
Identificación de zonas susceptibles a la formación de cárcavas:

Evaluación multicriterio y análisis espacial

Identificação de áreas propensas a deslizamentos de terra:
Avaliação multicritério e análise espacial

Identifying areas subject to gully formation:
Multi-criteria evaluation and spatial analysis

Federico Javier Beron de la Puente y Verónica Gil

Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, Argentina
fedeberon@gmail.com; verogil@uns.edu.ar

Beron de la Puente: <https://orcid.org/0000-0003-4228-4593>

Gil: <https://orcid.org/0000-0002-2824-204X>

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue identificar cárcavas y zonas susceptibles de formación. La metodología consistió en la aplicación de la evaluación multicriterio (EMC) y análisis espacial con sistemas de información geográfica (SIG). Los resultados fueron: 1) un esquema metodológico que puede ser aplicado en otras áreas y, 2) la localización de zonas de mayor riesgos a la formación de cárcavas. La cartografía temática obtenida se transforma en una herramienta para la toma de decisiones sobre las medidas de control y mitigación de la erosión y así reducir el impacto en las zonas de producción agrícola.

PALABRAS CLAVE: evaluación multicriterio; cárcavas; piedemonte; SIG.

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi identificar voçorocas e áreas suscetíveis para sua geração. A metodologia consistiu na aplicação de avaliação multicritério (MCA) e análise espacial com sistemas de informações geográficas (GIS). Os resultados obtidos foram: 1) um esquema metodológico que pode ser aplicado em outras áreas e 2) a localização de áreas com maior risco de formação de voçorocas. O mapeamento temático obtido torna-se uma ferramenta para a tomada de decisões sobre controle de erosão e medidas de mitigação para reduzir o impacto ambiental em áreas de produção agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação multicritério; voçorocas; piemonte; SIG.

Abstract

The aim of this research is to identify gully zones and potential areas for its generation. The multicriteria evaluation (MCE) and Spatial Analysis with Geographic Information Systems (GIS) were applied. The results obtained were 1) a methodological scheme that can be applied in other areas and 2) the location of areas with the highest risk of gully formation. The thematic cartography obtained becomes a tool for decision-making on erosion control and mitigation measures. In this way, it contributes to reducing the environmental impact in agricultural production areas.

KEYWORDS: multicriteria evaluations; gully; foothills; GIS.

1. Introducción

Los procesos de erosión hídrica pueden afectar negativamente un suelo productivo, reduciendo así áreas destinadas a la agricultura y el pastoreo. Este mecanismo de erosión es multicausal y se puede dar por factores físicos como intensidad y cantidad de lluvia, topografía, tamaño y forma de la cuenca, longitud y gradiente de laderas y características del suelo, o por factores antrópicos como el uso inapropiado del suelo y de la vegetación, sobrepastoreo, construcción de caminos, senderos creados por animales o vehículos, entre otros (Bocco, 1991; Strunk, 2005; Cisneros *et al.*, 2012). Al activarse este proceso, se produce una pérdida de la capa fértil del suelo y la disminución de la capacidad de retención de agua. Esto a su vez implica impactos ecológicos y altos costos económicos a partir de sus efectos sobre la producción agrícola con la disminución del rendimiento de cultivos, daños en la infraestructura y la calidad del agua poniendo en riesgos también, a la seguridad alimentaria (Nájera González *et al.*, 2016).

Ya Strahler (1964) indicaba que cuando la erosión laminar producida por las lluvias adquiere una mayor intensidad en la superficie del suelo, es capaz de originar erosión en surcos. Así, se crean innumerables acanaladuras de poca superficie que pueden transformarse en grandes depresiones denominadas barrancos acelerando la erosión de los suelos y evolucionando en lo que se conoce como cárcavas. Esta última forma de erosión se presenta cuando existe una excesiva concentración de escorrentía en determinadas zonas del terreno y que posteriormente permite su ampliación progresiva. Por otra parte, cuando la cantidad de precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, el agua fluye sobre la superficie (escorrentía) y arrastra partículas en cantidad variable, de acuerdo con su volumen, velocidad y las resistencias que se oponen a su acción. Todos estos procesos de erosión del suelo ocurren debido a una suma de diferentes factores.

En áreas agrícolas la labranza para cultivos en el sentido de la pendiente, las construcciones sin ordenamiento y los drenajes de agua superficiales no bien dirigidos pueden originar profundas cárcavas. Una vez iniciado este proceso es muy costoso y engorroso atacarlo mediante el empleo de maquinaria agrícola convencional.

Las tecnologías de la información geográfica (TIG) y, especialmente los sistemas de información geográfica (SIG) surgen como nuevas herramientas de análisis para ser aplicadas a la gestión de la información espacial y resolver problemáticas ambientales, territoriales o prevención de riesgos naturales (Santos Preciado, 2004). De esta forma se obtiene una comprensión integrada de la realidad y de las interacciones sociedad–naturaleza, la cual permite abordar las relaciones espacial diferentes capas temáticas (Buzai *et al.*, 2011) y analizar problemáticas ambientales para la planificación del territorio.

Esto conlleva el uso de técnicas específicas como las de Evaluación Multicriterio (EMC). Estas tienen un alto grado de aplicabilidad para la identificación de sitios óptimos y zonas de aptitudes potenciales para el desarrollo humano como también la evaluación de desajustes e impactos ambientales provenientes de actividades antrópicas (Español Marino, 2017; Ángeles *et al.*, 2011; Hernández-Zaragoza *et al.*, 2019; Buzai y Galbán, 2020) o la localización de problemáticas orientadas al uso del suelo (Belenguer Plomer, 2016). El objetivo de la presente investigación fue identificar zonas de cárcavas y zonas susceptibles de formación a partir de la evaluación multicriterio (EMC) y análisis espacial con sistemas de información geográfica (SIG).

Los resultados obtenidos resultaron en: 1) un esquema metodológico que puede ser aplicado en otras áreas y, 2) la localización de zonas de mayor riesgo de formación de cárcavas. La cartografía temática obtenida se transforma en una herramienta para la toma de decisiones sobre las medidas de control y mitigación de la erosión y así reducir el impacto ambiental en las zonas de producción agrícola.

2. Área de estudio

Se tomó como área de estudio la cuenca alta del arroyo Napostá Grande (entre 62°23' - 61° 95' Lat. Sur y 38° 21'- 38° 07' Long. Oeste) con una superficie de 250 km² aproximadamente (FIGURA 1). El cauce principal de la cuenca nace entre el cerro Tres Picos (1.234 m) y Napostá (1.180 m) y su red de drenaje evoluciona sobre las laderas oeste del Cordón de Ventana (Sistema de Ventania,

Argentina). Las pendientes de la cuenca presentan claros contrastes condicionados por las unidades geomorfológicas que la componen. El 45% del área de llanura tienen una pendiente promedio de 2 - 5% y el 17% una pendiente menor al 2%, mientras que la zona serrana toma valores mayores al 10%, los cuales se ubican en la zona de piedemonte y afloramiento rocoso (Beron de la Puente, 2021).

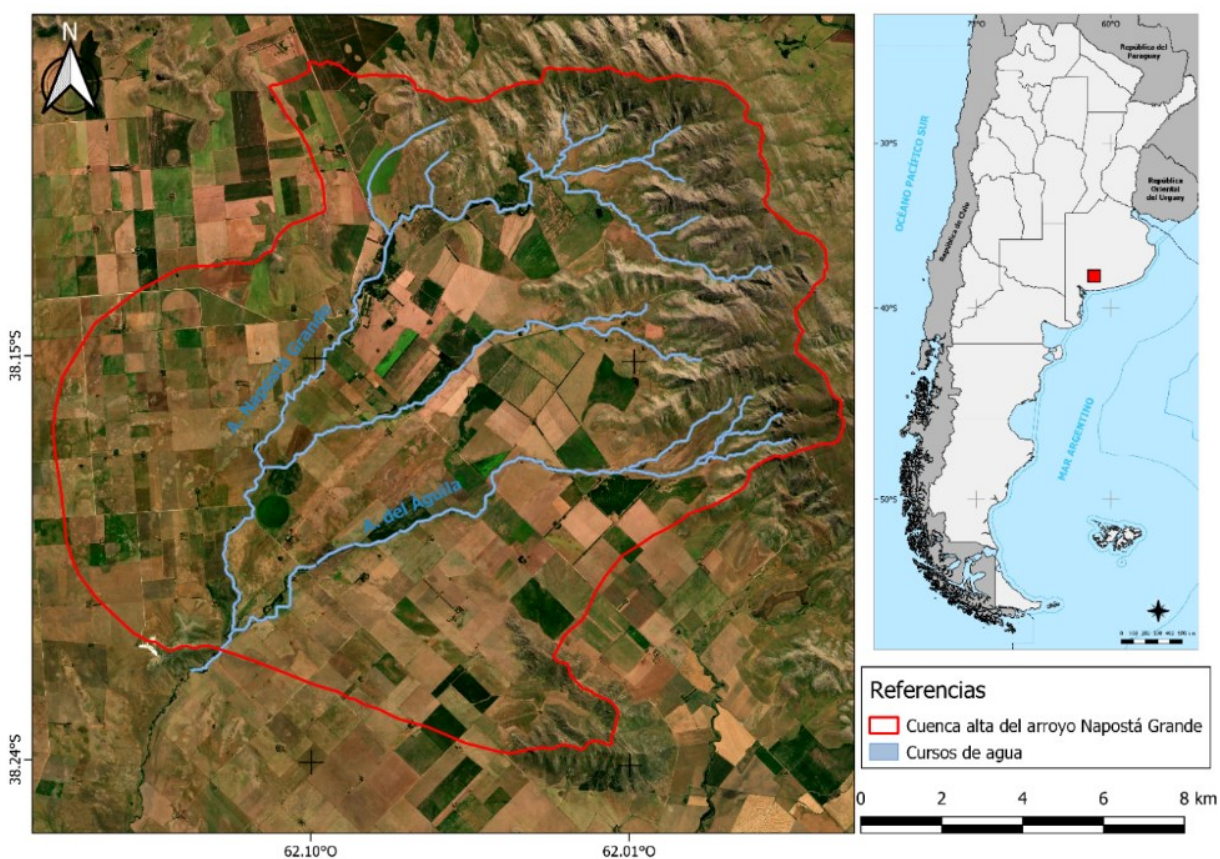


FIGURA 1. Localización de la cuenca alta del arroyo Napostá Grande. Fuente: elaboración propia

La cuenca se desarrolla en una zona climática templada seca-subhúmeda caracterizada por la presencia de ciclos húmedos y secos que se manifiesta en variaciones temporales, estacionales e interanuales de los montos de precipitación (Gil y Campo, 2000; Casado y Campo, 2019). Sumado a este ciclo natural, las sierras incrementan la variabilidad de las lluvias con la altura y la orientación de las laderas (Beron de la Puente *et al.*, 2022).

Los suelos están formados por sedimentos loésicos y son aptos para actividades productivas y por ello, en mayor medida el área de estudio está vinculada con la agricultura (cultivos de cereales como trigo y cebada) y, en menor medida, con la ganadería, a la vez que se superponen actividades turísticas y de conservación. En algunos sectores de la cuenca, donde se realizan actividades agrícolas, se han generado e intensificando procesos de erosión hídrica luego de lluvias intensas y procesos de degradación de los suelos que conlleva a una disminución de la productividad de cultivos, a medida que se pierde la calidad del mismo, debido a su susceptibilidad de la capa superficial del suelo frente a la erosión hídrica (Beron de la Puente, 2021).

3. Materiales y métodos

En la FIGURA 2 se distinguen los materiales, los procesos, las variables usadas de entrada al modelo

AHP para llegar al mapa final de formación de cárcavas o potencial formación. Los materiales o datos de entrada son: el Modelo Digital de Superficie *Alos Palsar* 12,5 m (*Alaska Satellite Facility*, 2023), los datos grillados de precipitación de 0,5 y 0,5 (*Climatic Research Unit*, 2023), las cartas de suelo a escala 1:500.000 del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1989) y las Imágenes Sentinel 2 (*Earth Explorer USGS*, 2023). Con esta información de entrada se procedió al recorte del área de estudio y a la creación de la Data Base (Bandas 4 y 8) para el cálculo del NDVI, el análisis espacial de la pendiente y superficie, los suelos y las precipitaciones.

Estos contribuyen al estudio y determinación de las variables que se incluyen para la identificación de sectores con cárcavas actuales o potenciales de formación. Estas son: 1) la cuantificación de procesos fluviales a partir de índices SPI y TWI; 2) la variación de cobertura del suelo mediante la obtención de la variación de la erosión hídrica y, 3) la consideración de la topografía del área mediante el uso del factor LS provista dentro de la ecuación revisada de pérdida de suelos (RUSLE por sus siglas en inglés). Esta elección radica en que la suma de estas en su conjunto puede determinar áreas críticas de formación de cárcavas, así como la posibilidad 4) de identificación de las actuales mediante el método de AHP. En la FIGURA 2 también se indican los pasos utilizados en el modelo AHP.

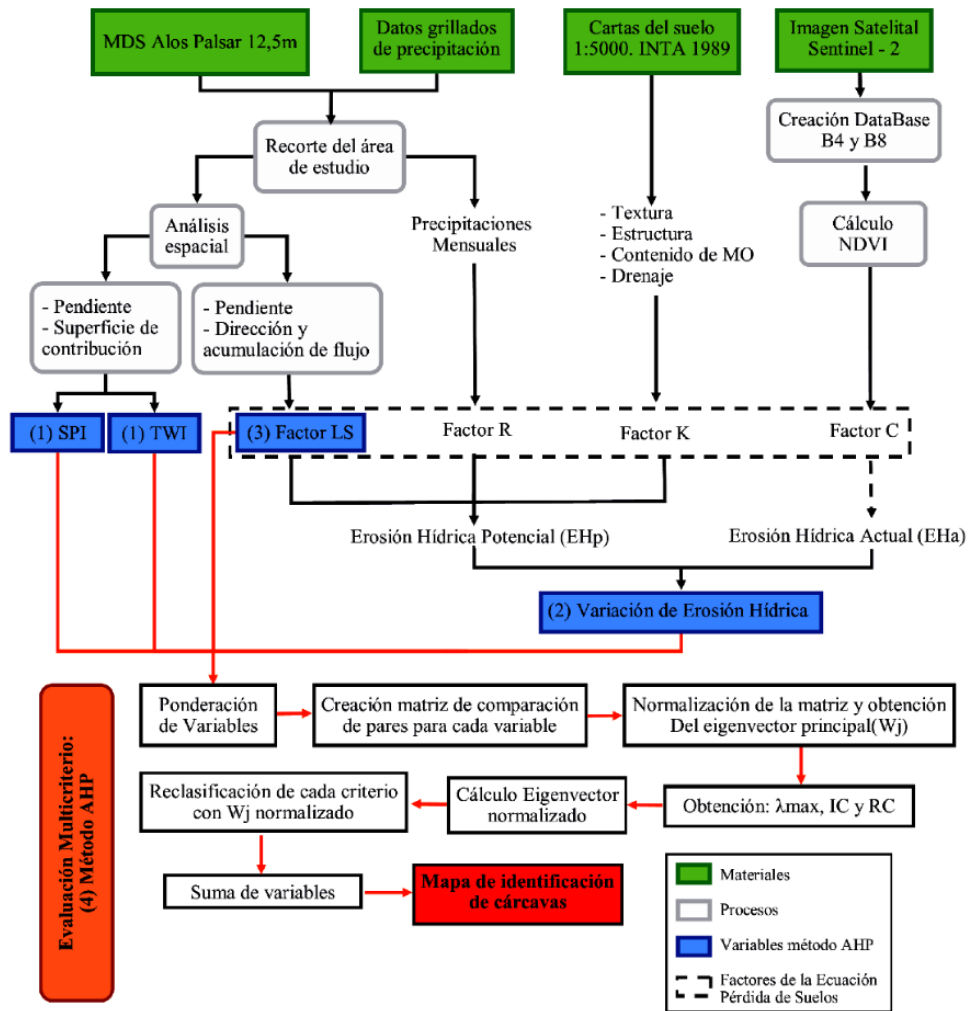


FIGURA 2. Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia

3.1. Índices morfométricos para la cuantificación de procesos (1)

Una forma de identificar la formación de cárcavas o estimar la potencialidad de su formación es a través del uso de índices morfométricos, ya que se consideran buenos indicadores de signos de erosión en una cuenca hídrica (Beven y Kirkby, 1979). Moore *et al.* (1991) encontraron que el uso conjunto del *Topographic Wetness Index* (TWI), (Beven y Kirkby, 1979) y *Stream Power Index* (SPI) es un buen predictor de procesos de cárcavamiento en cuencas agrícolas en barbecho.

Estos se calcularon a través de álgebra de mapas.

El TWI fue obtenido a partir de la fórmula [1]. El SPI es un estimador de la fuerza erosiva del flujo superficial y fue concebido con el fin de predecir áreas potenciales de cárcavamiento por concentración del flujo superficial (Cara, 2012). La expresión para calcularlo es [2].

$$TWI = \ln(A/\tan\beta) \quad [1]$$

$$SPI = A * \tan\beta \quad [2]$$

Donde el factor A (Superficie de contribución aguas arriba) y $\tan\beta$ (pendiente local) pueden ser calculados bajo distintas metodologías a partir del uso de SIG (Moore *et al.*, 1991).

3.2. Factores de la ecuación RUSLE

Cada una de las variables de la ecuación [3] se considera un factor en sí que conlleva un cálculo específico.

$$A = R \times K \times L \times S \times P \times C \quad [3]$$

Donde A es la pérdida anual de los suelos por unidad de superficie (tn/Ha/año), R es el Índice de erosividad de las lluvias ($\text{MJ} \times \text{mm} \times \text{ha}^{-1} \times \text{h}^{-1}$), K es la susceptibilidad a la erosión del suelo ($\text{tn} \times \text{MJ}^{-1} \times \text{mm}^{-1}$), L es la longitud de la pendiente, S es el grado de la pendiente, C es el factor de cobertura y manejo del suelo (adimensional) y el P es el factor prácticas de conservación de suelos agrícolas (adimensional).

Para la agresividad de precipitaciones (Factor R), se utilizaron los datos grillados de precipitación (Berón de la Puente, 2021). El Factor K se determinó mediante el método de Wischmeier y Smith (1978) y se recurrió a los mapas de suelos de la provincia de Buenos Aires 1:500.000 y mapa digitalizado del Visor GeoINTA 1:50.000. Para el Factor P, de prácticas agrícolas, se tomó como valor único para toda la cuenca de estudio de 1. Para el Factor C de coberturas se siguió una metodología de obtención indirecta mediante el uso de imágenes satelitales ópticas Sentinel 2 (Berón de la Puente y Gil, 2021). Finalmente, el Factor Topográfico (LS), producto entre la longitud de la ladera (L) y el gradiente de la pendiente (S), es considerado una variable activa en el proceso de erosión hídrica pues direcciona la circulación del agua sobre el suelo.

Para la obtención de cada uno de los factores fue necesario el uso de Modelo Digital de Superficie (MDS) Alos Palsar de 12,5 metros de resolución espacial, para luego aplicar, mediante la calculadora ráster, las ecuaciones que llevan a la obtención de la variable final y su espacialización (McCool *et al.*, 1989). El factor L se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo suficiente como para que ocurra la deposición o hasta el

punto en el que el escurrimiento entra en un canal definido. En cambio, el S se expresa en porcentaje (diferencia de cota en 100 m de distancia horizontal), por lo cual aumentos en longitud e inclinación de pendiente puede producir altas velocidades de flujo superficial y por tanto mayores tasas de erosión (Haan, 1994). Según Moore y Burch (1986), el factor LS puede ser utilizado como una medida de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo superficial y en definitiva un indicador de posibles procesos erosivos en una cuenca hídrica. Por lo tanto, un mayor valor del factor LS significa un incremento en la tasa de erosión hídrica.

3.3. Variación de la erosión hídrica (2)

Para obtener la variación de la erosión hídrica (VHh) en la cuenca fue necesario contar primeramente con los valores de erosión hídrica potencial (EHp) y actual (EHa), aplicando para ambos casos la RUSLE (Renard *et al.*, 1997) [3].

En el caso de la EHp solo se realiza el producto de los factores $R \times K \times L \times S$, mientras que para la EHa se usa la ecuación 3 en su totalidad. Una vez obtenido EHp y EHa, es posible calcular la variación de la erosión hídrica mediante la ecuación 4. Esta indica el porcentaje de variación entre ambas capas.

$$[(EHP - EHA) / EHP] \times 100 \quad [4]$$

3.4. Aplicación de la EMC a través del método Analytic Hierarchy Process (AHP) (4)

Según Barredo Cano (1996) la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, de los cuales la EMC forma parte, proporcionan un conjunto de herramientas para el análisis de las complejas propiedades referidas a diferentes alternativas de selección, cuestión que facilita la toma de decisiones. Se aplicó el AHP, diseñado por Saaty (1980), que consiste en la construcción de un modelo jerárquico complejo para ayudar a la comprensión de problemas utilizando la comparación entre parejas de criterios y así determinar un nivel de preferencias sobre el conjunto de alternativas seleccionadas. Este ordena los criterios de acuerdo con una jerarquía y luego efectúa comparaciones binarias (una a una) atribuyendo valores o pesos de acuerdo con una

escala de importancia relativa, ordenada de 1/9 a 9 que se interpreta como se describe en la TABLA 1.

TABLA 1. Escala utilizada para la asignación de pesos. Fuente: elaboración sobre la base Saaty (1980)

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Menor Importancia	←	←	←	Igual Importancia	→	→	→	Mayor importancia

Un aspecto importante de este método es que, una vez asignados los pesos, permite obtener un valor de consistencia de la matriz a fin de valorar la relación de los criterios entre sí, su coherencia y pertinencia. La relación de consistencia (RC) debe ser menor a 0,10 para que la matriz de ponderaciones sea aceptable (Saaty, 1980).

Una vez que se identificaron las variables que intervienen en la generación de cárcavas, se aplica el método AHP (Saaty, 1980). Este comienza con la construcción de una matriz de reclasificación de las capas ráster con un ranking de importancia, la cual se establece mediante pesos para las variables identificadas en la formación de cárcavas, donde cada variable de cada capa ráster se recategoriza entre una escala de valores de 1 a 100, de acuerdo a su nivel de importancia, donde el 1 representa el valor menos importante y el 100 el valor más influyente en la generación de cárcavas en el área de estudio. Esta asignación de pesos responde al conocimiento adquirido a través de la recopilación y análisis de la bibliografía específica de autores que abordan la problemática de la generación de estas formas erosivas.

En una siguiente etapa, una vez construida la matriz con la asignación de pesos y realizando las conversiones para que todas las capas sean ráster, se asignan pesos correspondientes según el método AHP (TABLA 1) mediante plugin AHP para el software Qgis 2.18, debido a que ofrece un soporte de comprobación estadística de los pesos asignados. Paso siguiente consiste en calcular el

'eigenvector normalizado' (W_{jnorm}). El mismo se hace con la división del eigenvector principal de cada fila por el número de clases que son 4. Ahora, en la obtención del parámetro λ_{max} , necesario para el cálculo del valor de consistencia de los pesos, en primer lugar, se realiza una suma lineal ponderada de los pesos de cada variable de la matriz de comparación de pares con su peso normalizado (W_{jnorm}). Los valores de la suma de cada variable se dividen por su W_{jnorm} y, finalmente, el promedio de los valores obtenidos corresponde al $\lambda_{máx}$. Para calcular el Índice de Consistencia (IC), de los pesos de las variables, se utilizó la siguiente fórmula:

$$IC = (\lambda_{máx} - n) / (n - 1) \quad [5]$$

Donde n corresponde al número de clases o alternativas de un criterio determinado. Para determinar la Relación de Consistencia (RC), se obtiene dividiendo el valor de IC por un valor constante, según el número de clases, denominado Índice Aleatorio Medio (IAM) (Saaty, 1980). Para finalizar, se realiza un algebra de mapas con este vector normalizado y se aplica una superposición temática dando como resultado que, los mayores valores representan las zonas donde hay mayor probabilidad se formación de cárcavas o de cárcavas ya formadas. De esta forma se categorizaron las áreas según el nivel de peligrosidad.

4. Resultados

4.1. Topographic Wetness Index (TWI) y Stream Power Index (SPI)

Los valores del TWI varían entre 6 y 16 (FIGURA 3-A). El color rojo/anaranjado señala los menores valores que coinciden con las pendientes elevadas o de

escasa superficie para la captación de agua. En estas regiones de la cuenca hídrica, el agua podrá circular a una mayor velocidad produciendo una mayor erosión del suelo. En cambio, los colores blancos y verdes señalan las regiones con mayor valor de TWI que indican una acumulación de agua en el suelo y marca, en este caso, la red de drenaje de la cuenca.

El SPI varían entre 7 y 17 (FIGURA 3-B). Este índice adquiere los mayores valores (de color rojo – amarillo) en áreas de la cuenca donde se concentra el flujo superficial. La combinación de un valor elevado del índice SPI y un bajo valor del TWI, son buenos indicadores para localizar de forma preliminar regiones donde se podrían formar cárcavas en zonas agrícolas (Moore *et al*, 1988). Cabe destacar que estos índices no toman en consideración otras características del suelo como la textura, estructura, drenaje, clima los cuales en su conjunto complementan un análisis más exhaustivo del contenido de humedad del suelo o el flujo superficial del agua. Sin embargo, sus resultados son válidos como aproximación a las condiciones de suelo (Beron de la Puente, 2021).

4.2. Variación de erosión hídrica

Para la cuenca del arroyo Napostá Grande los valores de variación de la erosión hídrica oscilan entre 17 y 99% (FIGURA 3-C). Los colores rojos indican la máxima variación (encima del 90%) y los verdes claros y amarillos indican variaciones entre 30 a 60%. Los valores en donde hay mayor variación de erosión hídrica se deben a la inclusión del Factor C en el cálculo EHa. En otras palabras, el rol que cumple la vegetación en disminución de la erosión en estas zonas es muy importante. En consecuencia,

estas zonas se tornan más vulnerables a la pérdida de suelo si se modifica la cobertura vegetal. En este caso, la planificación del control de la erosión hídrica debe tener en cuenta este resultado.

4.3. Factor Topográfico LS – RUSLE

Para la cuenca alta del arroyo Napostá Grande, ubicada sobre el piedemonte serrano, el factor topográfico (LS) varía de 0 a 45 y es de suma importancia, dado que incide directamente en la susceptibilidad de movilización del suelo por la ladera, debido a la acción de las lluvias. La disparidad en el gradiente de la pendiente se ve reflejada en la FIGURA 3-D, donde los mayores valores de LS (naranja/rojo) se corresponden con pendientes más pronunciadas alcanzando en los máximos en sectores de afloramientos rocosos.

4.4. El modelo de peligrosidad de formación de cárcavas a través de la AHP

La asignación de pesos para cada variable utilizada, cuyos resultados se expusieron precedentemente. Esta reclasificación se realizó para el Factor LS, el TWI, el SPI y la variación erosión hídrica por separado. Posteriormente, al aplicar la técnica (AHP), se construye la matriz de comparación por entre estas variables obteniéndose los resultados indicados en la TABLA 2. De esta manera, se genera esta matriz donde se compara la importancia de cada una de ellas con relación a las demás para, posteriormente, sumar cada columna y crear una nueva matriz normalizada dividiendo cada número almacenado en las celdas de una columna de la matriz por la suma total de la columna.

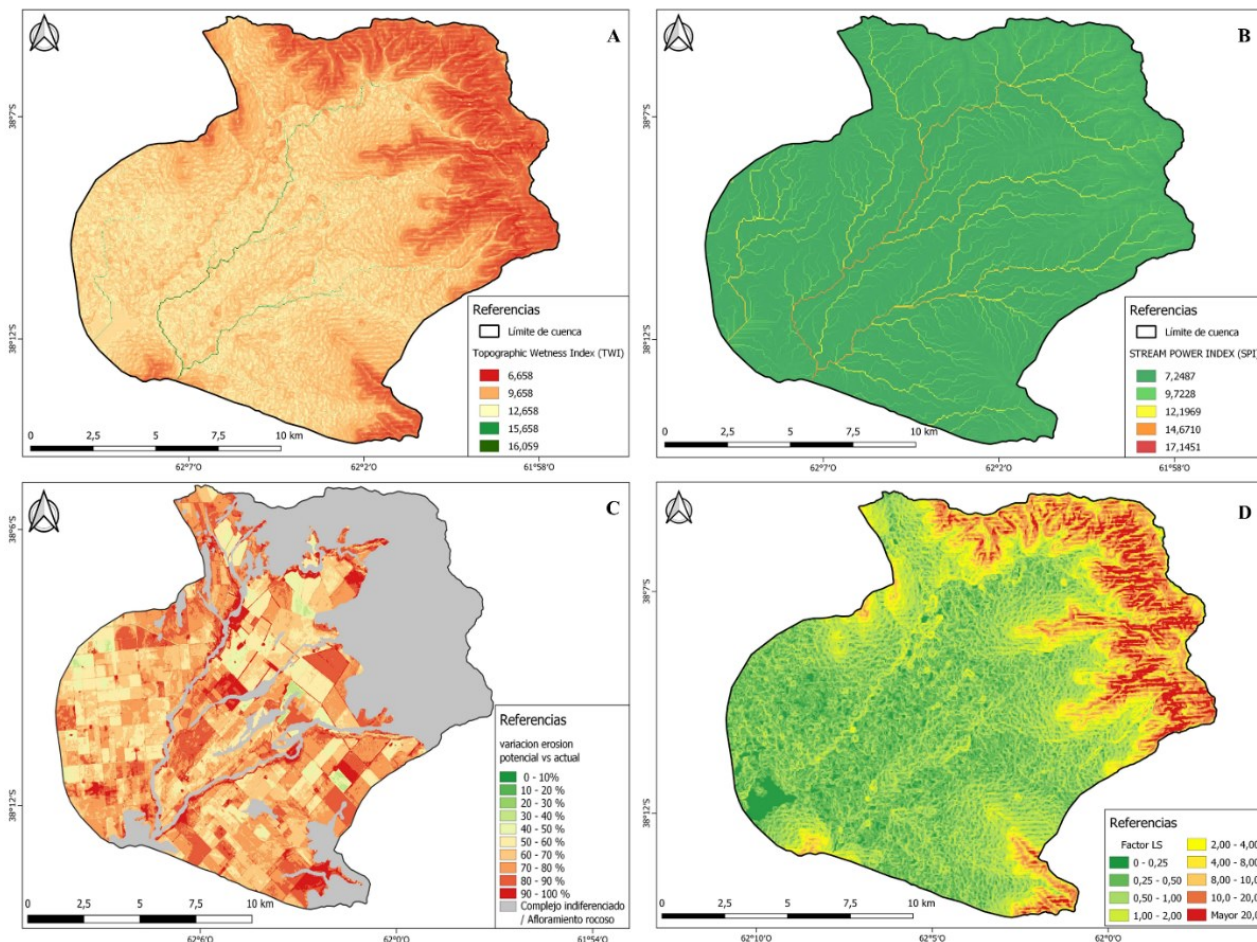


FIGURA 3. Variables utilizadas en la evaluación multicriterio. Fuente: elaboración propia

TABLA 2. Matriz de comparación por pares. Fuente: elaboración propia

	Factor LS	TWI	Variación de erosión hídrica	SPI
Factor LS	1	3.03	5.0	8.33
TWI	0.33	1	3.03	5.0
Variación de erosión hídrica	0.2	0.33	1	3.03
SPI	0.12	0.20	0.33	1

Luego en esta nueva matriz normalizada se obtiene el vector principal W_j para cada variable (eigenvector principal) realizando la sumatoria de cada fila (Saaty, 1980) como se indicó en el apartado de metodología. Según la asignación de pesos a cada una de las variables en la matriz, el resultado final de la Relación de Consistencia (CR) fue de 0,036 (menor a 0,10) valor que indica que la relación

de pesos asignados a las diferentes alternativas de los criterios, es aceptable. Una vez finalizado el procedimiento del método AHP se realizó el álgebra de mapas para finalmente obtener el mapa de riesgo de peligrosidad de formación de cárcavas (FIGURA 4). Se establecieron 5 categorías para representar los niveles de peligrosidad de

formación de cárcavas: muy baja, baja, media, alta y muy alta.

Se puede observar que las áreas que presentan la categoría de peligrosidad muy alta (color rojo) se localizan en sectores del piedemonte y forma patrones lineales semejantes a una red de drenaje que complementa y se suma a la existente. Sumado a esto, las cárcavas ya formadas e identificadas

visualmente coinciden con áreas que el modelo identificó con el rango de muy alto. A nivel general, se puede destacar que las cárcavas identificadas no siguen un patrón sobre el tipo de suelos, sino por las condiciones topográficas, dando a entender que las cárcavas pueden surgir por las características naturales de la cuenca y dependiendo del manejo de los cultivos y tipo de cultivos.

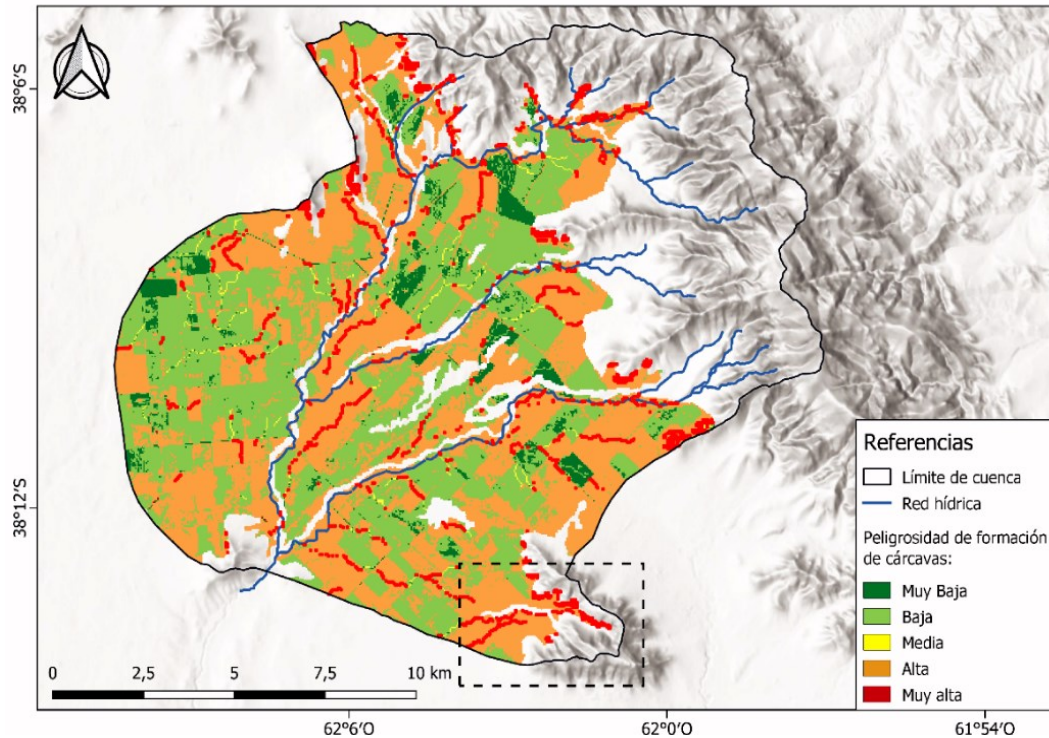


FIGURA 4. Zonas de identificación de cárcavas y zonas de potencial formación. Línea discontinua zoom a cárcava de estudio (FIG. 5). Fuente: elaboración propia

En la FIGURA 4 se cartografiaron zonas de peligrosidad potencial de formación de cárcavas siendo los sectores de color rojo los que presentan mayor peligrosidad potencial de carcavamiento. Se focaliza para su análisis una cárcava ejemplo que se identificó a partir de la metodología propuesta (línea discontinua), ubicada en el extremo sureste de la cuenca. En la FIGURA 5 se detalla sus características, el perfil topográfico indica su longitud total (2.170 m) y un desnivel de 40 m resultando en una pendiente de 1,8 %.

Si analizamos los diferentes factores aplicados para su identificación, el TWI (FIGURA 5-1) arroja los menores valores, lo que significa que el agua no queda retenida por el suelo, sino que escurre inicialmente como flujo laminar. Por otro lado, el SPI (FIGURA 5-2) toma mayores valores en ese sector, por lo tanto la concentración de flujo superficial es mayor, favoreciendo la escorrentía superficial y, en consecuencia, la erosión del suelo.

La variación de la erosión hídrica (FIGURA 5-3) da un valor por encima del 70 %, lo que significa que

la cobertura vegetal en ese sector, y sobre todo en la cabecera de la cárcava, es un factor importante en la reducción de la tasa de erosión.

Finalmente, el factor LS (FIGURA 5-4) toma valores bajo a medios (entre 0,25 y 2), con lo cual

las pendientes no son pronunciadas, esto corresponde con el porcentaje de pendiente que en la zona de la cabecera de cárcava es entre el 5 al 10% (Beron de la Puente, 2021).

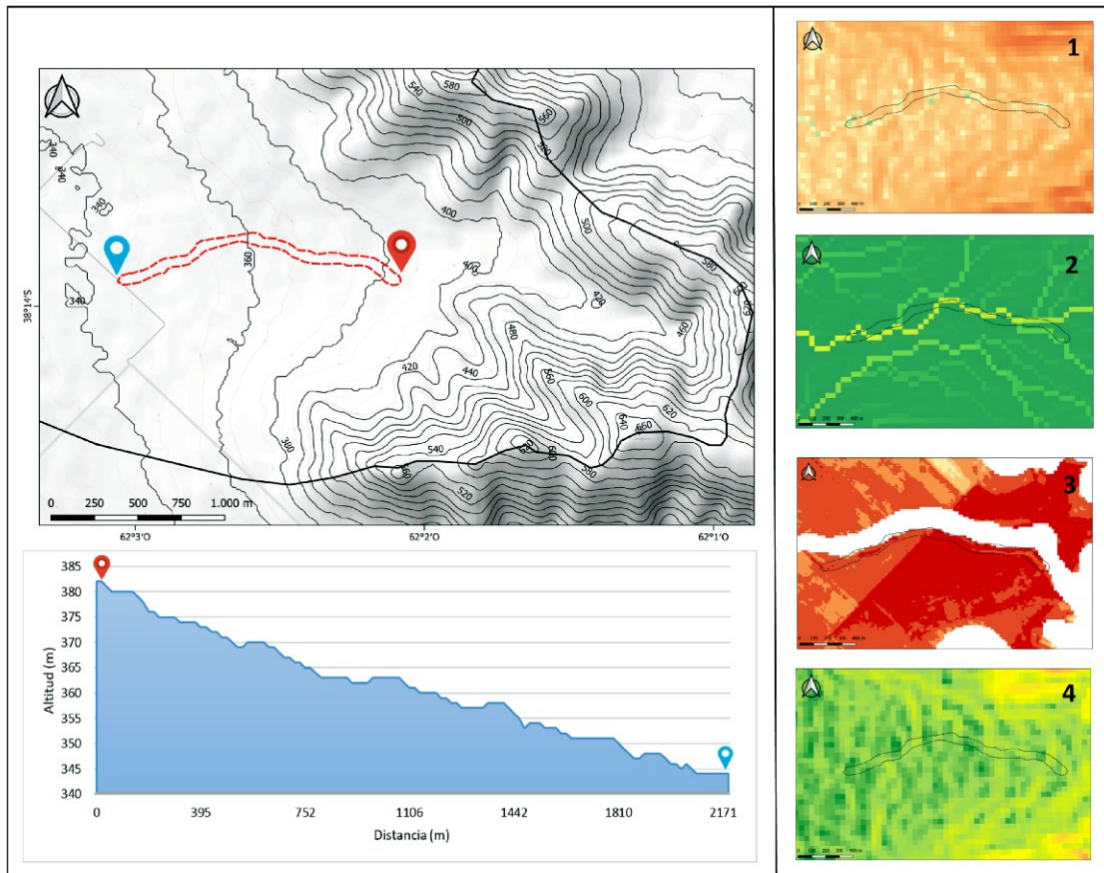


FIGURA 5. Perfil topográfico y variables utilizadas para la evaluación multicriterio de una cárcava. Su localización está indicada en la FIGURA 4 (líneas punteadas). Fuente: elaboración propia

Con estos resultados en su conjunto, e indirectamente con la variación de la erosión hídrica, se puede afirmar que el tipo de cobertura vegetal existente en el lugar es un factor determinante para el grado de erosión. Esto sucede debido a que las plantas protegen el suelo del impacto de las gotas de lluvia y las raíces lo sostienen favoreciendo la textura y estructura del mismo. Además, estas también tienden a aumentar la infiltración de agua, lo que reduce el volumen de flujo superficial en el sentido de la pendiente y, por

lo tanto, se reduce la erosión laminar significativamente (Woo y Luk, 1990). Merrill *et al.* (2002), Chagas *et al.*, (2004) y De La Vega *et al.* (2004) llegaron a las mismas conclusiones para diferentes tipos de suelos de la provincia de Buenos Aires y sudeste de la provincia de Córdoba, donde el suelo que presentaba un mayor porcentaje de cobertura vegetal respecto al suelo sin cobertura, la infiltración del agua era mayor y, por consiguiente, el riesgo de erosión hídrica disminuía a medida que este porcentaje aumentaba.

Por otra parte, Varis y Vakkilainen (2001) y Sidle *et al.* (2004) indican que si la cubierta vegetal es reducida, la escorrentía y la erosión del suelo puede aumentar en gran medida y pueden ser formadores de cárcavas. Con ello, la importancia de identificar las 4 variables, no solo el factor LS, sino hacer un análisis en conjunto tomando en consideración al SPI y al TWI (nuevas variables), así como un mapa

5. Conclusiones

En el estudio de la formación de cárcavas se destaca la utilización de los TWI y el SPI como índices necesarios para su análisis. Se pudo demostrar mediante su implementación sectores de la cuenca en las que se representa las zonas con baja captación de agua, y por ende una mayor circulación laminar (TWI), y áreas de la cuenca en donde se puede concentrar el flujo superficial (SPI).

Mediante la aplicación del método AHP se pudo 1) identificar efectivamente zonas de cárcavas activas en las zonas de piedemonte y, 2) mapear aquellas zonas donde hay una alta peligrosidad de formación de cárcavas. Estas formas erosivas pueden iniciarse en sectores donde el valor de SPI es mayor, las zonas de captación con bajos o moderados valores de TWI y la variación de la erosión hídrica llega a altos porcentajes. La creación de las mismas en la cuenca se debe principalmente a factores topográficos (pendiente y longitud de

pendiente) y al porcentaje de cobertura de suelos. Este último se puede controlar mediante la aplicación de técnicas agronómicas para el manejo de suelo como la cobertura de rastrojos postcosecha o la siembra directa.

Finalmente, este tipo de análisis y uso de metodologías específicas a través de aplicación de geoprocesos no solo permiten la creación de conocimientos, sino que generan un análisis integral frente a una problemática específica. Los resultados volcados en los diferentes mapas temáticos permiten identificar fácilmente el estado de la erosión hídrica de la cuenca, la pérdida de suelos y un modelo de peligrosidad de formación de cárcavas, los cuales son útiles a la hora de la elaboración de planes de ordenamiento territorial, tomar decisiones sobre la manera de controlar la erosión hídrica y a futuro la generación de políticas para ayudar al cuidado de los suelos.

pendiente) y al porcentaje de cobertura de suelos. Este último se puede controlar mediante la aplicación de técnicas agronómicas para el manejo de suelo como la cobertura de rastrojos postcosecha o la siembra directa.

6. Agradecimiento

Este trabajo fue realizado en el marco de los proyectos de investigación Geografía Física Aplicada al estudio de la interacción sociedad-naturaleza. Problemáticas ambientales a diferentes escalas témporo-espaciales (PGI – UNS 24/G092). Consecuencias ambientales de eventos hidrometeorológicos (extremos positivos) en cuencas de vertientes opuestas del cordón Sierra de la Ventana (PIP - CONICET 11220210100358CO)

7. Referencias citadas

ÁNGELES, G.; Mc COUBREY, G. y F. BARRAGÁN. 2011. Evaluación de la aptitud del medio geográfico para desarrollar viñedos en un sector de las Sierras de la Ventana, Buenos Aires, Argentina. *I Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfico y IV Reunión de usuarios de Tecnologías de la Información Geográfico del NEA, Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfico*, Dto. de Geografía, Facultad de Humanidades, Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia, Argentina.

ALASKA SATELLITE FACILITY. *Modelo Digital de Superficie Alos Palsar*. Disponible en: <https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>. [Consulta: febrero, 2023]

- BARREDO CANO, J. I. 1996. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio*. RaMa. Madrid, España.
- BELENGUER PLOMER, M. Á. 2016. "Detección de problemas en la localización de usos del suelo mediante SIG y AHP: el caso de Riba-Roja de Túria (Valencia)". *GeoFocus*, 18: 3-24.
- BERON DE LA PUENTE, F. 2021. *Información Geoespacial aplicada a la erosión hídrica en la cuenca del arroyo Napostá Grande*. Departamento de Química, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. Tesis de Grado.
- BERON DE LA PUENTE, F.; GIL, V. y M. VIALE. 2022. Realzamiento orográfico de precipitaciones en las Sierras Australes bonaerenses. *Congremet XIV*. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://cenamet.org.ar/congremet/wp-content/uploads/2022/11/>.
- BERÓN DE LA PUENTE, F. y V. GIL 2021. Aplicación de TIG para la estimación del Factor C en la cuenca alta del Arroyo Napostá Grande, Buenos Aires. *V Congreso Nacional de Tecnologías de Información Geográfica y III Congreso Internacional de Tecnologías de Información Geográfica*. Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. Argentina.
- BEVEN, K. J. & M. J. KIRKBY. 1979. "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant". *Hydrological Sciences Bulletin*, 24: 43-69. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- BOCCO, G. 1991. "Gully erosion: processes and models". *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 15(4): 392-406.
- BUZAI, G. D. y E. M. GALBÁN. 2020. "El mapa social de la ciudad de Córdoba (Argentina): Construcción cuantitativa e interpretación modelística". *Cuadernos Geográficos de la Universidad de Granada*, 59(1): 299-315.
- BUZAI, G.; BAXENDALE, C.; CACACE, G. y M. DZENDOLETAS. 2011. *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. Departamento de Ciencias Sociales, Universidad Nacional de Luján. Buenos Aires, Argentina.
- CARA, L. 2012. *Estudio geomorfológico del sector central del Departamento de Tupungato, aplicando técnicas geomáticas. Provincia de Mendoza, Argentina*. Universidad Nacional de San Juan. Argentina. Trabajo Final de Carrera.
- CASADO, A. L. y A. M. CAMPO. 2019. "Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina". *Cuadernos Geográficos*, 58(1): 6-26. Disponible en: <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>.
- CLIMATIC RESEARCH UNIT. 2023. *High-resolution gridded datasets*. Disponible en <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>. [Consulta: febrero, 2023]

- CHAGAS, C.; IRURTIA, C.; THISTED, J.; SANTANATOGLIA, O. J.; MASSOBRIO, M. J.; ... y A. BUJÁN. 2004. "Movimiento horizontal y vertical de agua y partículas en un Argiudol bajo siembra directa". *Ciencia del Suelo*, 22(2): 114-119.
- CISNEROS, J.; CHOLAKY, C.; CANTERO, G.; GONZÁLEZ, J.; REYNERO, M.; DIEZ, A.; ... y A. DEGIOANNI. 2012. *Erosión hídrica. Principios y técnicas de manejo*. UniRío Editora. Río Cuarto, Argentina.
- DE LA VEGA, G.; CASTIGLION, M. G. I.; MASSOBRIO, M. J.; CHAGAS, C. I.; SANTANATOGLIA, O. J. y C. IRURTIA. 2004. "Infiltración en un Argiudol vertico bajo siembra directa en condiciones variables de cobertura humedad inicial". *Ciencia del Suelo*, 22(1): 52-55.
- ESPAÑOL MARIÑO, A. R. 2017. *Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa en la subcuenca del arroyo Quijorna mediante evaluación multicriterio*. Universidad de Salamanca. España. Tesis de Maestría.
- GIL, V. y A. CAMPO. 2000. Cuenca del arroyo del Oro: Características hidrográficas y los efectos sobre la población. *III Jornadas de Geografía Física*, Universidad del Litoral. pp.153-159. Santa Fe, Argentina.
- HAAN, C. 1994. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State Univ. Press, Ames. USA.
- HERNÁNDEZ-ZARAGOZA, P.; VALDEZ-LAZALDE, J. R.; ALDRETE, A. y T. MARTÍNEZ-TRINIDAD. 2019. "Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales". *Madera y Bosques*, 25(2).
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). 1989. *Mapa de Suelos de la provincia de Buenos Aires*. Escala 1:500.000. Buenos Aires, Argentina.
- McCool, D. K.; BROWN, L. C. & G. R. FOSTER. 1989. "Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation". *Transactions of ASAE*, 32(5): 1.571-1.576.
- MERRILL, S. D.; KRUPINSKY, J. M. & D. L. TANAKA. 2002. Soil coverage by residue in diverse crop sequences under No-till. USDA-ARS. *Annual Meeting of ASA-CSSA-SSSA*, IN, USA.
- MOORE, I. D. & G. J. BURCH. 1986. "Physical basis of the length slope factor in the Universal Soil Loss Equation". *Soil Science Society of America*, 50: 1.294-1.298.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B. & A. R. LADSON. 1991. "Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications". *Hydrological Processes*, 5(1): 3-30.
- MOORE, I. D.; O'LOUGHLIN, E. M. & G. J. BURCH. 1988. "A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications". *Earth Surface Processes and Landforms*, 13(4): 305-320.
- NAJERA GONZÁLEZ, O.; BOJÓRQUEZ SERRANO, J. I.; FLORES VILCHEZ, F.; MURRAY NUÑEZ, R. M. y A. GONZÁLEZ GARCÍA SANCHO. 2016. "Riesgo de erosión hídrica y estimación de pérdida de suelo en paisajes geomorfológicos volcánicos en México". *Cultivos Tropicales*, 37(2): 45-55.

- RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K. & D. C. YODER. 1997. *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agricultural Handbook N°. 703. U.S. Department of Agriculture. Washington D.C. USA.
- SAATY, T. 1980. "How to make a decision: The analytic hierarchy process". *European Journal of Operational Research*, 84(1): 9-26.
- SANTOS PRECIADO, J. M. 2004. *Sistemas de información geográfica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED). Madrid, España.
- SIDLE, R. C.; TAYLOR, D.; LU, X. X.; ADGER, W. N.; LOWE, D. J.; de LANGE, W. P.; ... & J. R. DODSON. 2004. "Interactions of natural hazards and society in Austral-Asia: evidence in past and recent records". *Quaternary International*, 118-119: 181-203. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00137-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00137-X).
- STRAHLER, A. N. 1964. *Geografía Física*. Omega. Barcelona, España.
- STRUNK, H. 2005. "Soil degradation and overland flow as causes of gully erosion on mountain pastures and in forests". *Catena*, 50: 185-198.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). *Earth Explorer*. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [Consulta: febrero, 2023].
- VARIS, O. & P. VAKKILAINEN. 2001. "China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century". *Geomorphology*, 41(2-3): 93-104.
- WISCHMEIER, W. H. & D.D. SMITH. 1978. *Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning*. Agricultural Handbook (537). USDA. Washington D.C. USA.
- WOO, M. & S. LUK. 1990. "Vegetation effects on soil and water losses on weathered granitic hillslopes, south China". *Physical Geography*, 11(3): 1-16.

Lugar y fecha de finalización del artículo:
Bahía Blanca, Argentina; mayo 2023