

Evaluación Multicriterio aplicada a la determinación de escenarios de peligrosidad en la cuenca del arroyo Napostá Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina)

ALDANA MASTRANDREA¹ | GUILLERMO ANGELES²

Recibido: 11/05/2020 | Aceptado: 13/06/2020 | Publicado online: 13/10/2020

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo determinar áreas expuestas al peligro de eventos de exceso hídrico en la cuenca hidrográfica del arroyo Napostá Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina) a partir de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) y álgebra de mapas. Para ello, se seleccionaron variables del medio natural vinculadas con la generación de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo Napostá Grande. Se construyó una matriz en la que se establecieron pesos de acuerdo con el nivel de importancia relativa que cada variable, y sus componentes, presentan con respecto a la probabilidad de incrementar los niveles de peligrosidad a través del método de comparación por pares. Se analizaron los resultados a través de Sistemas de Información Geográfica y mediante EMC para identificar los sectores susceptibles a sufrir eventos de exceso hídrico con el propósito de implementar un Sistema de Ayuda a la Decisión Espacial. Se obtuvieron resultados parciales que llevan al resultado final por combinaciones estadísticas y cartográficas. Se verificó la localización de sectores expuestos a la ocurrencia de eventos de exceso hídrico a través de diferentes categorías de peligrosidad (muy baja, baja, media, alta y muy alta), información relevante para la planificación y gestión territorial.

Palabras clave: inundaciones; peligrosidad; riesgo; análisis espacial; cuenca del arroyo Napostá Grande.

Abstract

Multicriteria evaluation applied to the determination of dangerous scenarios in the Napostá Grande watershed (Buenos Aires province, Argentina)

The objective of this research is to determine areas exposed to the danger of excess water events in the Napostá Grande watershed (province of Buenos Aires, Argentina) using Multicriteria Assessment (EMC) techniques and map algebra. For this, variables from the natural environment related to the generation of floods and overflows of the Napostá Grande stream were selected. A matrix was constructed in which weights were established according to the level of relative importance that each variable and its components present with respect to the probability of increasing the levels of danger, through the method of comparison by pairs. The results were analyzed through Geographic Information Systems and through EMC to identify the sectors susceptible to events of excess water in order to implement a Spatial Decision Support System. Partial results were

1. Universidad Nacional del Sur, aldana.mastrandrea@uns.edu.ar

2. Universidad Nacional del Sur, guillermo.angeles@uns.edu.ar

obtained that lead to the final result by statistical and cartographic combinations. The location of sectors exposed to the occurrence of excess water events was verified through different hazard categories (very low, low, medium, high and very high), relevant information for territorial planning and management.

Keywords: floods; dangerousness; risk; spatial analysis; Napostá Grande watershed.

1. Introducción

Como consecuencia del incremento de fenómenos potencialmente peligrosos, derivados de la alternancia de eventos de exceso y déficit hídrico, a nivel mundial, se ha experimentado un creciente interés por conocer, prevenir y anticipar tales eventos y sus implicancias espaciales. El vínculo entre las variables propias del medio natural con otras de tipo socio-cultural interviene en la dinámica ambiental de las cuencas hidrográficas.

La probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo hídrico y de problemas ambientales entre los que se encuentran las inundaciones, anegamientos, desbordes de cursos de agua, sequías y procesos de erosión se convierte en un conocimiento que adquiere relevancia para el diseño de planes de manejo del territorio.

Teniendo en cuenta las investigaciones y trabajos que abordan el concepto de riesgo se encuentran las conceptualizaciones propuestas por autores de distintas disciplinas, entre ellas, Geografía, Sociología, Filosofía, Ingeniería y Abogacía. Las investigaciones realizadas, concluyen en que la probabilidad de ocurrencia de algunos eventos naturales, constituye situaciones de peligro para la sociedad. Estos se manifiestan tanto en la ocurrencia de complejos problemas ambientales, como en los peligros diarios que afectan la vida cotidiana de las personas (Beck, 1993; Maskrey, 1993; Wilches Chau, 1993; Giddens *et al.*, 1996; Lavell, 1996 y Rees, 2006). Otros autores definen el riesgo como el resultado imprevisto que surge como consecuencia de las actividades sociales y se refiere a un contexto caracterizado por la probabilidad de pérdidas y daños en el futuro, que van desde las físicas hasta las psico-sociales y culturales (Cardona, 1993; Herzer, 2011; Natenzon y Ríos, 2015).

Dado que el riesgo es una probabilidad de daños, relacionados con la existencia de determinadas condiciones naturales y sociales que se expresa bajo una condición latente y puede medirse en términos cuantitativos y cualitativos, es necesario profundizar en nuevas metodologías y técnicas para su abordaje. La Evaluación Multicriterio (EMC) y el álgebra de mapas constituyen técnicas apropiadas para el análisis espacial de las condiciones de riesgo y de sus dimensiones ya que, dentro de un conjunto de alternativas posibles, permiten seleccionar aquellas que respondan a aptitudes potenciales para la localización de sitios óptimos y para el desarrollo de las actividades que realiza la sociedad (Voogd, 1982; Jankowski y Richard, 1994; Barredo y Bosque Sendra, 1995; Chakhar y Martel, 2003; Lamelas, 2009; Fenta *et al.* 2015; Hernández-Zaragoza *et al.*, 2019). En el ámbito de la planificación territorial, la combinación entre ambas técnicas (EMC y álgebra de mapas) constituye una herramienta que permite conocer la distribución espacial de las condiciones de peligrosidad y que sirve de ayuda a la toma de decisión, por parte de los organismos pertinentes, con el objetivo de mitigar o minimizar los impactos territoriales que afecten a los habitantes (Romero, 1993; Buzai *et al.*, 2020).

El análisis de los problemas ambientales a través de la EMC ha sido abordado desde diversos enfoques. Pacheco y Contreras (2008) estudiaron a través de técnicas de EMC la factibilidad de seleccionar alternativas para la priorización de proyectos de infraestructura de diversa índole (educacional, hidráulica y de deportes) en Santiago, Chile. Por su parte, Henríquez Ruíz y Quense Arbazúa (2010) aplicaron una metodología de EMC para analizar los usos y coberturas de la cuenca del río Chillán (VIII Región del Biobío, Chile) con el fin de determinar los sitios más óptimos para cuatro usos representativos: espacios de conservación, plantaciones forestales, usos agrícolas y áreas de expansión urbana. Rivera *et al.* (2010) analizaron, a través de EMC, el potencial productivo de la caña de azúcar en la región Huasteca de México con el fin de disminuir la incertidumbre ante las limitaciones del mercado e incrementar la productividad. En esta línea, Da Silva y Cardozo (2015) utilizaron técnicas de EMC y Sistemas de Información Geográfica (SIG) a fin de identificar espacios potenciales para la ocupación residencial en la ciudad de Resistencia (provincia de Chaco, Argentina) con problemas en la proyección de su crecimiento espacial debido a las características ambientales del sitio. Asimismo, Hernández Zaragoza *et al.* (2019) utilizó técnicas de EMC para seleccionar el sitio óptimo del establecimiento de plantaciones forestales comerciales en los municipios de Durango, Nombre de Dios y Súchil (estado de Durango, México).

Sin embargo, si bien existen diferentes estudios que abordan, a través de las técnicas mencionadas, los problemas derivados de la interrelación sociedad-naturaleza es necesario considerar la especificidad de los vínculos que se producen en ámbitos regionales y locales. La inclusión de variables, correspondientes tanto al medio físico como socio-cultural, implica considerar el proceso de toma de decisiones como una instancia dinámica apoyada en datos, informaciones, fuentes y actores sociales diversos. De allí que, la representación espacial a escala de cuenca de las condiciones de peligrosidad -como una de las categorías del riesgo- permite determinar los sectores susceptibles a la ocurrencia de problemas ambientales, como inundaciones, anegamientos y desbordes de cursos de agua. Esta información genera uno de los primeros resultados necesarios para la toma de decisiones y para la gestión del espacio fluvial bajo estudio.

La presente investigación tiene como objetivo determinar áreas expuestas al peligro de eventos de exceso hídrico, en la cuenca hidrográfica del arroyo Naposta Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina) a partir de la aplicación de procedimientos de Evaluación Multicriterio y álgebra de mapas.

Para lograr este objetivo, se seleccionaron aquellas variables del medio natural estrechamente vinculadas con la probabilidad de generación y/o amplificación de fenómenos potencialmente peligrosos, asociados a inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo Napostá Grande. Asimismo, se construyó una matriz en la que se establecieron pesos de acuerdo con el nivel de importancia relativa que cada variable y sus componentes presentan con respecto a la probabilidad de incrementar los niveles de peligrosidad, a través del método de comparación por pares (Saaty, 1980). Finalmente, se analizaron los resultados a través de las relaciones establecidas en el SIG y mediante la EMC para identificar los sectores susceptibles a sufrir eventos de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo con el propósito de implementar un Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones (Lamelas, 2009).

Se obtienen resultados parciales a través de aproximaciones que llevan al resultado final por combinaciones estadísticas y cartográficas. Se verifica la localización de las áreas expuestas a la ocurrencia de eventos de exceso hídrico mediante diferentes categorías de peligrosidad, información

relevante para la planificación y gestión territorial. Dicho insumo será de suma importancia para la generación de una base cartográfica orientada al posterior análisis de las condiciones de riesgo hídrico en la cuenca.

2. Teoría Social del Riesgo en el análisis de las condiciones de peligrosidad

El abordaje de problemas ambientales, a través de la Teoría Social del Riesgo, tiene una larga tradición en las investigaciones que analizan los vínculos sociedad-naturaleza. Conocer las características de este vínculo podría contribuir a diseñar adecuados mecanismos de actuación ante la generación de eventos potencialmente peligrosos para la población.

En el ámbito internacional, uno de los primeros aportes con respecto a la conceptualización del riesgo ha sido el propuesto por Beck (1993) quien sostiene que la probabilidad de ocurrencia de riesgos constituye situaciones de peligro para la sociedad. Estos se manifiestan tanto en la ocurrencia de complejos problemas ambientales, como en los peligros diarios que afectan la vida cotidiana de las personas, entre los que se encuentran las inundaciones, anegamientos, desbordes y sequías. Otra visión, es la que brinda Maskrey (1993) quien afirma que la lectura del riesgo que realizan los especialistas difiere de la representación social que tienen, tanto las comunidades expuestas a un peligro como las autoridades gubernamentales encargadas de la gestión y toma de decisiones. De allí que, es necesario profundizar en un conocimiento que proporcione herramientas concretas para la planificación y ordenamiento del territorio. Por su parte, Wilches Chaux (1993) entiende el riesgo como “... cualquier fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente que ocupa una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno” (1993: 17). Es dable destacar que el desastre se diferencia del concepto de riesgo, el cual debe concebirse en términos de procesos dinámicos dado que, se construye social, histórica y territorialmente en la articulación de amenazas o peligrosidades y vulnerabilidades (Lavell, 1999).

A escala nacional, es importante destacar los aportes de Natenzon y Ríos (2015) quienes afirman que los primeros estudios que trataron las catástrofes y los riesgos surgieron durante la primera mitad del siglo XX a partir de un abordaje fiscalista ya que, desde las Ciencias Naturales, se focalizaron en la ocurrencia de eventos de naturaleza extrema. Estos acontecimientos, ubicaban a la sociedad en un lugar pasivo ante la magnitud de las fuerzas físicas asociadas con fenómenos meteorológicos, geológicos y biológicos, entre otros. En tal sentido, se otorgaba una especial importancia a la ocurrencia de un evento potencialmente peligroso o a la amenaza, entendida esta como la probabilidad de que ocurra un riesgo frente al cual una comunidad es vulnerable (Natenzon y Ríos, 2015). De esta manera, un fenómeno natural puede convertirse en peligroso para la sociedad cuando ocasiona un daño, por su tipo y magnitud, por su carácter sorpresivo y por la incertidumbre que existe respecto de su probabilidad de ocurrencia (Herzer, 2011; Carballo y Goldelberg, 2014; Natenzon y Ríos, 2015).

Así, por ejemplo, la generación de intensas precipitaciones en cortos períodos de tiempo o la persistencia de extensos períodos con déficit hídrico, pueden generar consecuencias para los habitantes del espacio urbano y rural del área de estudio. Eventos como inundaciones, desbordes del arroyo, anegamientos, sequías, procesos de erosión sin duda pueden producir problemas en la vida cotidiana de la población asentada en el área de la cuenca del arroyo Napostá Grande. Con respecto a dichos fenómenos y a las implicancias que generan, es preciso mencionar que los daños ocasionados guardarán una estrecha relación con el grado de vulnerabilidad ambiental de la

cuenca y de las comunidades implicadas en ella (Gaspari *et al.*, 2011; Senisterra *et al.*, 2015; Vera y Albarracín, 2017; Mastrandrea y Angeles, 2020).

En este marco, cobran sentido las categorías de peligrosidad, vulnerabilidad, exposición e incertidumbre que, en el marco de la Teoría Social del Riesgo, han sido analizadas por diversos autores. Con respecto a la peligrosidad³, Natenzon (1995) expresa que cuando un fenómeno irrumpe en la cotidianidad -como pueden ser intensas precipitaciones o sequías- y hace posible que se concrete una amenaza, se considera la probabilidad de que ocurra un riesgo ante el cual la sociedad debe responder. Desde el punto de vista conceptual, diversos autores se han enfocado en definir estas categorías y, en este sentido, Wilches Chaux (1993) entiende la amenaza como la “... *probabilidad de que ocurra un riesgo frente al cual una comunidad es vulnerable...*” (1993: 44) y Cardona (1993) la define como “... *la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto período de tiempo en un sitio dado...*” (1993: 48). Así, la peligrosidad, en estrecha relación con las Ciencias Naturales, según Natenzon y Ríos (2015), se refiere al potencial peligroso que tienen los fenómenos naturales (espontáneos o manipulados técnicamente), potencial inherente al fenómeno mismo, sea cual sea su grado de artificialidad. Una forma de gestionar la peligrosidad es conocerla y, por esto, el aporte de las ciencias naturales básicas y aplicadas es imprescindible.

La peligrosidad en el área de estudio se encuentra asociada con la ocurrencia de eventos de exceso y déficit hídrico, fenómenos propios del sudoeste bonaerense (Campo *et al.*, 2004). Dicha alternancia, junto con las intervenciones sociales en la ocupación del espacio urbano y rural de la cuenca del arroyo Napostá Grande, generan problemas en el medio natural y social. De este modo, la amenaza o peligrosidad hace referencia a un factor de riesgo externo que se encuentra mediado por la sociedad y por la técnica.

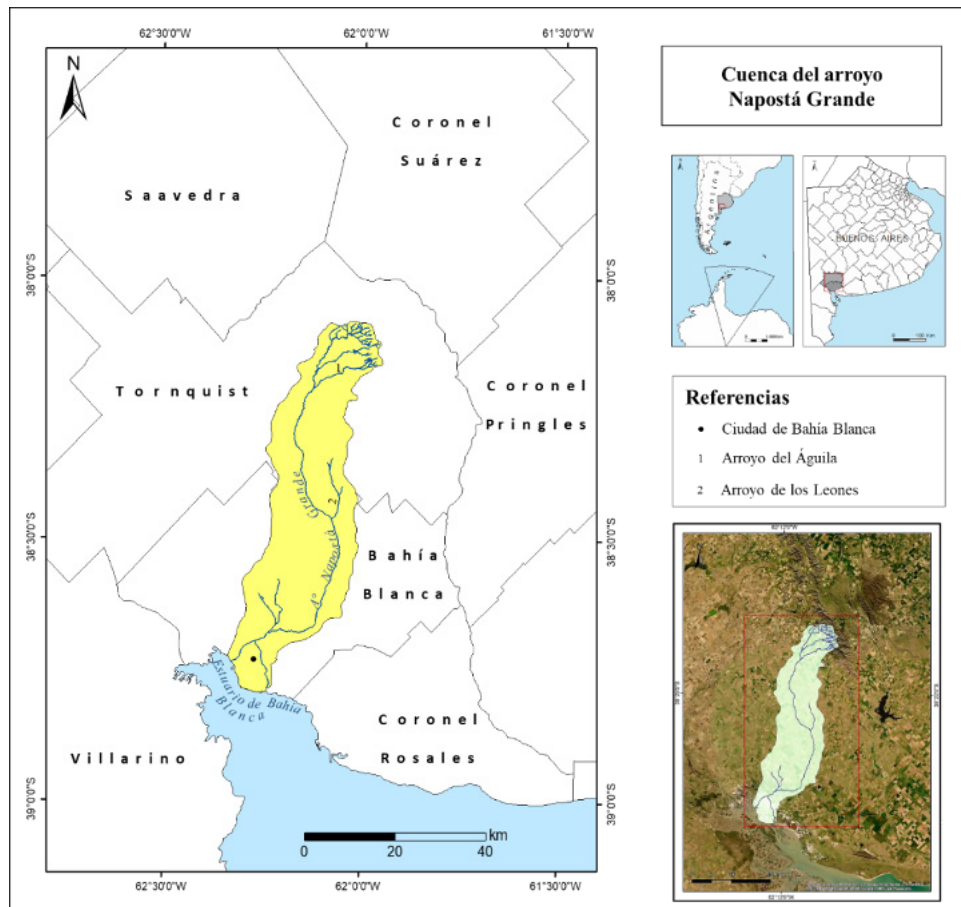
Teniendo en cuenta los posibles eventos que pueden desencadenarse en el futuro y generar condiciones de peligrosidad, Cardona (1993) sostiene que es importante conocer las características de estos fenómenos, en un contexto integral, para planificar y orientar los procesos de desarrollo. En consecuencia, la detección y prevención, de las condiciones de peligrosidad que puede generar la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo Napostá Grande colabora en la reducción del riesgo hídrico en la cuenca.

3. Área de estudio

El área de estudio comprende la cuenca hidrográfica del arroyo Napostá Grande que se encuentra delimitada por los meridianos 61° 55' y 62° 15' longitud oeste y por los paralelos de 38° 05' y 38° 50' latitud sur. La misma nace en el cerro Napostá (1108 m.s.n.m.) y en su recorrido en sentido norte-sur recibe afluentes por su margen izquierdo, tanto de carácter permanente -arroyo de los Leones-, como intermitente -arroyo del Águila- hasta desembocar en el estuario de la bahía Blanca (Carrica, 1998). El área incluye los partidos de Tornquist y Bahía Blanca, siendo la localidad homónima de este último partido el principal núcleo urbano con 301.572 habitantes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010) (figura 1).

3. Se considera el concepto de peligrosidad dado que, a diferencia del concepto de peligro, involucra la relación sociedad-naturaleza. Según Natenzon y Ríos (2015, en: Ríos y Natenzon, 2015) “... *la diferencia entre lo natural y lo antrópico se ha desdibujado por la intervención creciente de la tecnología... Es decir, más allá del proceso causal desencadenante o de la peligrosidad... las respuestas estarán mediadas por la técnica*” (2015, p. 14).

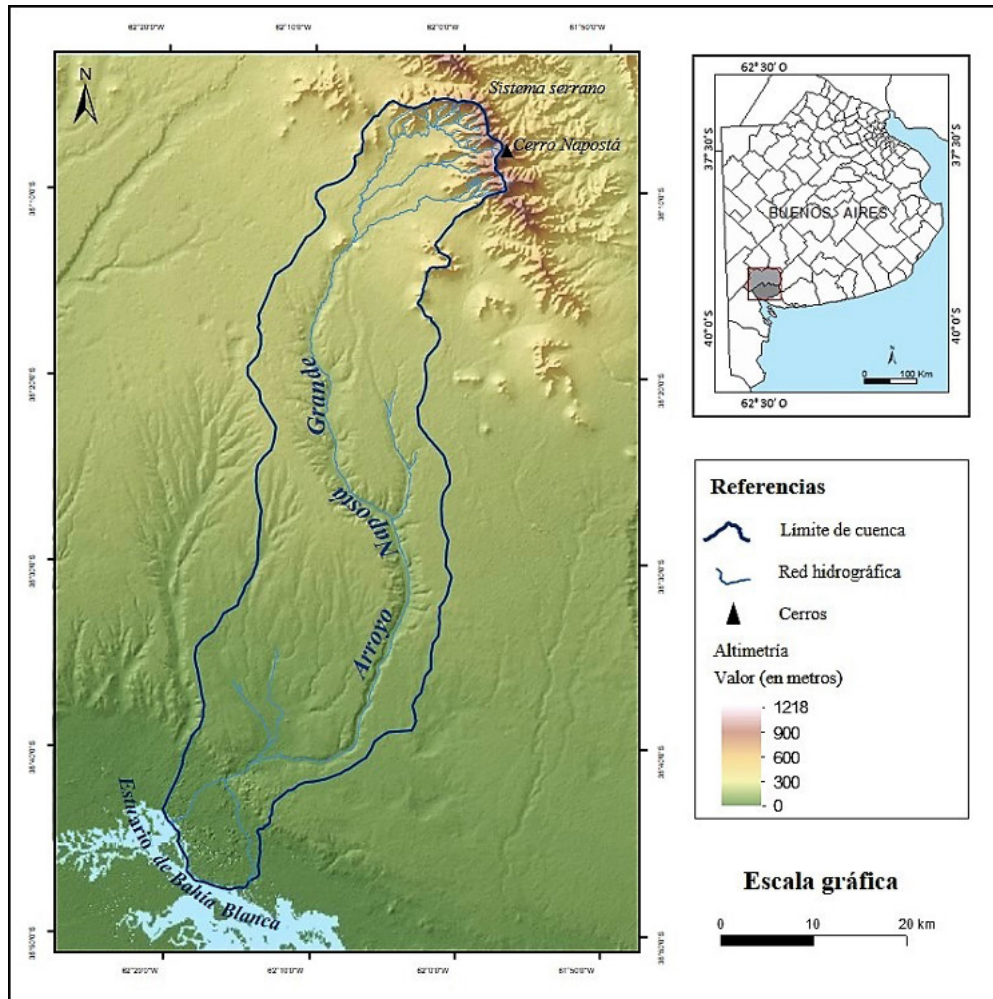
Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

El área forma parte de la vertiente sudoccidental de las sierras australes bonaerenses y el arroyo nace en el sistema de Ventania con un relieve abrupto de crestas pronunciadas que alcanza las mayores alturas de la provincia (Carrica, 1998). La presencia de dos sistemas serranos, Ventania y Tandilia, permite identificar la mayor divisoria de aguas del sudoeste bonaerense que origina numerosos ríos y arroyos y forma cuencas endorreicas y exorreicas. El relieve presenta un ordenamiento escalonado con valores decrecientes desde las sierras hacia el mar reconociéndose, según Carrica (1998), dos ambientes o sistemas: la sierra y la llanura. El ambiente serrano incluye afloramientos rocosos ubicados por encima de los 350 m.s.n.m. y cumple una función primordial en el sector ya que delimita y regula el funcionamiento de la red de drenaje. Por su parte, el ambiente de llanura, se extiende desde el piedemonte de la sierra hasta la desembocadura del arroyo Napostá Grande y es en dicho ambiente donde se manifiestan procesos erosivos que, luego de intensas lluvias, forman llanuras aluviales afectadas por inundaciones derivadas de las crecidas del arroyo (figura 2).

Figura 2. Altimetría de la cuenca del arroyo Napostá Grande



Fuente: Elaboración propia.

4. Metodología

La probabilidad de ocurrencia de riesgos ambientales es una situación que debe considerarse teniendo en cuenta la relación sociedad-naturaleza y la construcción social de escenarios de peligrosidad y vulnerabilidad. En el área de estudio, ante la alternancia de eventos de exceso y déficit hídrico, es relevante identificar los sectores susceptibles de sufrir tales inconvenientes. Los eventos de exceso hídrico, es decir, la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo han sido los fenómenos considerados para analizar las condiciones de peligrosidad, debido a las consecuencias territoriales que los mismos generan, tanto para los habitantes del espacio rural como urbano de la cuenca (Mastrandrea y Pérez, 2018; Mastrandrea, 2019). Entre ellas, se destacan: la modificación de las actividades socio-económicas de los productores agropecuarios en el espacio rural ya que, ante eventos de exceso hídrico deben suspender sus labores productivas y la interrupción de las actividades cotidianas de los habitantes del espacio urbano, especialmente en lo que respecta al tránsito vehicular y peatonal, entre otras.

Las variables del medio natural que se incluyeron para el abordaje de la peligrosidad fueron: Unidades Morfológicas Homogéneas (UMH), pendiente y suelos. Su elección, radica en la relación

que se produce entre sus características y la probabilidad de generación y/o amplificación de fenómenos de exceso hídrico potencialmente peligrosos. Con respecto a las Unidades Morfológicas Homogéneas (UMH) su delimitación se realizó tomando como base la observación de imágenes satelitales obtenidas del Google Earth Pro y la clasificación propuesta por González Uriarte (1984), quien caracterizó unidades a escala regional incluyendo criterios morfo-estructurales. En relación con la pendiente se tuvo en cuenta el Modelo Digital de Elevación del Terreno⁴ descargado del sitio Web del IGN a escala 1:50.000, interpretado según la clasificación de pendientes propuesta por Van Zuidam (1979). Para el análisis de los suelos se utilizó una cobertura elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria sobre la base del Atlas de Suelos de la República Argentina a escala 1:500.000 (INTA, 1990) con información a nivel de serie de suelo dominante. La base cartográfica digital (en formato vectorial) se obtuvo a través de cartas topográficas del área de estudio proporcionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:50.000⁵.

Bajo la aplicación de la técnica de Evaluación Multicriterio (EMC), se siguieron los lineamientos propuestos por dicha herramienta para seleccionar y jerarquizar, dentro de un número de variables consideradas, las alternativas que permitan analizar la generación de escenarios de peligrosidad en la cuenca del arroyo Napostá Grande (Voogd, 1982; Jankowski y Richard, 1994; Lamelas, 2009; Hernández-Zaragoza *et al.*, 2019; Buzai *et al.*, 2020). 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.

En el proceso que incluye la aplicación de dicha técnica se recurre, en una primera instancia, a la identificación de las variables que intervienen en la probabilidad de ocurrencia de fenómenos potencialmente peligrosos, vinculados con el riesgo hídrico en la cuenca, entre ellos: inundaciones, anegamientos y desbordes del curso en cuestión. Para ello, se elabora la cartografía temática en el software ArcGis v. 10.1.® a partir de la digitalización del límite de la cuenca, red hidrográfica, curvas de nivel, suelos, explotaciones agropecuarias y productos derivados, tanto en formato vectorial como ráster. Luego se diseña la Geodatabase y se organiza la información en el SIG.

En segunda instancia, se definen objetivos específicos vinculados con el análisis de los sectores susceptibles a ser afectados por eventos de exceso hídrico. Así, se construye una matriz en la que se establecen pesos de acuerdo con el nivel de importancia relativa que cada variable y sus componentes presentan con respecto a la probabilidad de incrementar los niveles de peligrosidad. Se considera una escala del 1 al 100, donde el 1 representa el valor menos importante y el 100 el más influyente en la generación y/o amplificación de escenarios de peligrosidad. Es dable mencionar que la asignación de pesos responde al conocimiento adquirido a través de: recopilación y análisis de bibliografía específica, observación y trabajo en el terreno, realización de entrevistas semi-estructuradas y en profundidad a informantes clave (Mastrandrea y Pérez, 2018) y consulta con especialistas en riesgo ambiental. Se procede entonces a convertir las capas de las variables

4. El Modelo Digital de Elevación (MDE) se descargó del sitio Web oficial del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con una resolución espacial de 27 metros. A su vez, se generó otro modelo digital de elevación para establecer comparaciones mediante las curvas de nivel previamente digitalizadas en el software ArcGis utilizando la herramienta create Tin; Tin to Raster de Arctoolbox.

5. Se utilizaron las siguientes cartas topográficas: Bahía Blanca (Hoja 3963-17-1, levantamiento año 1967, equidistancia de 5 metros); Base Aeronaval Comandante Espora (Hoja 3963-17-2, levantamiento año 1966, equidistancia de 5 metros); Estación Corti (Hoja 3963-11-4, levantamiento años 1937 y 1966, equidistancia de 10 metros); Estación La Vitícola (Hoja 3963-11-1, levantamiento años 1937 y 1966, equidistancia de 10 metros); Estación Napostá (Hoja 3963-11-2, levantamiento año 1937 y 1966, equidistancia de 10 metros); Tornquist (Hoja 3963-5-2, levantamiento año 1966, equidistancia de 10 metros) y Tres Picos (Hoja 3963-5-4, levantamiento año 1966, equidistancia de 10 metros).

seleccionadas en formato vectorial (UMH, pendiente, suelos) a formato ráster a través del campo de la ponderación efectuada del 1 al 100.

En tercera instancia, una vez construida la matriz anterior, y realizadas las conversiones de las capas vectoriales a ráster, se asignan los pesos correspondientes según el método de comparación por pares. Este procedimiento forma parte de una de las etapas del método EMC propuesto por Saaty (1980) denominado Analytic Hierarchy Process (AHP) o Proceso de Jerarquías Analíticas. Dicha herramienta supone que un valor alto de una alternativa en un criterio "A" compensa un valor bajo de la misma alternativa en otro criterio "B". Se aplica entonces una técnica aditiva donde los valores asignados a los criterios son normalizados para luego efectuar operaciones entre ellos y/o comparar criterios en una misma alternativa. Así se propone la construcción de un modelo jerárquico que permite analizar problemas complejos mediante la comparación entre parejas de criterios para determinar un nivel de preferencias sobre el conjunto de alternativas seleccionadas (Saaty, 1980). Este procedimiento se realizó a través del software QGis v. 2.8.[®] que contiene como complemento dicha herramienta y ofrece un soporte de validación o comprobación estadístico de tales pesos o valores. Es uno de los procedimientos de ponderación más utilizados ya que, si bien los juicios de valor asignados a los criterios son subjetivos, la comparación por pares ordena los criterios de acuerdo con una jerarquía. Luego, efectúa comparaciones binarias (es decir una a una) atribuyendo valores o pesos de acuerdo con una escala de importancia relativa ordenada de 1 a 9 que se interpreta de la siguiente manera:

Tabla 1. Escala utilizada en la asignación de pesos

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

Fuente: elaboración propia sobre la base de Saaty (1980).

Según Saaty (1980) 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. Así, el método AHP fue aplicado sobre cada variable (UMH, pendiente y suelos) con el propósito de implementar un Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones (Decision Support System o DSS) integrado en un SIG, comúnmente conocido como Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SDSS) (Lamelas, 2009; Bosque Sendra *et al.*, 2010). Finalmente, se analizaron los resultados a través de las relaciones establecidas en el SIG aplicando álgebra de mapas y mediante la EMC para identificar los sectores susceptibles a sufrir eventos de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo.

5. Ponderación de las variables que intervienen en la generación de escenarios de peligrosidad mediante EMC y SIG: Unidades Morfológicas Homogéneas (UMH), pendientes y suelos

5.1. Unidades Morfológicas Homogéneas (UMH)

La definición de unidades morfológicas con características comunes, desde el punto de vista de sus componentes físicos y de los procesos ambientales que en ellas se desarrollan, responde a una conceptualización desarrollada por diferentes autores, provenientes especialmente de la Geografía y la Ecología. Entre ellos, González Bernáldez (1973), López Bedoya *et al.* (2006) y Camino Dorta *et al.* (2014), entre otros. El concepto de Unidad Morfológica Homogénea (UMH), según los autores, se refiere a la presencia de un área con cierta homogeneidad interna con respecto a los caracteres bióticos y físicos en que se divide el territorio, como por ejemplo, en cuanto a su localización, morfología, altimetría, pendiente, vegetación, tipo de suelos y usos, entre otras variables. El objetivo de la delimitación consiste en establecer unidades de diagnóstico como base para la planificación y evaluación de potenciales riesgos ambientales, pretendiendo efectuar una síntesis de los aspectos más notables.

En el área de estudio, desde el punto de vista de las características del medio natural y del objetivo que guía la investigación, se pueden reconocer diferentes unidades morfológicas homogéneas que inciden en la dinámica general de la cuenca. La identificación se realizó tomando como base la clasificación propuesta por González Uriarte (1984) quien delimitó y caracterizó unidades a escala regional, teniendo en cuenta criterios morfo-estructurales. Según Laya *et al.* (1975) la mayor parte del sector ocupa la porción meridional del nivel pedemontano de las Sierras Australes Bonaerenses y el resto comprende un sector costero marino. La cuenca del arroyo Napostá Grande es una región de planicies extendidas y presenta dos dominios geomorfológicos: el Positivo de Ventania y el Litoral. El primero, se encuentra dividido en el Sistema Serrano (SS) y en el Nivel de Planación General (NPG) mientras que, el segundo, constituye una faja que acompaña a la línea de ribera actual vinculada a la acción marina (González Uriarte, 1984).

En el Dominio del Positivo de Ventania se delimita la primera UMH que comprende los Afloramientos Rocosos ubicados por encima de los 400 m.s.n.m. Según Carrica (1998), las serranías y cerros condicionan la red de drenaje que asume un carácter integrado y dendrítico. A su vez, las fuertes pendientes y la unidad que caracteriza el sector de la cuenca superior, evidencia la redondez de su morfología que favorece el escurrimiento superficial de carácter torrencial que impactan en la cuenca media e inferior. En dicho sector, el desarrollo de los suelos se encuentra limitado por la presencia de tosca, motivo por el cual presentan importantes restricciones para el desarrollo de actividades productivas. Teniendo en cuenta la asignación de pesos respecto del objetivo del presente estudio, en una escala del 1 al 100, se asignó un valor de 5 ya que considerando las características mencionadas anteriormente no representa un área con elevada probabilidad de ocurrencia de eventos de exceso hídrico.

La segunda UMH considerada es el área de Piedemonte localizada desde los 400 m.s.n.m. hasta los 320 m.s.n.m. y se encuentra en el Nivel de Planación General (NPG), que según González Uriarte (1984), se extiende desde los 300-350 m.s.n.m. en el piedemonte hasta los 70-80 m.s.n.m. en el frente de escarpa. Las áreas en pendiente constituyen una faja transicional que conecta el pie de la sierra con la llanura y se caracteriza por presentar procesos coluviales, un mayor espesor de materiales eólicos superficiales y una baja disección del drenaje con frecuente pérdida de los

cursos por infiltración (Carrica, 1998). Por este motivo, en una escala del 1 al 100 se asignó un peso de 25 dado que, al ser una zona transicional, si bien presenta probabilidad de ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo, en comparación con las demás unidades, no constituye un sector potencialmente peligroso.

De acuerdo con las características del relieve, del suelo y de la red hidrográfica, el Nivel de Planación General puede dividirse en las áreas pedemontanas anteriormente mencionadas y la llanura Subventánica. Según Carrica (1998) esta llanura se extiende hacia el sur con suave pendiente regional y con presencia de drenajes tanto integrados (de densidad moderada), como desintegrados (constituidos por depresiones cerradas o bajos). En la llanura Subventánica es posible identificar la tercera UMH con suelos desarrollados sobre sedimentos loésicos recientes, producto de la acción eólica que forman parte de la mayor superficie de la cuenca. Los Rellenos Sedimentarios representan, en una escala del 1 al 100, un peso de 75 ya que, la disminución de la pendiente, las características del suelo y de la red hidrográfica, facilitan la acumulación de agua ante eventos puntuales de exceso hídrico.

Según Laya *et al.* (1975), la dinámica eólica ha sido un factor importante en la formación de la cobertura superficial. Sin embargo, la dinámica fluvial otorga los rasgos más relevantes con respecto al modelado del sector. En la cuenca media, la red de drenaje se encuentra menos integrada que en la cuenca superior y según Carrica (1998: 84) “... en períodos lluviosos es frecuente la presencia de cuerpos lagunares lénticos intermitentes y de pequeñas dimensiones, con piso de naturaleza limo-arcillosa, desconectados hidráulicamente del nivel freático y no integrados a la red de drenaje...”. Estos Cursos de Agua Intermitentes fueron considerados como la cuarta UMH, a la que se le asignó un peso de 100 debido a que tras períodos de exceso hídrico se activan y conforman sectores susceptibles de sufrir anegamientos, dadas las características del sedimento loésico, poco permeable que compone la llanura y dificulta la infiltración.

La quinta UMH considerada, es el Cauce Fluvial que constituye un área que interviene en la dinámica de la cuenca. Si bien en el sector de la cuenca inferior el cauce natural presenta tramos rectilíneos, meandros encajonados y ha sido modificado por diversas obras de ingeniería, en su mayor parte del recorrido, presenta una dirección N-S y actúa como conductor de caudales que escurren desde la cuenca superior (Carrica, 1998). En una escala del 1 al 100 se asigna el mayor peso (100) ya que, ante eventos de exceso hídrico, es un sector susceptible a sufrir desbordes del curso en cuestión.

El Área Urbana fue incluida como otra UMH debido a la particularidad que presenta por ser el sector que conforma el valle de inundación del arroyo Napostá Grande. Según Carrica (1998), en el sector inferior de la cuenca, el arroyo actúa como conductor de caudales alóctonos ya que no recibe adiciones significativas motivo por el cual, a nivel de cuenca general se asignó un peso de 25. Sin embargo, la impermeabilización del valle de inundación del arroyo a través del proceso de urbanización generó un aumento de la exposición a la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo. Por tal motivo, se considera dicha unidad a nivel de cuenca general para luego, en futuros estudios, abordar la complejidad de los procesos ocurridos en cuencas urbanas

Por su parte, teniendo en cuenta el Dominio Litoral se incluyó la UMH de la Planicie Costera que se ubica desde la curva de nivel de 5 m.s.n.m. hasta la línea de ribera actual. La escasa pendiente y los procesos producto de la acción marina, generan acumulaciones de tipo coluvial y aluvial en relación con los paleocauces (Carrica, 1998). Dadas las características del terreno este sector

se encuentra mayormente expuesto a la ocurrencia de eventos de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo motivo por el cual se asignó un peso de 100.

5.2. Pendiente

Teniendo en cuenta las características de las pendientes se consideró la clasificación propuesta por Van Zuidam (1979). En función de las particularidades del área de estudio se identificaron y seleccionaron las siguientes categorías: de 0 a 3% el terreno es llano o casi llano; de 3 a 8% el terreno presenta poca pendiente; de 8 a 14% existe pendiente; de 14 a 20% se considera un terreno poco escarpado y más del 20% se define como escarpado.

En relación con la probabilidad de ocurrencia de eventos potencialmente peligrosos en lo que respecta a la generación de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo se asigna un peso de 25 a la primera categoría: un Terreno Llano o Casi Llano (0 a 3%). El área que corresponde a la mayor superficie de la cuenca no presenta una probabilidad de estar expuesta a fenómenos de exceso hídrico, en comparación con las demás categorías de análisis. La razón reside en que el sector representado por dicho nivel de inclinación del terreno no está asociado con la dinámica del arroyo ni con los problemas derivados del desborde de agua procedente de canalizaciones o cursos intermitentes que se activan cuando se producen precipitaciones intensas. A su vez, tampoco se encuentra vinculado con zonas en las que se producen procesos erosivos que generan incisiones y acumulación de agua por cambio de pendiente, por lo que se considera de importancia débil.

En relación con las pendientes que se encuentran entre un 3,1 y 8% y se clasifican según Van Zuidam (1979) como Terrenos de Poca Pendiente, se asigna el peso máximo de 100 debido a que, los sectores lindantes al cauce fluvial y aquellos ubicados en la zona de piedemonte, son los que tienen mayor probabilidad de sufrir eventos de inundaciones, anegamientos y desbordes. Entre las razones que dan cuenta de ello se pueden mencionar: la disminución de la pendiente, la cercanía al curso fluvial y los procesos erosivos en la zona de piedemonte que genera incisiones del arroyo y acumulación temporal o permanente de agua.

Luego, teniendo en cuenta las pendientes de entre un 8,1 y 14% se asigna un peso de 75, ya que corresponden a la transición entre los sectores con afloramientos rocosos y el piedemonte. Por este motivo, se consideran de importancia moderada a fuerte porque se asocian con la probabilidad de ocurrencia de fenómenos de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo. El comportamiento del curso en cuestión, cuando se genera una disminución de la pendiente, socava el material, lo erosiona y deposita pendiente abajo pero también genera incisiones que producen acumulación de agua y geoformas representativas de este proceso.

Considerando las pendientes que se encuentran entre un 14,1 y un 20%, el Terreno es Poco Escarpado motivo por el cual se asigna un peso de 50. La velocidad de la escorrentía aumenta al igual que la probabilidad de erosión hídrica, cuestión que puede intervenir ocasionalmente en la generación de inundaciones. Si bien no representan el sector de máxima probabilidad de inundación, desborde y/o anegamiento constituye igualmente un área susceptible a dichos fenómenos por lo que se considera de importancia moderada.

Por último, las pendientes que tienen un Terreno Escarpado con más de un 20% no presentan una probabilidad vinculada con la ocurrencia de fenómenos de peligrosidad por lo que se asigna

un peso de 5. La velocidad de la escorrentía asociada con zonas de máximas pendientes explica la erosión del material y su depositación pendiente abajo.

5.3. Suelos

De acuerdo con el mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires basado en la Soil Taxonomy de Estados Unidos (INTA, 1990), la mayor parte de los suelos de la cuenca se desarrollan sobre sedimentos recientes por acción eólica, es decir, sobre el material loésico que ha cubierto totalmente el faldeo de las sierras. Según Gaspari *et al.* (2003), la granulometría y naturaleza del sedimento loésico es homogénea, aunque se evidencian relictos de suelos sobre sedimentos arenosos y también sobre tosca. Es importante mencionar que la geomorfología ha controlado el desarrollo y evolución de los suelos, observándose una correspondencia entre las unidades geomorfológicas y los suelos dominantes (Carrica, 1998).

Carrica (1998), sostiene que el 90 % de los suelos pertenece al orden de los Molisoles, del suborden Udoles y Ustoles, que se desarrollan en el dominio geomorfológico del Positivo de Ventania, mientras que el resto corresponde al orden de los Aridisoles, del suborden Ortides ubicados en el dominio geomorfológico Litoral. De acuerdo con cada sector de la cuenca se reconocen diferentes tipos de suelos: en la cuenca superior se desarrolla el gran grupo del Hapludol lítico franco fino en asociación con roca, de poca profundidad como factor limitante. En las áreas de piedemonte y entre lomas los suelos dominantes son Argiudoles típicos someros, en asociación con Hapludol petrocálcico. Por su parte, en las vías de escurrimiento que nacen en los faldeos se desarrollan Haplustoles líticos, típicos, petrocálcico y énticos en asociación con Argiutol típico (INTA, 1990, Gaspari *et al.*, 2003).

Teniendo en cuenta el objetivo que guía el estudio, las categorías consideradas para el análisis de la variable suelo fueron los factores limitantes establecidos por el INTA (1990), entre los que se encuentran: la erosión hídrica, la susceptibilidad a la erosión hídrica, la sodicidad (relativa al frente costero litoral), el predominio del área urbana, la pedregosidad-profundidad y la presencia de rocosidad.

La Erosión Hídrica es uno de los factores limitantes que mayor importancia adquiere en relación con la ocurrencia de eventos de exceso hídrico por lo que se asigna un peso de 100. Según Laya *et al.* (1975) los procesos de erosión conducen a la pérdida de suelo y a la generación de: formas residuales del nivel de piedemonte (planos y lomadas), de acumulación (terrazas, cordones litorales, abanicos de derrame, depósitos coluviales), de erosión (laderas de valles y depresiones) y antiguos cauces rellenos de cañadones y depresiones. Se asigna el peso máximo a dicha variable (100), debido a que, ante eventos de exceso hídrico, los suelos con erosión hídrica actual -que en el área de estudio se ubican especialmente en la cuenca media e inferior en el valle del arroyo- serán los que se encuentren más expuestos a la ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes. Los mismos corresponden al orden de los Molisoles, suborden Ustol, grupo Haplustol, de textura franco-arcillosa y con la profundidad como uno de sus factores limitantes.

Con respecto a la Susceptibilidad a la Erosión Hídrica, se advierte que tal limitación coincide con el área de piedemonte y con zonas de ruptura de pendiente, en las que se reactivan los procesos de arrastre de sedimentos por la creciente velocidad desde las nacientes del arroyo que aumentan su poder erosivo. Por ello, se asigna un peso de 75 y se considera un factor de importancia fuerte en la probabilidad de generación de eventos de exceso hídrico. Estos suelos corresponden al orden

de los Molisoles, suborden Udol, grupo Arguidol de textura franco-limosa y cuya limitante es la profundidad.

La Sodicidad, es una característica de los suelos que coinciden con la llanura de ingresión marina y corresponden al orden de los Aridisoles, suborden Ortides, grupo Salortides muy pobremente drenados, de textura franca a franco-arenosa. Sus principales limitaciones derivan de un drenaje imperfecto y por este motivo se asigna un peso de 75 ya que, ante fenómenos de exceso hídrico vinculados con las sudestadas y la dinámica de la planicie de marea, representan sectores con una importante probabilidad de anegarse. Una elevada sodicidad produce una impermeabilización del suelo lo que ocasiona problemas de encharcamiento del suelo y falta de aireación del sistema radicular (Carrica, 1998).

Por su parte, el Área Urbana totalmente modificada por el proceso de urbanización e impermeabilización del valle de inundación del arroyo se encuentra expuesta a la ocurrencia de fenómenos de exceso hídrico que no necesariamente se vinculan directamente con las características del suelo. A nivel de cuenca general, se asigna un peso de 25 debido a que los suelos de este sector no representan un peso significativo respecto de la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo en comparación con las otras variables.

La Profundidad y Pedregosidad de los suelos, son otras categorías que se consideraron en el análisis teniendo en cuenta su asociación con suelos bien drenados ubicados en sectores de pendiente. Corresponden al orden de los Molisoles, suborden Udol, grupo Arguidol de textura franco-limosa con la permeabilidad, profundidad y pedregosidad como factores limitantes. Por ello, se asigna un peso de 15, debido a que no constituyen factores con una importancia relevante en la probabilidad de escenarios de peligrosidad vinculados con inundaciones, anegamientos y desbordes del arroyo.

Por último, se consideró la Rocicidad como una limitante a considerar, ya que en el sector de la cuenca superior la resistencia a la erosión, las fuertes pendientes y la impermeabilidad del sustrato dificultan la acumulación de agua. De este modo, se asigna un peso de 5 porque no constituye un factor de importancia fuerte en la probabilidad de ocurrencia de eventos de exceso hídrico.

6. Análisis de las condiciones de peligrosidad ante fenómenos de exceso hídrico en la cuenca del arroyo Napostá Grande

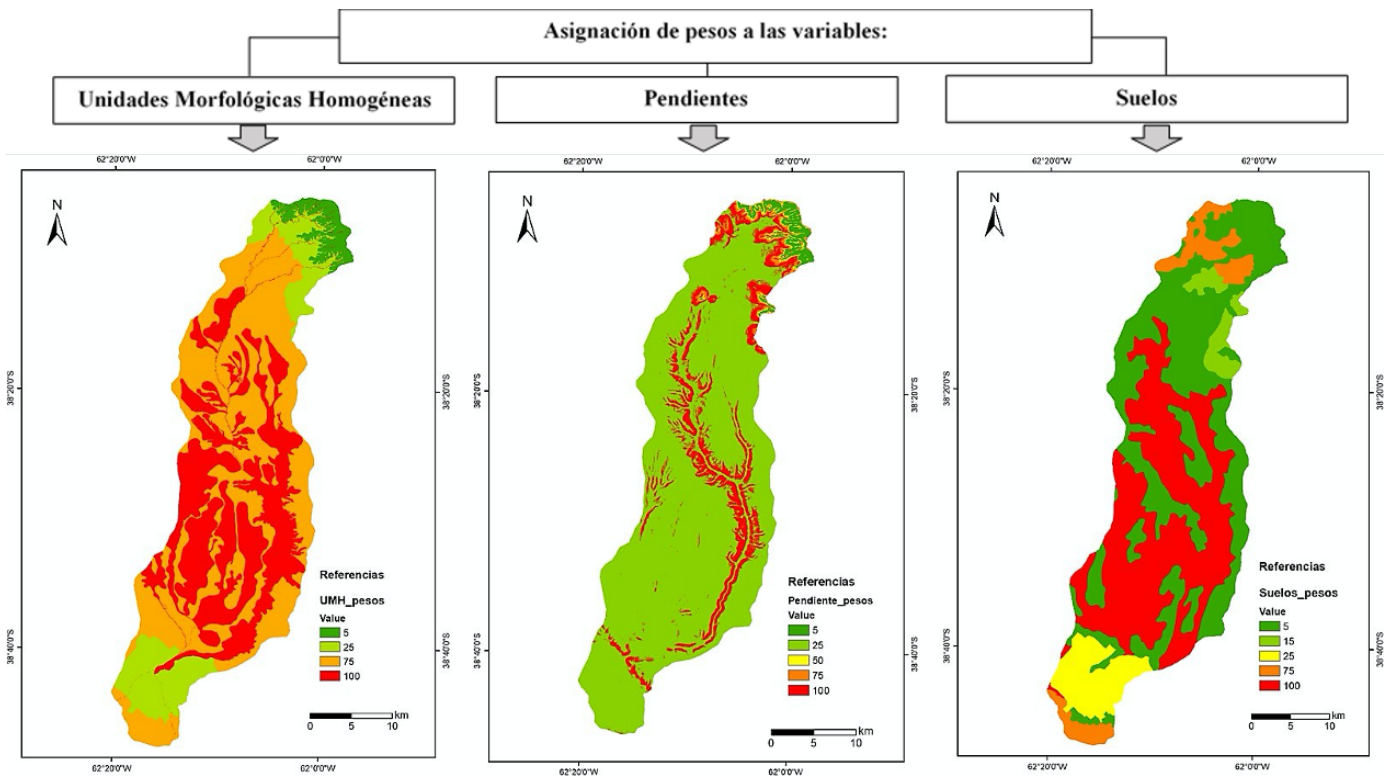
Una vez asignados los pesos correspondientes (figura 3) se procede a aplicar la técnica de ponderación basada en la comparación por pares denominado Analytic Hierarchy Process (AHP). En tal sentido, en el software QGis v. 2.8.® se utilizó el complemento AHP, con el propósito de construir una matriz de comparación por pares entre las tres variables seleccionadas: pendientes, suelos y UMH (tabla 2).

Tabla 2. Matriz de comparación por pares

	Pendientes	Suelos	UMH
Pendientes	1	5.0	3.0
Suelos	0.2	1	1.0
UMH	0.333	1.0	1

Fuente: elaboración propia sobre la base de complemento AHP en QGis v. 2.8.®.

Figura 3. Asignación de pesos a las variables incluidas en el análisis



Fuente: Elaboración propia mediante el software ArGis v. 10.1. ®.

Según los pesos asignados a cada una de las variables en la matriz, el resultado final de la Relación de Consistencia (CR) fue de 0,024 (menor a 0,10) valor que indica que la relación entre los pesos asignados a las diferentes alternativas de los criterios, es aceptable. De esta manera, se genera una matriz de comparación entre pares de variables donde se compara la importancia de cada una de ellas en relación con las demás para, posteriormente, obtener el “eigenvector principal” (W_j)⁶ del cual derivan los diferentes pesos⁷ (Saaty, 1980). El procedimiento consta de los siguientes pasos: en primer lugar, se determina la importancia relativa de las categorías de una variable en cada fila en relación con las categorías de otra variable en cada columna. Se completa la matriz introduciendo en el triángulo superior derecho el valor inverso al de las celdas correspondientes al triángulo inferior izquierdo. En segundo lugar, se suman los valores de las columnas y se genera una nueva matriz normalizada a través de la división del valor de cada celda por el valor total de las columnas sumado anteriormente. En tercer lugar, se calcula el “eigenvector principal” para cada variable realizando la sumatoria de los valores de las filas de la matriz normalizada. Este valor representa la importancia relativa de una variable respecto de las otras que han sido comparadas. En cuarto lugar, se calcula el “eigenvector normalizado” dividiendo el eigenvector de cada fila por el número de clases (3) para obtener un parámetro necesario (λ_{max}) en el cálculo del valor de consistencia de los pesos. En quinto lugar, se realiza una suma lineal ponderada de los pesos de

6. La denominación W_j (Wiegth = peso) hace alusión al peso otorgado a cada categoría de las variables. El valor del peso para la pendiente calculado por el software fue de 0.655; el del suelo fue de 0.158 y el de las UMH fue de 0.187.

7. Al comparar la categoría i con la categoría j , si el resultado es 1 indica que ambas son igualmente importantes en la generación de eventos de exceso hídrico. Si el valor es 3, la categoría i es ligeramente más importante que la j . Si, en cambio es 5, será notablemente más importante; si es 7, será demostrablemente más importante y si, finalmente es 9, será absolutamente más importante. Por el contrario, si la categoría i , al compararla con la categoría j , adopta valores de $1/3$; $1/5$; $1/7$ o $1/9$ será ligeramente menos importante; notablemente menos importante; demostrablemente menos importante o absolutamente menos importante, respectivamente.

cada variable según su peso normalizado (W_j). Los valores de la suma de cada variable se dividen por su peso normalizado y, finalmente, el promedio de los valores obtenidos corresponde al λ_{\max} de la variable analizada. Para calcular el Índice de Consistencia (IC) de los pesos de las alternativas se utilizó la siguiente fórmula:

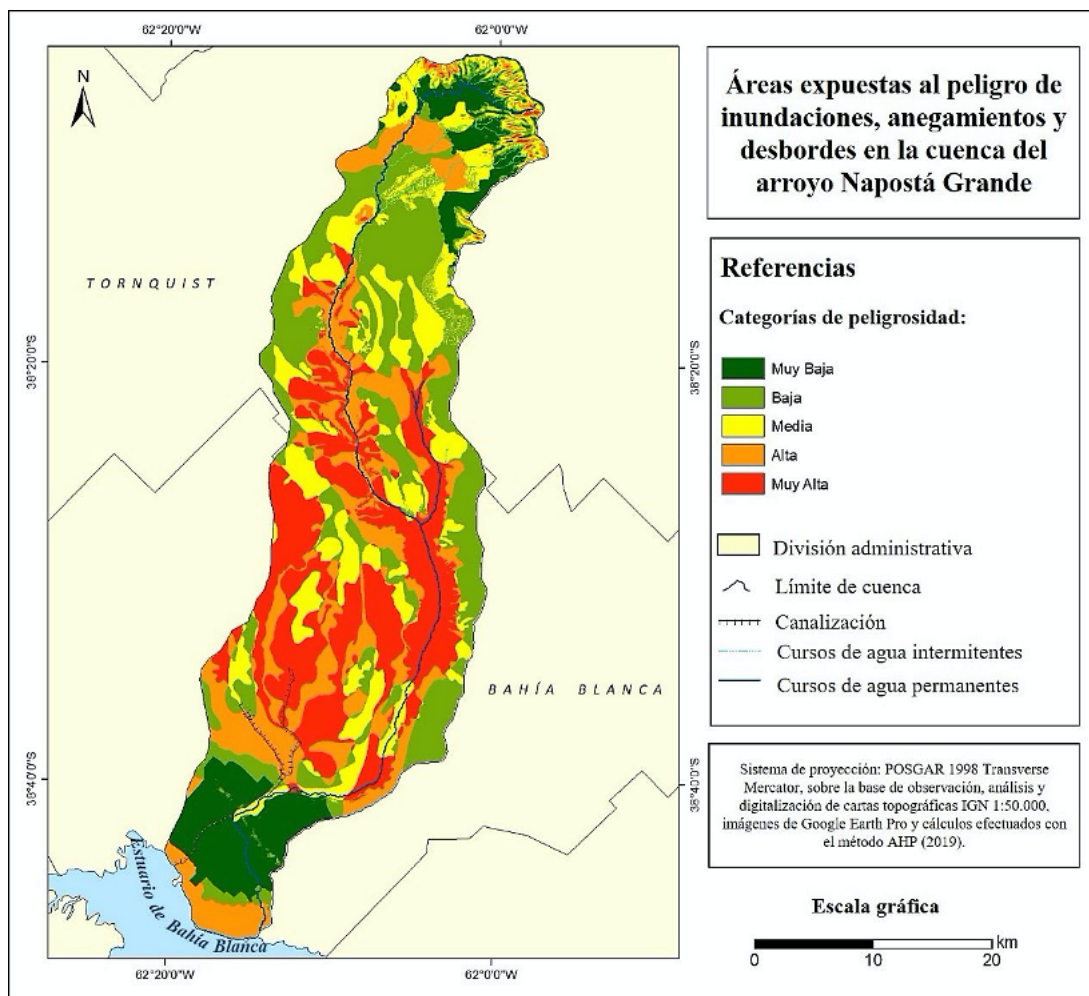
$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

Donde n corresponde al número de clases o alternativas de un criterio determinado

Luego, se determina la Relación de Consistencia (RC) dividiendo el valor de IC por un valor constante, según el número de clases, denominado Índice Aleatorio Medio (IAM) (Saaty, 1980).

Luego de realizado el procedimiento correspondiente de la asignación de pesos mediante el procedimiento AHP, se realizó una multiplicación de las capas obtenidas por su peso correspondiente calculado en el software y se las sumó, a través de un álgebra de mapas para obtener el mapa final de peligrosidad. De allí que se establecieron cinco categorías para representar los niveles de peligrosidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta (figura 4).

Figura 4. Mapa síntesis de peligrosidad a eventos de exceso hídrico



Fuente: Elaboración propia mediante el software ArcGIS v. 10.1. © y QGIS v. 2.18.®.

Es importante mencionar que los valores que se encuentran en la categoría de Peligrosidad Muy Baja se ubican en el rango de valores que van desde 1,99 a 11,64. Los valores correspondientes a la categoría de Peligrosidad Baja se encuentran en el rango de 11,65 a 17,5. En la categoría de Peligrosidad Media, los valores se encuentran en el rango que abarca desde 17,6 a 24,6. Por su parte, en la categoría de Peligrosidad Alta, el rango es desde 24,7 a 32,44. Finalmente la Peligrosidad Muy Alta corresponde al rango de valores mayores a 32,45.

Puede advertirse, que las áreas que presentan la categoría de **Peligrosidad Muy Alta** se localizan mayormente en sectores lindantes al cauce fluvial en la cuenca media e inferior. Se observan superficies que presentan una elevada susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, con una función conductora de los excesos del área generadora de la cuenca superior, donde la disminución de la pendiente y las características del suelo facilitan la acumulación de agua.

Las superficies coinciden con las zonas lindantes al cauce fluvial de peligrosidad muy alta, cuestión que responde a la proximidad de las áreas cercanas al arroyo mayormente expuestas. Asimismo, es importante destacar la unidad de la planicie costera ubicada desde la curva de nivel de 5 m.s.n.m. hasta la línea de ribera actual. En dicho sector, la escasa pendiente y los procesos generados por la acción marina generan acumulaciones de tipo coluvial y aluvial asociadas al Dominio Litoral. También, se destaca el área de piedemonte localizada desde los 400 m.s.n.m. hasta los 320 m.s.n.m. donde ocurren procesos coluviales por un mayor espesor de los materiales eólicos superficiales y arrastre de sedimentos.

Con respecto a los sectores que tienen una **Peligrosidad Alta** se observa que el área de la cuenca media e inferior es la que representa en mayor proporción dicha categoría, como consecuencia de los anegamientos que se producen por la baja permeabilidad de los sedimentos loésicos y las suaves pendientes.

En relación con las zonas que presentan una Peligrosidad Media se destaca el sector de la cuenca superior, en las incisiones del arroyo cercanas a su nacimiento y en las zonas con cambios bruscos de pendiente. Asimismo, en esta categoría pueden delimitarse los sectores ubicados en la cuenca media e inferior lindantes a las zonas con alta peligrosidad

Finalmente, teniendo en cuenta los sectores que presentan una **Peligrosidad Baja y Muy Baja** se reconocen en general, áreas alejadas del cauce del arroyo y determinados sectores de la cuenca superior e inferior. En la cuenca superior la presencia de importantes pendientes y la resistencia a la erosión por la impermeabilidad del sustrato impiden la acumulación de agua por lo que no se producen eventos potencialmente peligrosos. Por su parte, en la cuenca inferior se advierte que, a escala de cuenca general, presenta un nivel de peligrosidad muy bajo -a excepción de las zonas próximas al límite del cauce hacia el norte de la ciudad de Bahía Blanca que tiene una peligrosidad media- debido a que las variables que se incluyeron en el análisis de jerarquías ponderadas se vinculan directamente con las condiciones del medio natural y no socio-cultural.

7. Discusión

En el análisis de los resultados hemos podido identificar y espacializar los sectores que, en la cuenca del arroyo Napostá Grande, se encuentran mayormente expuestos a la ocurrencia de eventos de exceso hídrico. En primer lugar, se advierte que las características de las UMH, las pendientes y los suelos y la probabilidad de ocurrencia de inundaciones, anegamientos y desbordes del arro-

yo, se encuentran directamente relacionadas. Esta aproximación, arroja resultados conocidos en lo que respecta a los sectores que se encuentran próximos al curso fluvial debido a que, dada la proximidad, son los que estarían más expuestos a la ocurrencia de posibles eventos de desbordes del arroyo Napostá Grande. Sin embargo, la información obtenida a través de la ponderación realizada -basada en conocimiento previo, trabajo de campo y asesoramiento con especialistas- y de la aplicación del método AHP, expone diferentes categorías de peligrosidad que deben considerarse, especialmente para la gestión de pequeñas explotaciones agropecuarias del espacio rural (menores a 350 hectáreas) que presentan mayores dificultades para sobreponerse a fenómenos de exceso hídrico.

En segundo lugar, al comparar y combinar diferentes variables se vislumbra la complejidad de los problemas ambientales que pueden manifestarse en el área de estudio. Si bien ante eventos de exceso hídrico y determinadas características de las UMH, pendientes y suelos, es posible presuponer posibles escenarios ambientales derivados de la complejidad que involucra la relación sociedad-naturaleza, en ocasiones, las intervenciones que realizan los productores del espacio rural y habitantes del espacio urbano modifica y altera la dinámica natural. Tales cuestiones exceden el análisis cuantitativo efectuado y debieran abordarse a través de otras metodologías de tipo cualitativas. En este sentido la realización de entrevistas semi-estructuradas y en profundidad a vecinos del espacio urbano y rural y a las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos proporcionaría una información valiosa para conocer las transformaciones ambientales que se generan a partir de la percepción y representaciones sociales del riesgo hídrico que elaboran.

En tercer lugar, al seleccionar y jerarquizar, las alternativas para determinar la generación de escenarios de peligrosidad en la cuenca se llegó a una primera aproximación, para evaluar los sectores mayormente expuestos. Sin embargo, tal metodología no possibilitaba reducir los sesgos personales y profesionales que pudieran intervenir en los pesos asignados a cada variable. Por ello, fue necesario aplicar el método AHP propuesto por Saaty (1980), en el que se asignaron los pesos correspondientes según el método de comparación por pares el cual ofrece un soporte de validación o comprobación estadístico de tales pesos o valores. En tal punto se halla el principal aporte del presente estudio en términos de resultados ya que, la combinación de técnicas cartográficas y estadísticas permitió identificar y espacializar, a escala de cuenca, los sectores expuestos a la ocurrencia de fenómenos de exceso hídrico.

Se reconoce que la probabilidad de ocurrencia de fenómenos potencialmente peligrosos, vinculados con la alternancia de fenómenos de exceso y déficit hídrico, responde a la variabilidad climática propia del sudoeste bonaerense. Los efectos de dicha variación se manifiestan en la cuenca del arroyo Napostá Grande de una particular manera, según la interrelación de variables correspondientes al medio natural y socio-cultural. El presente estudio representa un aporte en lo que respecta al conocimiento del primer grupo de variables. Entre las segundas, se encuentran: el tipo de asentamiento -espacio rural o urbano-, los usos del suelo, las actividades realizadas por los productores y vecinos, los modos de vida, las prácticas espaciales materiales que se llevan a cabo según modos de interacción social y las condiciones socio-demográficas de la población que allí reside. De allí que, dentro del mismo grupo de trabajo, se considera prioritario seguir profundizando en técnicas que posibiliten abordar de un modo integral los procesos ambientales que ocurren en el área de estudio. El vínculo entre las variables propias del medio natural con otras de tipo socio-cultural interviene en la dinámica ambiental de la cuenca y en la probabilidad de ocurrencia de potenciales problemas ambientales. Dicho conocimiento proporciona las herramien-

tas para elaborar un diagnóstico ambiental, diseñar propuestas de intervención e implementar medidas tendientes a la gestión territorial.

8. Conclusiones

Las técnicas de EMC y álgebra de mapas se han convertido en herramientas valiosas para el análisis espacial de fenómenos socialmente relevantes. La información que puede obtenerse constituye un insumo que facilita la toma de decisiones, a través de la identificación, espacialización y evaluación de diferentes escenarios de criticidad ambiental ante la probabilidad de ocurrencia de eventos de exceso hídrico. Así, la probabilidad de ocurrencia de escenarios de riesgo hídrico y de problemas ambientales entre los que se encuentran las inundaciones, anegamientos, desbordes de cursos de agua, sequías y procesos de erosión se convierte en un conocimiento que adquiere relevancia para el diseño de planes de ordenamiento del territorio.

La selección de variables del medio natural que intervienen en la generación y/o amplificación de las condiciones de peligrosidad y su evaluación, a través de la aplicación de técnicas cartográficas y estadísticas, permitió identificar sectores con diferentes niveles de criticidad ambiental, ante la ocurrencia de fenómenos de exceso hídrico.

Se evidencia que las áreas que presentan niveles de **Peligrosidad Alta** y **Muy Alta** se localizan mayormente en sectores lindantes al cauce fluvial, en la cuenca media e inferior, como consecuencia de los anegamientos que se producen por la baja permeabilidad de los sedimentos loésicos y las suaves pendientes.

Las zonas que presentan una **Peligrosidad Media** se ubican en el sector de la cuenca superior, en las incisiones del arroyo cercanas a su nacimiento y en las zonas con cambios bruscos de pendiente.

Los sectores que presentan una **Peligrosidad Baja** y **Muy Baja** se ubican en áreas alejadas del cauce del arroyo y en la cuenca inferior debido a que las variables que se incluyeron en el análisis de jerarquías ponderadas se vinculan directamente con las condiciones del medio natural y no socio-cultural.

9. Bibliografía

- Barredo, J. y Bosque Sendra J. "Integración de evaluación multicriterio y sistemas de información geográfica para la evaluación de la capacidad de acogida del territorio y la asignación de usos del suelo". En: *IV Congreso Español de Sistemas de Información Geográfica* (pp. 191-200). Actas del IV Congreso Español de Sistemas de Información Geográfica. Barcelona, 1995.
- Beck, U. (1993). De la sociedad industrial a la sociedad del riesgo. Cuestiones de supervivencia, estructural social e ilustración ecológica. *Revista de Occidente*, (150), 19-40. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=222621>
- Bosque Sendra, J. y Gómez Delgado, M. "Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial para la Ordenación del territorio". En: *I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica* (pp. 1-33). Actas del I Congreso Internacional de Ordenamiento Territorial y Tecnologías de la Información Geográfica. Alcalá, 2010.
- Buzai, G. D. y Galbán, E. M. (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. Recuperado de: <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/8463/11981>

- Camino Dorta, J., Gimeno Ortiz, M. y Ramón Ojeda, A. (2014). Las unidades ambientales homogéneas como herramientas para la ordenación territorial y la caracterización de litorales áridos. *Vegueta. Anuario de la Facultad de Geografía e Historia* (14), 199-228. Recuperado de: <http://revistavegueta.ulpgc.es/ojs/index.php/revistavegueta/article/viewFile/279/529>
- Campo de Ferreras, A. M., Cappeli, A. y Diez, P. (2004). *El clima del suroeste bonaerense*. Bahía Blanca, Argentina: EdiUns.
- Carballo, C. T., y Goldberg, S. (2014). *Comunidad e información ambiental del riesgo: las inundaciones y el río Luján*. Luján, Buenos Aires: Editorial Dunken.
- Cardona, O. D. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. En: Maskrey, A. (Comp.). *Los desastres no son naturales* (pp. 51- 74). Bogotá, Colombia: La Red.
- Carrica, J. (1998). *Hidrología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires (Hydrogeology of arroyo Napostá Grande basin)* (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Casado, A. y Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26. Recuperado de: <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/6751/7698>
- Chakhar, S. y Martel, J. M. (2003). Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 7(2), 47-71. Recuperado de: https://researchportal.port.ac.uk/portal/files/694870/GIDA_2003_Chakhar_and_Martel.pdf
- Chávez-Cortés, M. M., Binnqüist-Cervantes, G. y Salas-Flores, A. C. (2017). Evaluación multicriterio de la vulnerabilidad biofísica ante inundaciones en la subcuenca río Atoyac-Oaxaca de Juárez. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(10), 97-109. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3586/358649676011.pdf>
- Chen, H., Ito, Y., Sawamukai, M. y Tokunaga, T. (2015). Flood hazard assessment in the Kujukuri Plain of Chiba Prefecture, Japan, based on GIS and multicriteria decision analysis. *Natural Hazards*, 78(1), 105-120. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-015-1699-5>
- Da Silva, C. J. y Cardozo, O. D. (2015). Evaluación multicriterio y Sistemas de Información Geográfica aplicados a la definición de espacios potenciales para uso del suelo residencial en Resistencia (Argentina). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (16), 23-40. Recuperado de: <http://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/445>
- Fenta, A. A., Kifle, A., Gebreyohannes, T., y Hailu, G. (2015). Spatial analysis of groundwater potential using remote sensing and GIS-based multi-criteria evaluation in Raya Valley, northern Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 23(1), 195-206. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-014-1198-x>
- Gil, V. (2010). *Hidromorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al principio de crecidas* (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Gaspari, F. J., Vagaría, A. R., Delgado, M. I., Senisterra, G. E., y Denegri, G. A. (2011). Vulnerabilidad ambiental en cuencas hidrográficas serranas mediante SIG. *Multequina*, (20), 3-13. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/428/42824203001.pdf>
- Giddens, A., Bauman, Z. Luhmann, H. y Beck, U. (1996). *Las consecuencias perversas de la modernidad: modernidad, contingencia y riesgo*. Barcelona, España: Anthropos Editorial.
- González Bernáldez, F. (1973). Estudio temático ecológico de la Subregión de Madrid. Madrid: COPLACO, M. de la Vivienda.
- Gonzalez Uriarte, M. (Noviembre de 1984). "Características geomorfológicas de la porción continental que rodea la Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires". En: *IX Congreso Geológico Argentino*. Actas del IX Congreso Geológico Argentino, ciudad de San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Hernández-Zaragoza, P., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., y Martínez-Trinidad, T. (2019). Evaluación multicriterio y multiobjetivo para optimizar la selección de áreas para establecer plantaciones forestales. *Madera y Bosques*, 25(2). Recuperado de: <http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/1819>
- Herzer, H. M. (2011). Construcción del riesgo, desastre y gestión ambiental urbana: Perspectivas en debate. *Revista virtual REDESMA*, 5(51) 51- 66. Recuperado de: <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rvr/v5n2/a08.pdf>
- Henríquez Ruiz, C., y Qüense Abarzúa, J. (2010). Evaluación multicriterio/multiobjetivo aplicada a los usos y coberturas de suelo en la cuenca de Chillán. *Tiempo y Espacio*, 21(25), 21-39. Recuperado de: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/TYE/article/view/1767>

- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC, 2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Vivienda*, 2010. Buenos Aires, Argentina. [Consulta: 11 de mayo de 2020]. Recuperado de: <http://www.indec.mecon.ar/>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1990). Atlas de Suelos de la República Argentina, Instituto de Suelos, INTA Castelar, Buenos Aires, Argentina [Consulta: 8 de mayo de 2020]. Recuperado de: <http://www.geointa.gov.ar>
- Jankowski, P., y Richard, L. (1994). Integration of GIS-based suitability analysis and multicriteria evaluation in a spatial decision support system for route selection. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 21(3), 323-340. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b210323>
- Lamelas, M. T. (2009). Esquema metodológico para la toma de decisiones sobre el uso sostenible del suelo: Aplicación a la localización de suelo industrial. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (9). Recuperado de: <http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/160>
- Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En M.A. Fernández (Comp.). *Ciudades en riesgo* (pp.12-42). Bogotá, Colombia: Usaid.
- Laya, H. A. y Sánchez, L. F. "Cartografía semidetallada de los suelos de la región de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires". En: 7ª Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo. Instituto de Edafología e Hidrología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, diciembre de 1975.
- Mastrandrea, A. y Pérez, M. I. (2018). Relatos de vida en el análisis del riesgo hídrico en los barrios Napostá y Villa Mitre, ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista Cardinalis*, 6(10), 185-223. Recuperado de: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/cardinalis/article/view/20665>
- Mastrandrea, A. (2019). Percepción social del riesgo hídrico: análisis de los significados atribuidos a los eventos de anegamientos en el barrio Villa Talleres, ciudad de Bahía Blanca (provincia de Buenos Aires, Argentina). *Estudios Socioterritoriales Revista de Geografía* (26), 1-19. Recuperado de: <http://www.fch.unicen.edu.ar/ojs-3.1.0/index.php/estudios-socioterritoriales/article/view/466>
- Mastrandrea, A. y Angeles, G. (2020). Aplicación de un Índice de vulnerabilidad socioambiental. El caso de la ciudad de Bahía Blanca, Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GeoSIG)*, 12(16) Sección II:X-X. Recuperado de: www.revistageosig.wixsite.com/geosig
- Maskrey, A. (1993). *Los desastres no son naturales*. Bogotá, Colombia: La Red.
- Natenzon, C. y Ríos, D. (2015). *Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aporte desde la Geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos*. Buenos Aires, Argentina: Ediciones Imago Mundi.
- Olivera Acosta, J., Morales, G. M., García Rivero, A. E., Salgado, E. J., López, M. L., Estrada, R., y Miravet, B. L. (2011). El uso de los SIG y la evaluación multicriterio (EMC) para la determinación de escenarios de peligros de inundaciones en cuencas fluviales: caso de estudio: cuenca Guanabo, ciudad de La Habana. Recuperado de: <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3101098>
- Pacheco, J. F. y Contreras, E. (2008). Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES), Cepal Series Manuales 58. Santiago de Chile, julio de 2008. Recuperado de: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35914>
- Piccone, N. (2016). Detección de áreas urbanas con peligro de inundación. En S. Linares (Comp.), *Soluciones espaciales a problemas sociales urbanos: aplicaciones de tecnologías de la información geográfica a la planificación y gestión municipal* (pp. 161-169). Tandil: Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires.
- Rees, J. (2006). *Riesgos y gestión integrada de recursos hídricos*. Estocolmo, Suecia: Global Water Partnership.
- Rivera, N. A., Mendoza, G. G., Martínez, J. F. y Servin, C. C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 144-154. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945029006.pdf>
- Romero, C. (1993). *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones*. Madrid, España: Alianza.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. London, Reino Unido: Mc Graw Hill.
- Senisterra, G. E., Gaspari, F. J. y Delgado, M. I. (2015). Zonificación de la vulnerabilidad ambiental en una cuenca serrana rural. Argentina. *Revista Estudios Ambientales-Environmental Studies Journal*, 3(1), 38-58. Recuperado de: <http://131.221.1.66/index.php/estudios-ambientales/article/view/38>
- Timbe, L. y Timbe, E. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del río Burgay. *Maskana*, 3(1), 87-96. Recuperado de: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/396>

- Van Zuidam, R. A. (1979). *Terrain analysis and classification using aerial photographs: a geomorphological approach*. Netherlands: Enschede.
- Vera Rodríguez, J. M. y Albarracín Calderón, A. P. (). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109-136. Recuperado de: <https://search.proquest.com/openview/6aa3ce80fda7b5ec0649383bab2e9c87/1?pq-origsite=gscholar&cbl=136121>
- Volonté, A. (2017). *Geomorfología fluvial aplicada al peligro de crecidas: cuenca del arroyo San Bernardo, sistema de Ventania, Argentina* (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Voogd, H. (1982). Multicriteria evaluation with mixed qualitative and quantitative data. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 9(2), 221-236. Recuperado de: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b090221>
- Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. En: A. Maskrey (Comp.). *Los desastres no son naturales* (pp. 9-50). Bogotá, Colombia: Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.

Sobre los autores

ALDANA MASTRANDREA

Profesora en Geografía por la Universidad Nacional del Sur (2013). Ha desempeñado tareas docentes en el nivel medio (2013-2018). Ayudante de docencia A en las cátedras Geografía Histórica y Técnicas en Geografía, en el Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur. Inscripta en la carrera de Doctorado en Geografía (desde 2015). Continúa su instancia final de estudios de posgrado como becaria CIC-UNS. Participa en calidad de docente-investigadora en dos proyectos de investigación en la misma unidad académica y ha realizado actividades de extensión y como profesional. Ámbito de investigación: Geografía de la Percepción, Geografía del Riesgo, Problemáticas ambientales.

GUILLERMO RAÚL ANGELES

Dr. en Geografía por la Universidad Nacional del Sur. Especialista en Geoprocesamiento por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Profesor Titular del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur en las asignaturas: Cartografía General y Temática; Sistemas de Información Geográfica I y Sistemas de Información Geográfica II. Estancia de investigación Post-doctoral (Programa MUTIS de la AECI) en el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, en temas ambientales (geomorfología de riesgo, reconstrucción paleoambiental y geoarqueología). Ámbito de investigación: Cartografía temática, Análisis espacial con SIG, Ordenación territorial, Problemáticas ambientales.