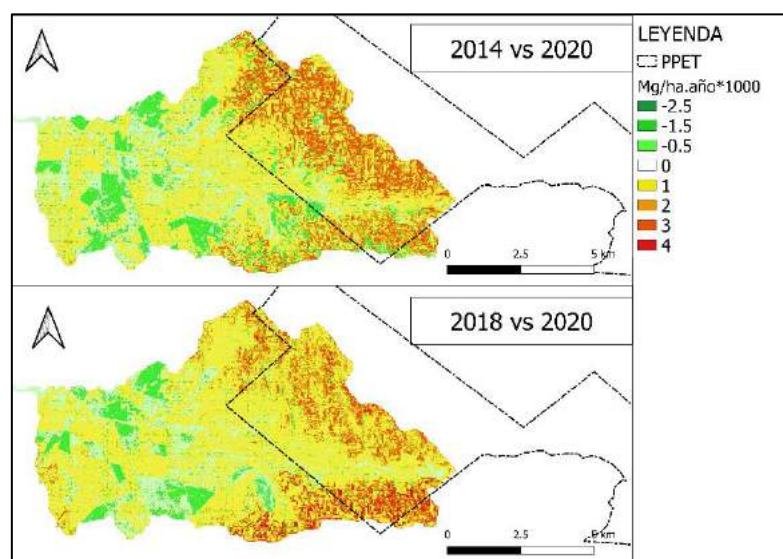


Figura 9. Diferencia de pérdida de suelo en miles de ($\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) luego de los eventos con la pérdida (2020).

Se expone claramente como la ocurrencia de incendios desencadena potenciales procesos erosivos en áreas incendiadas, donde se registran aumentos muy notorios de pérdidas de suelos anuales, todos clasificados como muy alto.

CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar el grado de deterioro de los suelos en la cuenca del Arroyo Ventana, considerando el impacto causado por el empleo de sistemas basados en la agricultura permanente y gran proporción de suelos altamente erodables y el efecto de incendios de gran extensión. La erosión hídrica superficial actualmente supera los 50 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en el 58 % de la cuenca, favorecido por las elevadas pendientes, la gran proporción del suelo con roca en superficie y las coberturas herbáceas con poco recubrimiento.

Los resultados alcanzados constituyen una base de datos inédita, que debe ser validada por medio de parcelas experimentales en campo, logrando un ajuste de la metodología y aplicación de herramienta SIG-USLE, especialmente con el objetivo de ajustar modificaciones en los valores de factor K debido a incendios, como así también ajustar a un período determinado la ventana de alteración, la cual podría variar de acuerdo a la severidad del incendio, la cobertura afectada, el momento del evento y las condiciones climáticas.

Se concluye que los incendios abren una ventana de alteración en el ecosistema, donde se pueden desarrollar fuertes procesos degradativos por erosión hídrica superficial, especialmente ante eventos torrenciales. Sin embargo, vale la pena destacar la gran resiliencia que tiene este ecosistema, observando recuperación notoria de valores previos a incendios en términos de reverdecimiento y vigorosidad (justificado por valores de NDVI registrados). También se evidenció el importante rol que tienen los sitios forestales como reguladores hídricos y de protección de sitios altamente erodables de cuencas hidrográficas.

Los incendios desencadenan una mayor erodabilidad de los suelos afectados en sitios forestales que en pastizales, observando mayores severidades, pérdida de materia orgánica y fuerte impermeabilidad de los suelos, aumentando consecuentemente el escurrimiento superficial y la potencial pérdida de suelo ante eventos torrenciales. Si bien este ecosistema sin vegetación arbórea presenta una alta vulnerabilidad luego de los incendios, la ocurrencia de incendios forestales empeora dicha situación. Sería un desafío poder caracterizar si la erosión que evitan los bosques es mayor que la potencial que puede desencadenarse ante incendios.

Finalmente, se enfatiza el aporte significativo que tiene el uso de un SIG para estudios medioambientales con el objetivo de lograr una visión integrada de la situación ambiental y consecuentemente para el proceso de toma de decisiones.

AGRADECIMIENTOS

La financiación de este trabajo fue desarrollada por el Proyecto denominado “Estudio de los servicios hidrológico-ambientales para aportar a la sustentabilidad de la Región Serrana Bonaerense”, del Programa de Incentivos a los Docentes - Investigadores - Secretaría de Política Universitaria – Ministerio de Educación de la Nación. Proyectos I+D 2016. Director: Dra. Fernanda Gaspari. Acreditado. Proy. N° 11/A286. 2016-2019.

REFERENCIAS

Benito, E., Cerda A., Soto B., Díaz Fierros F., Rubio J.L., Varela M.E. and Rodríguez-Alleres M. Métodos para el estudio de la erosionabilidad del suelo: su aplicación en suelos afectados por

- incendios forestales. En: Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales, A. Cerda, A. Jordán (eds), Valencia, pp. 85-107. (2010).
- Burgos, J. El clima de la provincia de Buenos Aires en relación con la vegetación natural y el suelo. En: Flora de la Provincia de Buenos Aires. Colección Científica INTA. Ed. Cabrera A. L. Buenos Aires, pp. 33-100. (1968).
- Caon, L., Vallejo V. R., Ritsema C.J. and Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, pp. 47-58. (2014).
- Díaz-Fierros, F., Benito E. and Soto B. Action of forest fires on vegetation cover and soil erodibility. En: Soil erosion and degradation as a consequence of forest fires (M. Sala y J.L. Rubio, eds.). Geofoma Ediciones, Logroño, pp. 163-176. (1994).
- FAO-PNUMA-UNESCO. Metodología Provisional para la Evaluación de la Degradación de los Suelos. Organización de las Naciones Unidas para el desarrollo de la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. 79pp. (1980).
- Frangi, J. and Bottino O. Las comunidades vegetales de la Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata. La Plata: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestal, UNLP*, t. 71, pp. 93-133. (1995).
- Gaspari, F. J., Delgado M.I. and Senisterra G.E. Simulación espacio-temporal de la erosión hídrica superficial en una cuenca serrana bonaerense. Argentina, *GeoFocus (Artículos)*, nº9, pp. 67-82. (2009).
- Gaspari, F.J. Plan de Ordenamiento Territorial en cuencas serranas degradadas utilizando Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.). Tesis de maestría. Universidad Internacional de Andalucía Sede Iberoamericana de la Rábida. Huelva. España. 147 pp. (2000).
- Harrington, H. Explicación de las hojas geológicas 33m y 34m, Sierras de Curamalal y de la Ventana, provincia de Buenos Aires. Buenos Aires: Servicio Nacional Minero Geológico, Boletín 61, 43 pp. (1947).
- Hunt Jr., E. R. and Rock B. N. Detection of changes in leaf water content using Near-and Middle Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, pp. 43-54. (1989).
- Michalijos M. P. Estudio del riesgo de incendio forestal en un sector de la comarca de la sierra de la ventana utilizando geotecnologías. Tesis de doctorado en geografía. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 245pp. (2018).
- Mintegui Aguirre, J. A. and López Unzu F. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 308 pp. Madrid. (1990).
- Mintegui Aguirre, J. A. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud del declive en un terreno. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Madrid. pp: 2229-2245. (1988).
- Prosser, I.P. and Williams L. The effect of wildfire on runoff and erosion in native Eucalyptus forest. *Hydrol. Process.*, 12: 251-265 (1998).
- Ramos Rodríguez, M.P. Manejo del Fuego. Ed. Félix Varela. La Habana, Cuba. 277 pp. (2010).
- Shakesby, R. A. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: review and future research directions. *Earth Science Reviews*, 105(3), pp. 71-100. (2011).
- Vázquez, P. and Zulaica L. Cambios en el uso de la tierra del partido de Tandil y principales impactos ambientales. *Revista Párrafos geográficos*, Vol 10, Nº 2. pp. 242-267. (2011).
- Wischmeier, W.H. and Smith D.D. Prediction Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: A Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. *Agricultural Handbook*, No. 282, 47 p. (1965).
- Wischmeier, W.H. and Smith D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning *Agriculture Handbook* No 537. US Department of Agriculture, Washington, D.C.EE.UU. (1978).