

# Vulnerabilidad ambiental en áreas rurales asociadas al sistema fluvial Ctlamochita, Córdoba, Argentina

Environmental vulnerability in rural areas associated with the Ctlamochita river system, Córdoba, Argentina

ELIANA CONCI<sup>1,2</sup>  0009-0009-7634-6503

MARÍA JIMENA RODRIGUEZ<sup>3</sup>  0009-0006-5415-7312

ANALÍA ROSA BECKER<sup>4,5</sup>  0000-0002-6019-3807

MARÍA MICAELA LEDESMA<sup>5,6</sup>  0000-0003-2800-8779

ALDO FERNANDO RANGONE<sup>4</sup>  0009-0008-5676-4014

JULIETA FABIOLA SALGUERO<sup>4</sup>  0009-0004-0736-8059

<sup>1</sup> Grupo CLIOPE (Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Mendoza) (UTN-FRM). Argentina.

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)-CCT Mendoza. Argentina.

<sup>3</sup> Centro de Investigaciones y Transferencia Villa María, CONICET-UNVM, Córdoba. Argentina.

<sup>4</sup> Universidad Nacional de Villa María (UNVM). Córdoba. Argentina.

<sup>5</sup> Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Córdoba. Argentina.

<sup>6</sup> Instituto de Ciencias Veterinarias (INCIVET), UNRC-CONICET, Córdoba. Argentina.

## Resumen

En áreas rurales ribereñas de Córdoba (Argentina) se reportaron procesos de degradación de ecosistemas y avance de la frontera agrícola, potenciando la ocurrencia de inundaciones en centros urbanos. La evaluación de la vulnerabilidad contribuye al conocimiento del riesgo y está condicionada por características del terreno y localización geográfica. El objetivo es determinar la vulnerabilidad ambiental en áreas rurales del ambiente fluvial Ctlamochita mediante factores formadores del suelo (geomorfología, material originario, clima, biota y tiempo pedogenético) y el factor antrópico (indicadores e índices de calidad del suelo). Se utilizaron valores normalizados para cada sitio muestreado por Subunidad Ambiental y se obtuvo un mapa de vulnerabilidad ambiental. Los resultados explican que en la Faja Fluvial el relieve, pendientes del 1-3 %, vegetación nativa y tiempo pedogenético condicionan la susceptibilidad. En cambio en la Paleollanura de Inundación depende de la vegetación nativa, pendientes del 0-5 % y moderada calidad de suelos. Las amenazas ambientales provienen del uso y manejo del suelo (agricultura y ganadería) y de procesos geológicos como inundaciones, anegamientos y erosión de márgenes del río Ctlamochita. El conocimiento de la vulnerabilidad ambiental contribuye al ordenamiento territorial y evaluación de riesgos ambientales regionales.

Palabras clave: Unidades Geomorfológicas; factores formadores; calidad de suelos; ordenamiento territorial; riesgos ambientales.

### Fechas • Dates

Recibido: 2023.12.11  
Aceptado: 2024.10.01  
Publicado: 2024.11.25

### Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Eliana Conci  
[econci@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:econci@mendoza-conicet.gob.ar)

## Abstract

In rural riverside areas of Cordoba (Argentina), processes of ecosystem degradation and advance of the agricultural frontier have been reported, increasing the occurrence of floods in urban centers. The vulnerability assessment contributes to risk knowledge and is conditioned by terrain characteristics and geographical location. The objective is to determine the environmental vulnerability in rural areas of the Ctalamochita river through the soil-forming factors (geomorphology, original material, climate, biota and pedogenetic time) and the anthropic factor (soil quality indicators and indices). On the one hand, normalized values were used for each site sampled by Environmental Subunit and an environmental vulnerability map was obtained. The results explain that in the Fluvial Belt the relief, slopes of 1-3 %, native vegetation and pedogenetic time condition the susceptibility. On the other hand, in the Flood Paleo-plain it depends on the native vegetation, slopes of 0-5 % and moderate soil quality. Environmental threats come from land use and management (agriculture and livestock) and geological processes such as floods, flooding and erosion along the banks of the Ctalamochita river. Knowledge of environmental vulnerability contributes to land use planning and the assessment of regional environmental risks.

Keywords: Geomorphological Units; soil-forming factors; soil quality; land use planning; environmental risks.

## 1. Introducción

El suelo forma parte del medio físico, evolución de los paisajes y ecosistemas (Pereyra y Torres-Duggan, 2016). Las políticas de desarrollo y expansión agrícola han conducido en América Latina a la degradación del suelo, con descensos en la productividad e incrementos en los costos de producción, dando consecuencias económicas y sociales (Pla, 2012). La conversión en agroecosistemas en América Latina y el Caribe es del orden del 30 % (600 Mha). Una parte de estas áreas está afectada por procesos de degradación, donde los factores impulsores son el cambio climático y la presión humana, relacionados a características naturales fisiográficas y tipo de cubierta vegetal (Pennock y McKenzie, 2015). En Argentina las actividades agropecuarias ocupan grandes superficies y reemplazan o modifican el hábitat natural y servicios ecosistémicos (Bran *et al.*, 2017). Más del 40% del territorio está afectado por procesos de degradación y no se diferencian los causados por factores naturales de los derivados de la actividad antrópica (Lavado, 2016). La expansión e intensificación de la agricultura ha sido probablemente el hecho más notable. Esto se ha asociado a: (i) la conversión de nuevas áreas sin historia agrícola; (ii) la reconversión de tierras anteriormente dedicadas a la ganadería; (iii) el aumento de la superficie sembrada con soja; (iv) la expansión del doble cultivo; y (v) el aumento de la superficie cultivada sin labranza (Magrin *et al.*, 2005; Paruelo *et al.*, 2005; Boletta *et al.*, 2006). La provincia de Córdoba, región central del país agrícola-ganadera, está afectada por erosión, inundaciones, sedimentación, constituyendo amenazas para el ambiente. De las 16,5 Mha de la provincia, 13,7 están dedicadas a alguna actividad agropecuaria desarrollada en condiciones edafoclimáticas variables, de las cuales más de 8 Mha presentan un alto grado de "agriculturización" (Gorgas *et al.*, 2014). En la región existe un manejo inadecuado del territorio y muchos sectores en deterioro (Carignano *et al.*, 2014), siendo escasos los estudios morfoedológicos con base ambiental (Rodríguez *et al.*, 2017a).

Los riesgos ambientales deben evaluarse en función del fenómeno natural causante del daño, la fragilidad del medio y cantidad de bienes expuestos (Lario-Gómez *et al.*, 2017). La Organización de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (UNDRO, 1979) indica que la eva-

luación de la vulnerabilidad contribuye al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso, donde la vulnerabilidad está condicionada por la geología y la climatología (Ayala-Carcedo, 2002).

En el departamento (dpto.) General (Gral.) San Martín (Córdoba, Argentina), Planicie fluvioeólica central y áreas rurales ribereñas del río Ctlamochita, se reportaron problemáticas ambientales asociadas al avance de la frontera agrícola. Esto, sumado a los procesos de degradación de ecosistemas frágiles, ha potenciado la ocurrencia de mayores inundaciones en centros urbanos por la creciente frecuencia e intensidad de las precipitaciones (Rodríguez, 2022). Un modo de monitorear la degradación de suelos es ser evaluados por características de su calidad mediante indicadores (Fernández y Urricariet, 2014), donde las propiedades edáficas y su posición en el paisaje determinan la susceptibilidad a ser dañados por distintos procesos (Zinck, 2005). La comprensión y modelización de los cambios en el uso y ocupación del suelo han generado interés para la gestión medioambiental. La teledetección y los sistemas de información geográfica son herramientas esenciales para evaluar los factores que provocan estos cambios (Bonansea *et al.*, 2021). Por tanto, es imprescindible determinar la vulnerabilidad ambiental en áreas rurales del ambiente fluvial Ctlamochita (dpto. Gral. San Martín, Córdoba, Argentina), mediante el análisis de factores formadores e indicadores de estado del suelo, a fin de contribuir a la sustentabilidad ambiental regional.

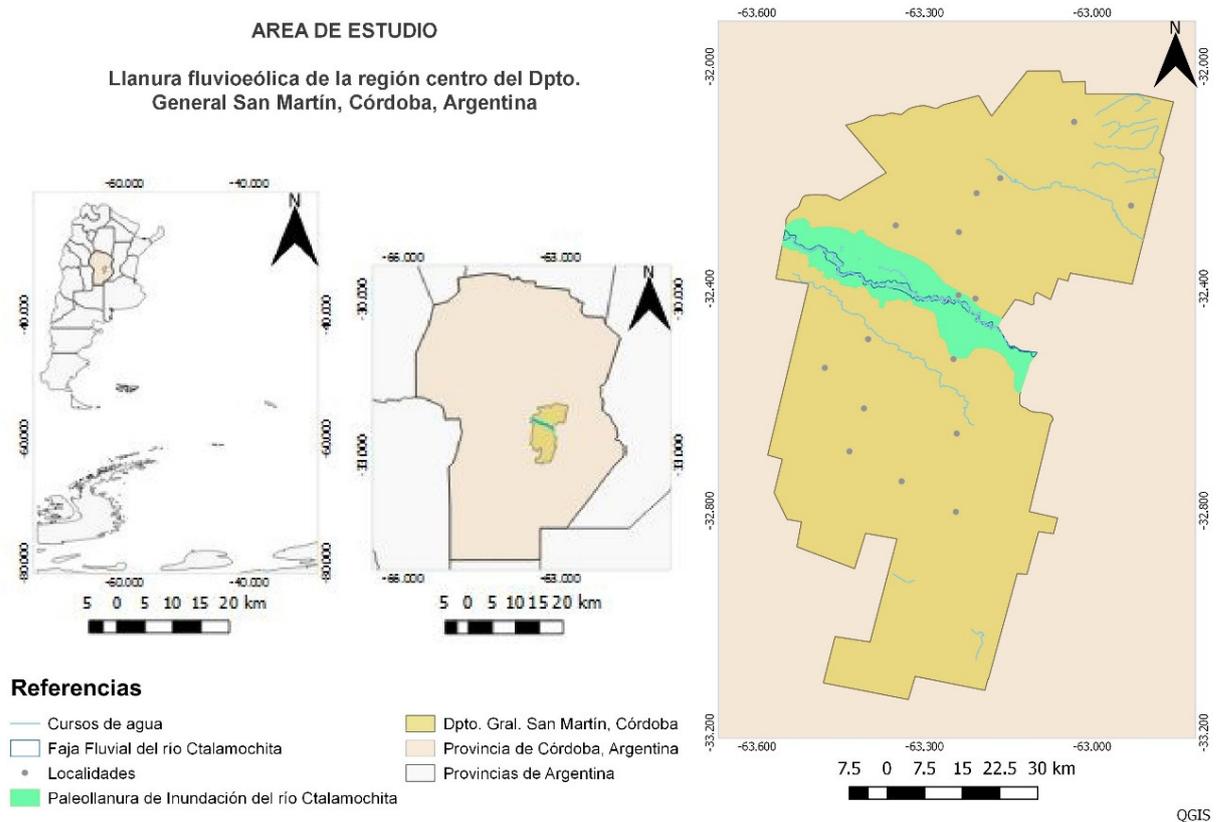
## 2. Área de estudio

Argentina tiene una superficie bicontinental de 3.800.000 km<sup>2</sup> y ocupa el extremo sur de América del Sur, entre los 21°46'S y los 55°10'S. Presenta gran variación altitudinal y, aunque gran parte del territorio está por debajo de los 200 m s.n.m., la zona occidental de la Cordillera de los Andes posee varios de los picos más altos del planeta como el Cerro Aconcagua de 6959 m (Mendoza). El país posee riqueza geológica, geomorfológica, climática, fitogeográfica y edáfica; predominan los accidentes geográficos fluviales, seguidos de los eólicos. La zona central y nororiental corresponde a las Llanuras Chaqueña y Pampeana (Pereyra, 2019) y en esta última se encuentran los suelos más fértiles conocidos como Molisoles Pampeanos (Liu *et al.*, 2012). Los Argiudoles y Hapludoles son los Grandes Grupos representativos (Rubio *et al.*, 2019), siendo el Loess Pampeano el material parental dominante (Pereyra, 2019).

La provincia de Córdoba exhibe un conjunto de geoformas resultantes de procesos exógenos y endógenos. La Llanura Chacopampeana se divide en: Depresión tectónica de la laguna de Mar Chiquita, Planicie arenosa eólica del sur, Ambientes pedemontanos y Planicie fluvioeólica central. En esta última se encuentra el área de estudio, conformada por abanicos aluviales coalescentes generados por ríos que nacen en las Sierras Grandes y descargan sus aguas hacia oriente: Suquía, Xanaes, Ctlamochita (o Tercero) y Chocancharava. En la Planicie fluvioeólica central (Bonalumi *et al.*, 2005; Carignano *et al.*, 2014) se han desarrollado procesos morfogenéticos que originaron los suelos provinciales (Sanabria *et al.*, 2014). Rodríguez (2022) propone que esta Planicie está compuesta por Unidades Ambientales Integradas (UAI) para el dpto. Gral. San Martín. En ese relieve se desarrollan molisoles, entisoles y alfisoles con problemas de salinidad y anegamiento (Bosnero *et al.*, 2006), donde el Lineamiento Rayo Cortado-Pampayasta-Alejandro influye en la hidrogeología (Costa *et al.*, 2014). El área de análisis se ubica en la cuenca media a baja del río Ctlamochita, Subunidades Ambientales Integradas Faja Fluvial y Paleollanura de Inundación del dpto. Gral. San Martín (Rodríguez, 2022) (Figura 1 y Figura 2).

Carignano et al. (2014) indican que el Paleoabánico aluvial (14.000 km<sup>2</sup>) del río Ctlamochita se conforma por superposición de cuatro abánicos (fluvial meandriforme, palustre, sistemas de paleocauces y planicie de inundación) sujeto a inundaciones (Bonalmi et al., 2005). La cuenca del río es un sistema pluvial con régimen permanente y tiene un área de 9580 km<sup>2</sup> (Carnicelli et al., 2018), que nace en las Sierras Grandes de Córdoba y se regula por embalses que pertenecen al sistema de generación eléctrica provincial (Ochoa et al., 2016). El cauce tiene un ancho promedio de 35 m y recorre (300 km O-E) la cuenca que lleva su nombre hasta el río Carcarañá. En sus márgenes se localizan importantes centros poblados como Villa María (Cossavella et al., 2013).

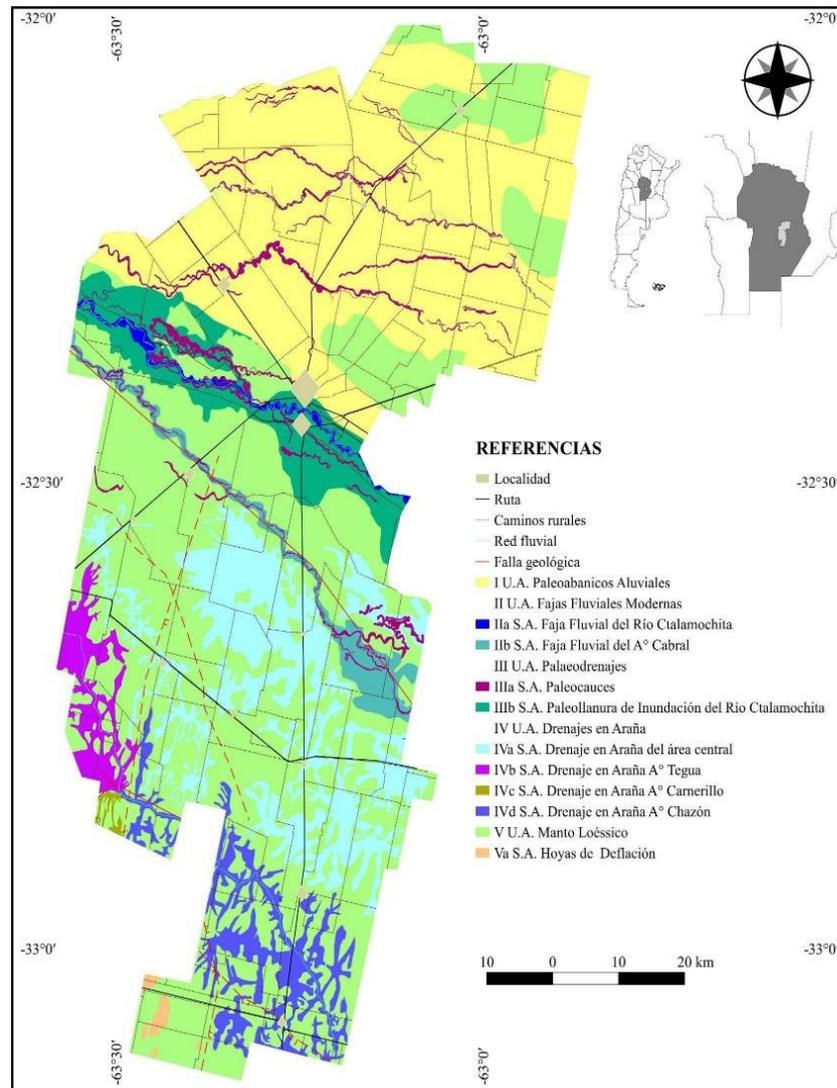
Figura 1. Ubicación del área de estudio a escala regional.



Fuente: elaboración propia en base a datos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de Rodríguez (2022).

El clima del territorio argentino presenta gran diversidad dada su extensión y disposición latitudinal alargada (Pereyra, 2019). En Córdoba, la marcada variabilidad del sistema climático sudamericano controla el ciclo hidrológico a diferentes escalas espaciales y temporales (Piovano et al., 2009; Córdoba, 2012), repercutiendo sobre la cantidad y calidad del agua y en la frecuencia e intensificación de eventos extremos. Esto implica que la región esté expuesta a riesgos por exceso (inundaciones, en el SE), como por falta de agua (sequías, en el NO) (Lopez et al., 2021). En las últimas décadas se incrementaron las precipitaciones medias anuales y los episodios de fuertes lluvias, donde los factores antrópicos inciden sobre la cantidad y calidad de los recursos hídricos (Dasso et al., 2014).

Figura 2. Mapa de UAI del dpto. Gral. San Martín.



Fuente: Rodríguez (2022) con datos geográficos del IGN.

El área de estudio presenta un clima templado subhúmedo de tipo monzónico con una precipitación media anual de 805 mm (Rodríguez, 2022), temperatura media anual de 16,5°C y vientos dominantes del sector N-NE (Bosnero et al., 2006). La vegetación natural corresponde a la Provincia Biogeográfica Pampeana, Distrito del Espinal, caracterizado por un bosque xerófilo con relictos aislados en un paisaje agrícola (Arana et al., 2021). En sectores bajos y derrames del río Ctalamochita hay comunidades herbáceas de hidrófitas y halófitas (Bosnero et al., 2006). Gorgas et al. (2014) afirman que el uso de la tierra es agrícola, sin respetar en algunos sectores la capacidad de uso.

### 3. Metodología

La caracterización climática se efectuó con datos pluviométricos de la Agencia de Extensión Rural-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (AER-INTA) Villa María (Serie 1956-2022) (32°25'S, 63°15'O, Altitud 198 m s.n.m.) y termométricos de la Carta de Suelos de Villa María (Bosnero et al., 2006).

Se seleccionaron al azar 37 puntos (naturales e intervenidos) en suelos representativos de las Subunidades Ambientales Faja Fluvial del río Ctlamochita (14 sitios, 9 intervenidos y 5 naturales) y su Paleollanura de Inundación (23 sitios, 19 intervenidos y 4 naturales). Los sectores seleccionados pertenecen a productores de la zona, con diversos tipos de explotación, uso y manejo de la tierra. Allí se realizaron observaciones con toma de muestras a campo y entrevistas a 23 productores intervinientes (Plencovich *et al.*, 2017) para la obtención de los datos sociales, uso y manejo de la tierra. El procesamiento de los datos se hizo mediante Excel e InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2017).

Se realizó un registro a campo de la presencia/ausencia de vegetación y de cobertura vegetal con posterior análisis de imágenes satelitales distantes en el tiempo para comparar cambios. Se utilizaron dos imágenes satelitales del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), una del 16 de agosto de 1990 y otra del 29 de agosto de 2018, de los satélites Landsat 5 y 8 (Path y Row: 228-82 y 228-83) respectivamente, presentando un nivel de procesamiento L2. Los datos fueron procesados mediante el software Qgis 2.18.4. Para comparar los cambios se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) donde se extrajeron los valores en puntos muestreados para calcular la vulnerabilidad de cada Subunidad Ambiental.

La caracterización morfopedológica se efectuó mediante el enfoque de Zinck (2012) con descripción morfológica y muestreo de perfiles en sitios naturales según el Handbook N° 18 (Soil Survey Staff, 2017) y posterior clasificación (Soil Survey Staff, 2014).

Para determinar vulnerabilidades se tomaron como base los conceptos de Rodríguez *et al.* (2017b) y el análisis de diversos factores como datos climáticos, topografía, litología, tipos de suelos, vegetación, cambios en el uso y manejo de la tierra y sociales que influyen en la génesis del suelo, tanto a instancia de gabinete como de campo (Jenny, 1941). Para el análisis de los factores formadores se utilizó la función propuesta por Jenny (1980): “S” ó “s”: f (cl; b; mo; g; t), donde S representa el suelo; s: una propiedad del suelo; cl: clima; b: biota; mo: material originario; g: geomorfología; y t: tiempo de inicio de la pedogénesis. Es importante destacar que no se incluyen datos de la población afectada fija o móvil.

Se seleccionó un set mínimo de indicadores de estado del suelo (Rodríguez *et al.*, 2014) de acuerdo con Cantú *et al.* (2007) para calcular el factor antrópico dado por el uso y manejo del suelo. El muestreo se realizó en los diferentes sitios a dos profundidades: en el horizonte (hz) superficial (0-5 cm; 5-10 cm) de la Faja Fluvial, así como en el superficial (0-5 cm) y subsuperficial (10-15 cm) de la Paleollanura de Inundación. Los mismos se evaluaron para definir la vulnerabilidad mediante comparación entre las muestras a campo de las Subunidades Ambientales y con sus naturales. Los indicadores fueron calibrados considerando el suelo natural de referencia adyacente al suelo intervenido. Se realizaron determinaciones para el cálculo de indicadores: carbono orgánico (CO) por calcinación (Heiri *et al.*, 2001), pH mediante potenciometría, relación suelo-agua 1:2,5 (Jackson, 1970), resistencia mecánica (RM) con penetrómetro manual y densidad aparente (DA) por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986).

La evaluación de la calidad y el modelo que aquí se propone para determinar la vulnerabilidad ambiental se basaron en Cantú *et al.* (2007) y Becker (2017) que establecen índices de calidad de suelo (ICS) con valores normalizados de indicadores entre 0 (peor condición) y 1 (mejor condición). Para establecer los valores máximos y mínimos para cada indicador se consideraron en algunos atributos umbrales calculados en los suelos de referencia y, en otros, valores de la región (Tabla 1). Para el CO del Haplustol típico de la Paleollanura de Inundación se consideró mínimo

el requerimiento para ser mólico (Soil Survey Staff, 2014); para la Faja Fluvial, el mínimo de la Paleollanura de Inundación. Como máximo, valores de sitios naturales. Para la DA, el mínimo fue la mejor condición (suelos naturales de referencia) y el máximo datos teóricos para la Faja Fluvial y de sitios intervenidos para la Paleollanura de Inundación. El mínimo de pH con el límite crítico donde puede verse deteriorado el sistema radical de las plantas y el máximo con valores de referencia. Para la RM mínima los suelos de referencia y los máximos fueron el promedio de valores en intervenidos. Finalmente, se estableció un ICS promediando los valores de todos los indicadores y se utilizó en una escala con cinco clases de calidad de suelo de acuerdo con Cantú et al. (2007).

Para las determinaciones de las vulnerabilidades se utilizaron las clases establecidas por Cantú et al. (2007) y se adaptaron al análisis de factores formadores y factor antrópico (calidad del suelo) (Tabla 2). Los valores de vulnerabilidades fueron asignados y normalizados entre 0 y 1, donde aquellos factores con valor numérico bajo representan baja vulnerabilidad, mientras que la misma aumenta cuando el número es mayor.

Tabla 1. Máximos y mínimos de cada indicador por hz y Subunidad Ambiental.

Subunidad Ambiental			Faja Fluvial		Paleollanura de Inundación	
Indicador	Unidad de medida	Valores	Hz Ap (0-5 cm)	Hz Ap (5-10 cm)	Hz Ap (0-5 cm)	Hz AB (10-15 cm)
CO	%	Máximo	3,85	2,91	5	3
		Mínimo	0,60			
DA	g/cm <sup>3</sup>	Máximo	1,80		1,50	
		Mínimo	0,97	1,04	0,87	0,94
pH		Máximo	7,20		7	
		Mínimo	5			
RM	Mpa	Máximo	4,92		2,80	5,46
		Mínimo	1,03			0,15

Fuente: elaboración propia según determinación de máximos y mínimos para la región.

Tabla 2. Clases de vulnerabilidades mediante índices.

Índice de vulnerabilidades	Escala	Clases
Muy alta	0,80 -1,00	1
Alta	0,60 - 0,79	2
Moderada	0,40 - 0,59	3
Baja	0,20 - 0,39	4
Muy baja	0,00 - 0,19	5

Fuente: elaboración propia en base a Cantú et al. (2007).

Seguidamente, se determinaron los factores más influyentes en la vulnerabilidad natural del recurso ante diferentes presiones o amenazas antrópicas y naturales. Se aplicó la fórmula de vulnerabilidad para cada punto de muestreo y se promediaron los valores de cada Subunidad Ambiental para la obtención de la vulnerabilidad total por Subunidad de la siguiente manera:

$$V(f) = \text{Factores formadores} + \text{Factor antrópico}$$

$$V(f) = (g + mo + cl + b + t) + cs$$

$$V(f) = a(vg) + b(vmo) + c(vcl) + d(vb) + e(vt) + f(vcs)$$

donde V (f) indica las vulnerabilidades que están en función de; g: la geomorfología; mo: material originario; cl: clima; b: biota; t: tiempo de inicio de la pedogénesis; cs: calidad del suelo; y v: vulnerabilidad (de cada factor: g, mo, cl, b, t y cs). Cada valor de vulnerabilidad se multiplicó por un factor (a; b; c; d; e; f) que representa el peso de acuerdo a su propensión a sufrir amenazas naturales y/o antrópicas.

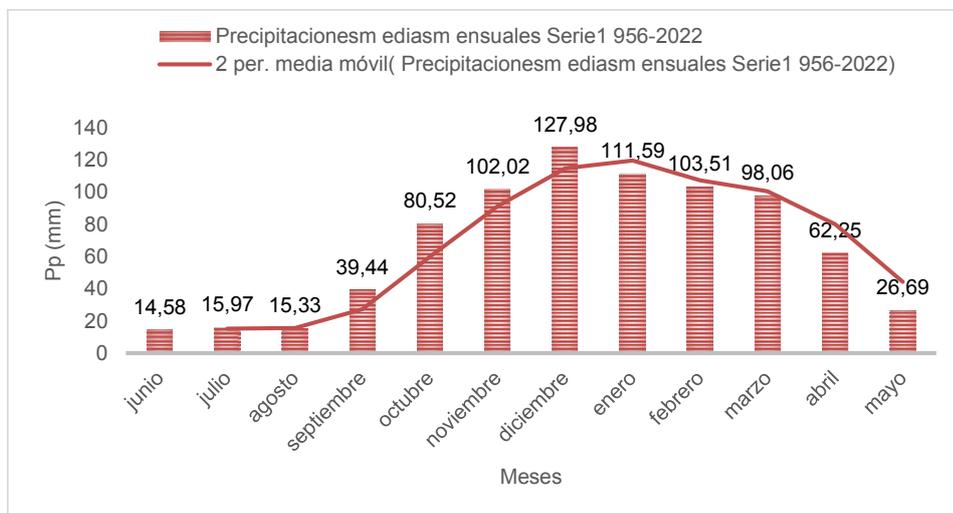
La identificación de amenazas y procesos geológicos se efectuaron con el análisis de entrevistas y registro fotográfico. Finalmente, se construyó un mapa de vulnerabilidad ambiental de las Subunidades Ambientales con Qgis 2.18.4. Se elaboró una tabla de atributos que contenía los valores de cada una de las variables consideradas y se aplicó el método de interpolación Distancia Inversa Ponderada para visualizar la distribución espacial de las mismas (Pérez Tovar, 2017). A este interpolado se le aplicaron los colores del semáforo de forma gradual siguiendo la escala establecida para los valores normalizados entre 0 y 1 a modo de detectar grados de vulnerabilidades de las Subunidades Ambientales y obtener una base para la planificación y ordenamiento territorial y ambiental.

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización climática

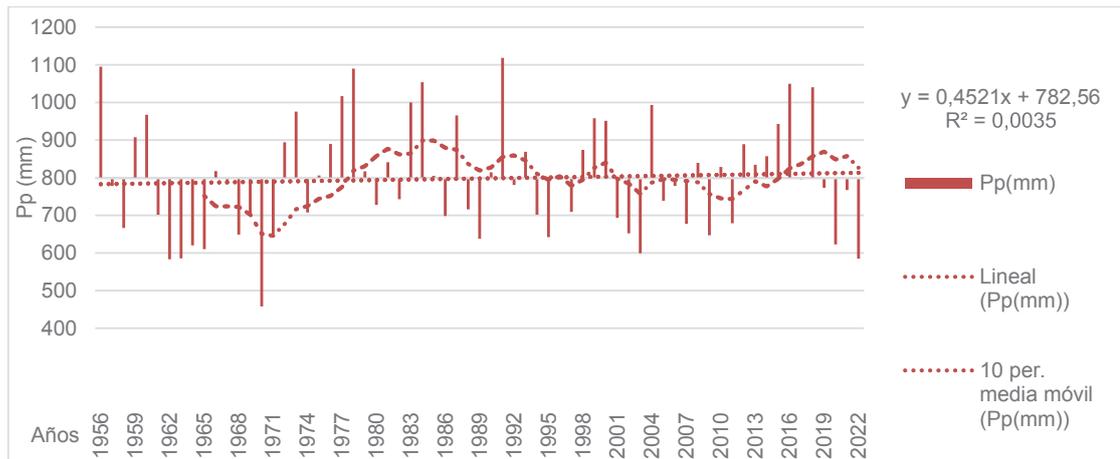
El régimen de precipitaciones es de tipo monzónico, concentrándose entre las estaciones de primavera-verano, presentando un 78,16 % de las precipitaciones anuales entre octubre y marzo (Figura 3). La precipitación media anual de la Serie 1956-2022 es de 797,94 mm (Figura 4), donde se identifican ciclos húmedos y secos. El ciclo seco más marcado es entre 1961-1971 con una precipitación media anual mínima de 458 mm en 1970. A partir de 1971 los ciclos tienden a ser húmedos con ciclos secos intermitentes, donde la precipitación media anual máxima es 1119 mm en 1991. El p-valor arroja como resultado 0,9573 para la variable precipitaciones. El clima es templado subhúmedo, característico del centro de la pradera pampeana. La temperatura media anual es de 16,5°C, siendo enero más cálido (23,9°C) y julio más frío (9,4°C). La amplitud térmica aproximada es de 14,5°C.

Figura 3. Precipitaciones medias mensuales de Villa María (Serie 1956-2022).



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de la AER-INTA.

Figura 4. Precipitaciones medias anuales de Villa María (Serie 1956-2022).



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos de la AER-INTA.

#### 4.2. Datos sociales, uso y manejo de la tierra

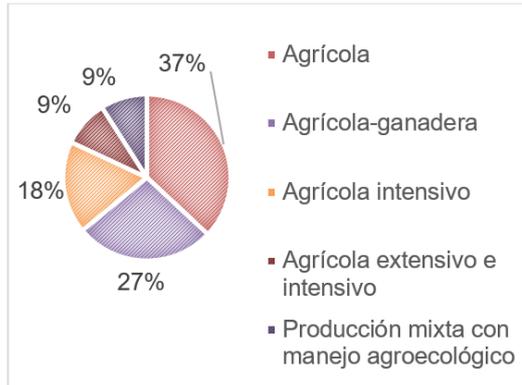
De 23 productores entrevistados en las diferentes Subunidades Ambientales, el 48 % están ubicados en la Faja Fluvial del río Ctalamochita y el 52 % en su Paleollanura de Inundación. Cada Subunidad tiene particularidades en el uso y manejo de la tierra.

En la Faja Fluvial del río Ctalamochita el 64 % de los entrevistados residen en zona rural, el 27 % en zona urbana y un 9 % en zona rural-urbana. Un 55 % son arrendatarios, 27 % son propietarios de forma hereditaria y un 18 % son propietarios. El 72 % de las producciones son recientes (menos de 30 años de antigüedad), donde se observaron cambios en el uso de la tierra. En este sentido el tipo de explotación que prevalece es la agrícola (37 %), siguiéndole la mixta (agrícola-ganadera) (27 %), agrícola intensiva (18 %), agrícola extensivo e intensivo (9 %) y producción mixta (9 %) con manejo agroecológico (Figura 5a). En cuanto a la agricultura, se realizan rotaciones y el 86 % con pasturas. Se destaca que hay presencia de vegetación (más del 73 %), particularmente a la ribera del río Ctalamochita. En relación con los factores ambientales que incidieron en los campos de manera negativa, un 46 % fue afectado por inundaciones debido al desbordamiento del río Ctalamochita, un 9 % por erosión en los márgenes del río, otro 9 % por anegamientos de caminos, mientras que un 27 % tanto por inundaciones por desbordamiento como por erosión de margen, quedando un 9 % sin afecciones (Figura 6a). No se ha observado erosión hídrica ni anegamientos actuales.

En la Paleollanura de Inundación el 83 % residen en zona rural y el 17 % en zona urbana. Un 33 % son arrendatarios, un 33 % son propietarios de forma hereditaria, mientras que un 25 % son propietarios y un 9 % son propietarios y arrendatarios a la vez. El 42 % de las producciones son recientes (menos de 30 años de antigüedad), un 16 % de entre 31 a 40 años y un 42 % desde hace más de 60 años. El tipo de explotación que predomina es la agrícola-tambera (42 %), la agrícola-ganadera (25 %), la agrícola (17 %) y la agrícola extensiva e intensiva (16 %) (Figura 5b). En la agricultura se realizan rotaciones con pasturas. Presenta un 50 % de masa arbórea natural y/o implantada. En relación con los factores ambientales que incidieron, un 42 % fue afectado por las inundaciones de los caminos rurales donde el agua provenía de otras zonas que estaban siendo inundadas por desbordamiento del río Ctalamochita. En cuanto a inundaciones un 8 % de los productores fueron afectados, mientras que un 25 % por inundaciones y anegamientos de

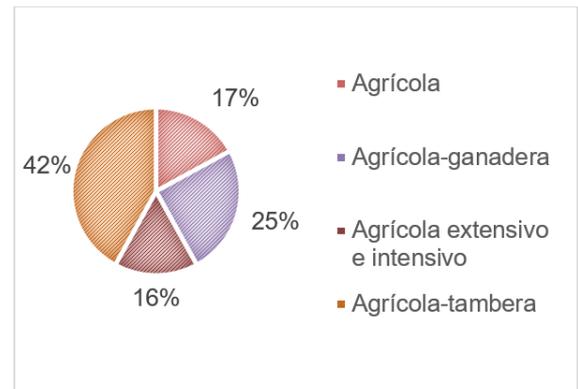
caminos. Por último, el 25 % restante no ha tenido afecciones (Figura 6b). En sí, los anegamientos de campos no han prevalecido ya que el terreno es más elevado en esta Subunidad Ambiental. Los productores alegan las inundaciones ocurridas a abundantes lluvias en cuenca alta, cambio climático, reactivación de paleocauces, usos y manejos del suelo y formas de explotación, escasez y/o ausencia de bosque nativo y pasturas de cobertura, como también al control insuficiente por parte de organismos responsables.

Figura 5a. Tipos de explotación en la Faja Fluvial.



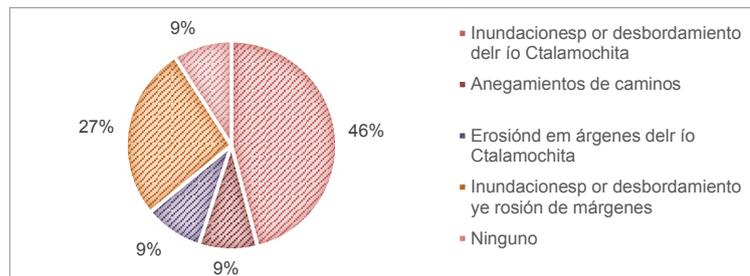
Fuente: elaboración propia a partir de datos de entrevistas a productores.

Figura 5b. Tipos de explotación en la Paleollanura de Inundación.



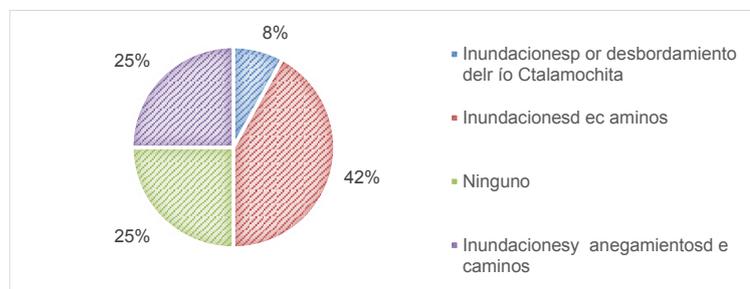
Fuente: elaboración propia a partir de datos de entrevistas a productores.

Figura 6a. Amenazas naturales en la Faja Fluvial.



Fuente: elaboración propia a partir de datos de entrevistas a productores.

Figura 6b. Amenazas naturales en la Paleollanura de Inundación.

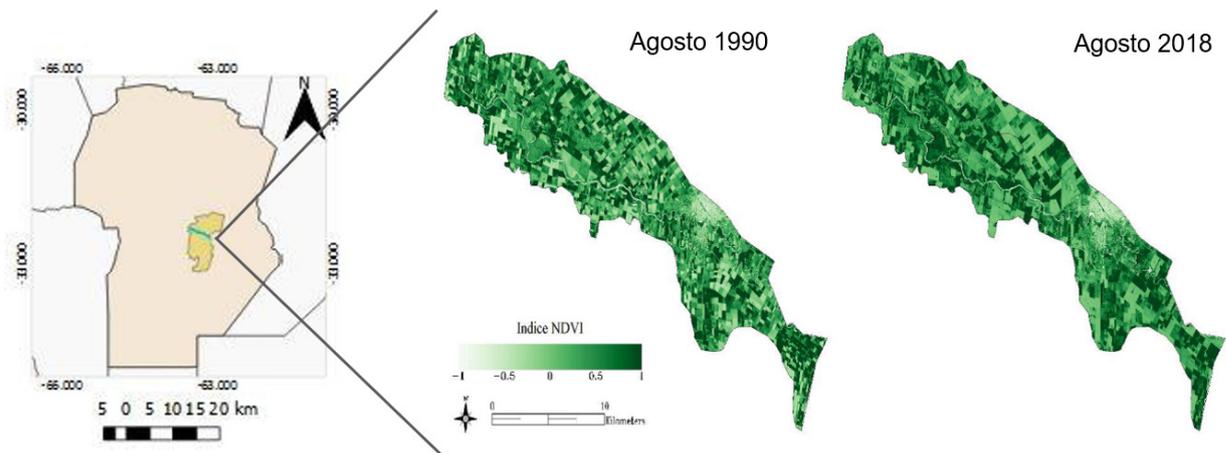


Fuente: elaboración propia a partir de datos de entrevistas a productores.

### 4.3. NDVI

A partir de la observación a campo y de los datos proporcionados por los productores se detalla que hay más presencia de vegetación en la Faja Fluvial, en ambos márgenes del río Ctlamochita, mientras que en la Paleollanura de Inundación hay una menor presencia de masa arbórea natural o implantada. La cobertura vegetal en ambas Subunidades Ambientales es similar. La Figura 7 muestra que los valores de NDVI promedio de los puntos de muestreo no presentan diferencias entre agosto de 1990 y el de 2018. La Faja Fluvial posee un valor de NDVI promedio de 0,36 en 1990 y de 0,41 en 2018. La Paleollanura de Inundación de 0,43 en 1990 y de 0,40 en 2018. Es decir, las coberturas vegetales no han variado notablemente en los años considerados. Si se analizan los puntos de muestreo por separado se observa una tendencia al aumento en los valores de NDVI de la Faja Fluvial, mientras que en la Paleollanura de Inundación tienden a disminuir. La biota es un factor formador indispensable al evaluar las vulnerabilidades de un suelo y la presencia de cobertura vegetal atenúa las amenazas que pudieran presentarse en las diferentes Subunidades Ambientales.

Figura 7. Índice NDVI del ambiente fluvial Ctlamochita (agosto 1990 y 2018).



Fuente: elaboración propia a partir de imágenes satelitales Landsat 5 y 8.

### 4.4. Características morfoedológicas de la toposecuencia representativa del ambiente fluvial Ctlamochita

A partir del mapa de Rodríguez (2022) se aprecian los perfiles de suelo representativos naturales e intervenidos (Figuras 8a, 8b, 8c y 8d) que conforman la toposecuencia del ambiente fluvial con sus características morfológicas (Tablas 3 y 4).

En la Faja Fluvial el tipo de paisaje es característico de las terrazas fluviales, relieve normal con pendientes de Clase 2 (1-3 %), escurrimiento medio y permeabilidad moderada en los primeros *hz* y permeabilidad muy lenta a partir de los 50 cm, suelo imperfectamente drenado con peligro de inundación de Clase 2 (áreas inundables). La distribución de la humedad es no uniforme en todo el perfil, seco y fresco con cobertura vegetal que varía entre el 80 % en sitios intervenidos y 100 % en naturales. Los suelos son desarrollados a partir de sedimentos fluviales franco arenosos. El *hz* superficial varía en espesor (19 cm en el natural a 7 cm en el intervenido), de colores pardo grisáceo muy oscuro en seco a pardo muy oscuro en húmedo y bien estructurado. Continúan hasta los 50 cm de profundidad diferentes *hz* C distinguiéndose 3 en el natural y 2 en el

intervenido, de colores pardo grisáceo oscuro en seco a pardo muy oscuro a negro en húmedo y estructuras masivas a laminares. Se evidencia presencia de gravas finas y medias entre los 35 y 50 cm de profundidad del natural.

Figura 8. Perfiles representativos del ambiente en estudio.

a) Faja Fluvial natural.

b) Paleollanura de Inundación natural.

c) Faja Fluvial intervenida.

d) Paleollanura de Inundación intervenida.



Fuente: elaboración propia: muestreo (a, b y c) y Castoldi y Emiliani (2016) (d).

El relieve de la Paleollanura de Inundación es subnormal con pendientes de Clase 0 (0-5 %), escurrimiento medio y permeabilidad moderadamente rápida, suelo bien drenado, peligro de inundación de Clase 3 (áreas poco inundables). La distribución de la humedad es no uniforme en todo el perfil, con cobertura vegetal del 100 %, en el natural y en el intervenido seleccionado. Los suelos son desarrollados a partir de sedimentos fluviales franco limosos. El epipedón presenta 20 cm de espesor, color pardo grisáceo oscuro a muy oscuro en seco en el intervenido y pardo amarillento oscuro a pardo grisáceo muy oscuro en seco en el natural. Predominan bloques medios débiles a moderados. El endopedón presenta un enriquecimiento en arcilla alrededor de los 35 a 40 cm distinguiéndose dos hz Bw en el natural, color pardo en seco y pardo oscuro a pardo amarillento oscuro en húmedo, prismas medios que rompen a bloques angulares medios y bloques gruesos a medios angulares en el natural, en cambio el intervenido presenta bloques irregulares medios. El pasaje al material originario es transicional, se encuentra a mayor profundidad en el natural (60 cm), masivo, con un hz C sin carbonatos que comienza diseminarse en la masa del suelo.

Tabla 3. Descripción del suelo: hz y características morfológicas en los sitios naturales e intervenidos de la Faja Fluvial del río Ctalamochita.

Sitio	Hz	Prof (cm)	Textura	Estructura	Color		Consistencia				Raíces	Límite	Suelo
					seco	húmedo	s	h	m-ad	m-pl			
Natural	A	0-19	Are-fr-grdi de 1cm	Bl-gr-me, fu	10Y/R 3/2	10Y/R 2/2	3	2	1	1	RR	ab-su	Ustipsamments típico
	C1	19-25	Are-fi	M-L	10Y/R 4/2	10Y/R 2/2	4	3	0	1	R	ab-su	
	C2	25-35	Fr-are-mfi	M	10Y/R 4/2	10Y/R 2/1	4	3	0	1	R	ab-su	
	C3	35-50	Are-grfi-grmedi	M	10Y/R 4/2	10Y/R 3/2	3	2	0	0	-	ab-su	
	2C	50+	Fr-arc-are	M	10Y/R 4/3	10Y/R 2/2	4	4	0	1	-	-	
Intervenido	Ap	0-7	Are-fr	Bl-gra-me, fu	10Y/R 4/2	10YR 2/2	3	2	1	1	R	ab-su	
	C1	7-16	Are-fr	A6-gra	10Y/R 4/3	10YR 2/2	3	2	1	1	R	ab-su	
	C2	16-47	Are-fi	Bl-gr	10YR 5/2	10YR 3/2	4	3	0	1	R	cl-su	
	Ck	47+*	Are-lim	M	10YR 5/2	10YR 3/2	1	0	1	0	-	-	

Leyendas Tablas 3 y 4: Textura: Are-grfi-grmedi: arenoso con gravas finas y medias dispersas; Are-fi: arenoso fino; Are-fr: areno-franco; Are-fr-grdi: areno-franco con gravas dispersas; Are-lim: areno limoso; Fr: franco; Fr-are-mfi: franco arenoso muy fino; Fr-arc-are: franco-arcillo-arenoso; Fr-lim: franco limoso. Estructura: Tipo: A3: granular; Bl: bloques; Bl-gra: grandes; A4: bloques subangulares; A5: bloques angulares irregulares; A6: bloques angulares regulares; A6-gra: bloques angulares regulares grandes; Bl-gr: gruesos; L: laminar; M: masiva; P: prismas. Clase: fi: fina; me: media; gr: gruesa. Grado: de: débil; mo: moderada; fu: fuerte. Hz: horizonte. Prof (cm): profundidad. Consistencia: s: seco; h: húmedo; m-ad: mojado (adhesividad); m-pl: mojado (plasticidad). Límite: Tipo: ab: abrupto; cl: claro; gr: gradual; Forma: su: suave. \*Alta reacción al carbonato de calcio (60 cm). \*\*Escasos barnices. \*\*\*Reacción débil, bajo contenido de carbonatos. \*\*\*\*Escasos barnices, abundantes hongos. \*\*\*\*\*Reacción débil, bajo contenido de carbonatos (+70cm).

Fuente: elaboración propia en base a los resultados del muestreo de suelos.

Tabla 4. Descripción del suelo de la Paleollanura de Inundación.

Sitio	Hz	Prof (cm)	Textura	Estructura	Color		Consistencia				Raíces	Límite	Suelo
					seco	húmedo	s	h	m-ad	m-pl			
Natural	A	0-10	Fr-lim	A4-gr-me, A3-gr-fi, de	10Y/R 3/4	10Y/R 2/2	2	2	1	1	RRR	ab-su	Haplustol típico
	AB	10-20	Fr-lim	Bl-me-fi, A3-fi, de	10Y/R 3/2	10Y/R 2/2	2	1	1	1	RRR	ab-su	
	Bw1	20-29**	Fr	P-me, A6-me, A3, mo-de	10Y/R 4/3	10Y/R 3/3	4	3	2	2	RRR	cl-su	
	Bw2	29-43	Fr	A6-gr-me, A3-me, de	10Y/R 4/3	10Y/R 3/4	2	2	1	1	RR	cl-su	
	BC	43-60	Fr-lim	Bl-me, A3-fi, de	10Y/R 5/3	10Y/R3/6	2	1	2	1	R	cl-su	
	C	60-81	Fr-lim	M	7.5Y/R 5/3	7.5Y/R 3/4	0	0	1	1	R	cl-su	
	Ck	81+***	Fr-lim	M	7.5Y/R 6/3	7.5Y/R 3/4	0	0	1	1	R	-	
Intervenido	Ap	0-7	Fr-lim	A5-me, mo	10Y/R 4/2	-	-	3	2	2	RRR	cl-su	
	A2	7-20	Fr-lim	A5-gr, mo-A3	10Y/R 3/2	-	-	2	2	2	RRR	gr-su	
	Bw****	20-35	Fr-lim	A5-me, mo-de	10Y/R 2/2	-	-	2	2	2	RRR	gr-su	
	BC	35-50	Fr	A3-me, de	7,5Y/R 4/3	-	-	1	2	2	RR	cl-su	
	Ck*****	50+	Fr	M	7,5Y/R 4/4	-	-	1	2	2	R	-	

Fuente: elaboración propia en base a los resultados del muestreo de suelos.

#### 4.5. Determinación de las vulnerabilidades ambientales

Los factores formadores contribuyen a la susceptibilidad ambiental de una Subunidad Ambiental y se le suma el factor antrópico mediante la calidad del suelo con indicadores. La geomorfología, tiempo de pedogénesis y biota condicionan la vulnerabilidad natural de la Faja Fluvial y en la Paleollanura de Inundación, la biota y calidad del suelo, y en menor medida la geomorfología. La ausencia de masa arbórea y la moderada calidad de suelos hacen a la vulnerabilidad natural y antrópica.

Se presentan los valores normalizados de indicadores y el ICS para cada Subunidad Ambiental (Tabla 5). La Faja Fluvial en el hz Ap (0-5 cm) se aleja en calidad un 30,3 % de su referente natural, mientras que en el hz Ap (5-10 cm) un 34,3 %. La Paleollanura de Inundación en el hz Ap (0-5 cm) se aleja un 42,6 % y en el AB (10-15 cm) un 46,6 %. Los valores de cada indicador se alejaron del natural de referencia, más en la Paleollanura de Inundación que en la Faja Fluvial ya que el uso y manejo afectaron la calidad de los suelos. La Tabla 6 detalla los factores y valores asignados de vulnerabilidad del recurso ante presiones o amenazas antrópicas y naturales.

Tabla 5. Indicadores e ICS normalizados por hz y Subunidad Ambiental.

Subunidad Ambiental				
Indicador	Faja Fluvial del río Ctalamochita		Paleollanura de Inundación	
	Ap (0-5 cm)	Ap (5-10 cm)	Ap (0-5 cm)	AB (10-15 cm)
CO	0,572	0,572	0,491	0,640
DA	0,754	0,754	0,502	0,430
pH	0,673	0,673	0,747	0,837
RM	0,790	0,790	0,547	0,229
ICS	0,697 Clase 2: alta	0,697 Clase 2: alta	0,572 Clase 3: moderada	0,534 Clase 3: moderada

Fuente: elaboración propia en base a la determinación de máximos y mínimos para cada Subunidad Ambiental y hz.

Tabla 6. Factores y valores de vulnerabilidad por Subunidad Ambiental.

Vulnerabilidad	Factores formadores		Factor	Valor	Factor	Valor
			Faja Fluvial		Paleollanura de Inundación	
		Geomorfología	0,50	1	0,50	0,50
		Material originario	0,02	0,30	0,02	0,30
			Limos loessoides arenosos (Formación Arroyo Las Lajas) (Cantú, 1992)			
		Clima	0,04	0,30	0,04	0,30
			Subhúmedo			
		Biota (cobertura)	0,20	0,29*	0,20	0,29*
			NDVI			
		Tiempo de pedogénesis	0,04	1	0,04	0,50
	Poco desarrollo		Mediano desarrollo			
	Factor Antrópico	Calidad del suelo	0,20	0,20**	0,20	0,37**

\* Valores promedios de la vulnerabilidad del NDVI por Subunidad Ambiental.

\*\* Valores promedios de la vulnerabilidad de la calidad del suelo por Subunidad Ambiental.

Fuente: elaboración propia en base al cálculo de cada factor formador y antrópico.

La fórmula de vulnerabilidad total promedio para la Faja Fluvial es:

$$V(f) = \text{Factores formadores} + \text{Factor antrópico}$$

$$V(f) = (g + mo + cl + b + t) + cs$$

$$V(f) = a(vg) + b(vmo) + c(vcl) + d(vb) + e(vt) + f(vcs)$$

$$V(f) = 0,50(1) + 0,02(0,30) + 0,04(0,30) + 0,20(0,29) + 0,04(1) + 0,20(0,20)$$

$$V(f) = 0,50 + 0,006 + 0,012 + 0,058 + 0,04 + 0,04$$

$$V(f) = 0,66$$

Por lo que es alta, definiendo una clase de vulnerabilidad de tipo 2.

La fórmula de vulnerabilidad para la Paleollanura de Inundación es:

$$V(f) = \text{Factores formadores} + \text{Factor antrópico}$$

$$V(f) = (g + mo + cl + b + t) + cs$$

$$V(f) = a(vg) + b(vmo) + c(vcl) + d(vb) + e(vt) + f(vcs)$$

$$V(f) = 0,50(0,50) + 0,02(0,30) + 0,04(0,30) + 0,20(0,29) + 0,04(0,50) + 0,20(0,37)$$

$$V(f) = 0,25 + 0,006 + 0,012 + 0,058 + 0,02 + 0,074$$

$$V(f) = 0,42$$

Siendo moderada de tipo 3, por lo que la Faja Fluvial es más vulnerable.

A partir del cálculo de las vulnerabilidades totales de cada Subunidad Geomorfológica se observa que la Faja Fluvial es más vulnerable que la Paleollanura de Inundación ante amenazas naturales y antrópicas. No obstante, no debe descuidarse la Paleollanura de Inundación donde su vulnerabilidad es moderada y esto es clave en el análisis de los riesgos ambientales.

#### 4.6. Amenazas y procesos geológicos

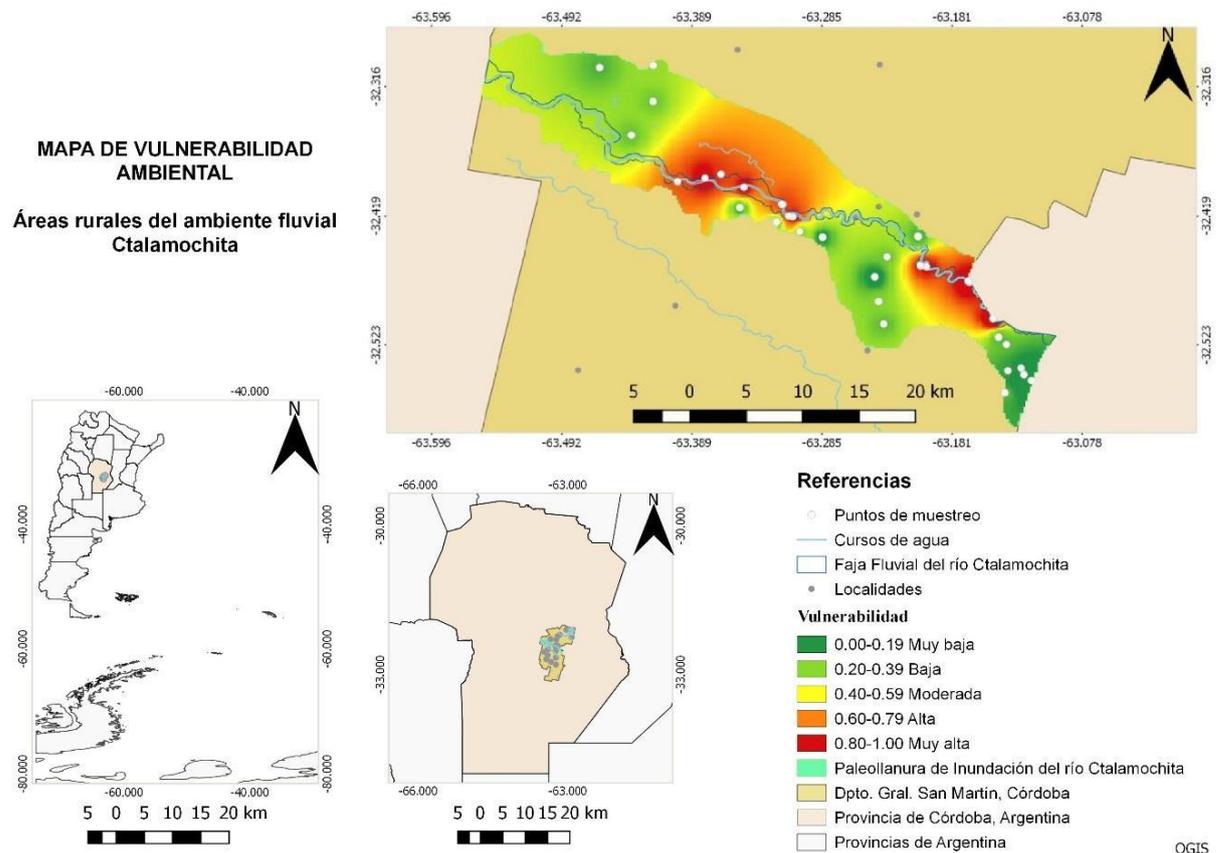
Las amenazas que influyen en el área de estudio están caracterizadas por el uso y manejo que se dan a los suelos y los procesos geológicos intervinientes que poseen un marcado carácter de la dinámica del río Ctalamochita. Se identifica que las áreas de derrame, terrazas altas, paleocauces y meandros abandonados tienen una notable representación areal, por lo que las amenazas naturales en la Faja Fluvial son las inundaciones por desbordamiento del río y erosión de márgenes. En la Paleollanura de Inundación los procesos de inundaciones y anegamientos de caminos rurales. La presencia de agua se debe a desbordes del sistema hidrológico superficial permanente, ciclos climáticos húmedos, lluvias intensas locales y/o desarrolladas en cuenca alta. La mayoría de los procesos se potencian por intervenciones.

#### 4.7. Integración sistemática de las vulnerabilidades

Las condiciones climáticas, geomorfológicas, material originario, biota y tiempo de inicio de la pedogénesis del área de estudio son determinantes en la ocurrencia de procesos geológicos. No obstante se analiza que la vulnerabilidad de un sistema no sólo depende de los factores formadores de un suelo, sino también del factor antrópico en relación con la calidad de los suelos. Esto indica que ante la amenaza en un medio natural, no solo el proceso geológico se hace presente, sino que hay una profunda relación con la forma e intensidad de las intervenciones antrópicas efectuadas en el medio físico. En la Figura 9 se observa que la vulnerabilidad de la Faja Fluvial ante inundaciones por desbordamiento del río Ctalamochita y erosión de márgenes es alta, con valores entre 0,605 y 0,768. Aunque no se observan grandes diferencias entre los valores de vulnerabilidad por punto de muestreo. Las zonas más vulnerables se caracterizan por la geomorfología propia de esta Subunidad Ambiental y un bajo desarrollo de los suelos, donde la masa arbórea ha sido altamente modificada, siendo la biota un factor condicionante. Si bien la calidad de los suelos es alta, se requiere sostener su buena gestión y no debe descuidarse su uso y manejo. En la Paleollanura de Inundación, ante inundaciones y anegamientos de caminos, la vulnerabilidad es baja a moderada entre 0,324 y 0,473 y no tiene distinciones entre puntos de muestreo, pero la condicionan la ausencia de masa arbórea natural o implantada, la geomorfología y su moderada calidad de suelos.

El riesgo se obtiene de multiplicar las vulnerabilidades por las amenazas y, aunque aquí no se ha calculado, algunos factores presentan mayor peso que otros en la definición del riesgo ambiental total de una Subunidad Geomorfológica. Si bien los valores totales varían entre altos en la Faja Fluvial y bajos a moderados en la Paleollanura de Inundación, las amenazas se valorarían por encima de las vulnerabilidades, dado el uso y manejo del suelo y los procesos geológicos. De este modo, se logra zonificar el territorio a partir de los factores naturales y antrópicos y los procesos geológicos que constituyen una herramienta útil para la prevención de desastres y previsión de riesgos potenciales. Se considera que las vulnerabilidades propias de los suelos y las amenazas actuales y potenciales identificadas deberían condicionar el uso y manejo de los suelos y no solo la capacidad de uso productiva definida en las cartografías pedológicas disponibles. Los productores perciben y exponen las amenazas naturales que se desencadenan en sus tierras, por lo que el conocimiento de la vulnerabilidad ambiental es imprescindible para prevenir y remediar la degradación de los suelos.

Figura 9. Vulnerabilidades de las Subunidades Ambientales.



Fuente: elaboración propia con datos geográficos del IGN y de Rodríguez (2022).

## 5. Discusión

Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que la determinación de la vulnerabilidad ambiental, a partir del análisis de factores formadores e indicadores de calidad del suelo, contribuyen a la sustentabilidad ambiental regional. Godagnone y de la Fuente (2014) expresan

que el conocimiento de los suelos, su ubicación y el área que ocupan son fundamentales para planificar racionalmente su aprovechamiento. Además, toda decisión acerca de cambios en el uso de la tierra debiera ser evaluada a través de la mayor o menor fragilidad del ambiente (Mazziotti, 2014).

En relación con la caracterización climática, de los valores totales de los años en estudio se desprende un  $R^2$  (Figura 4) extremadamente pequeño (0,0035) por lo que la variación interanual no podría ser explicada o correlacionada con los valores medios de precipitación. La línea de tendencia es levemente positiva, aunque la misma tiene una pendiente sumamente débil demostrando un cambio casi imperceptible (Forgioni, comunicación personal, 2018). A su vez, con el valor  $p$  obtenido no se puede concluir que exista una diferencia significativa entre las precipitaciones medias anuales, donde de la Casa y Nasello (2012) indican que la precipitación anual en Córdoba no presenta una tendencia lineal y homogénea en toda la región. Esta variabilidad interdecadal explica que en la región se identifiquen ciclos húmedos y secos.

Los datos sociales arrojaron similitudes con investigaciones de la región. Rodríguez (2022) advierte migración de la población rural al sector urbano, concentrándose en ciudades intermedias que caracterizan al dpto. Gral. San Martín, donde el bosque ribereño fue altamente modificado. Por otro lado, se originó el avance de la agricultura sobre áreas ocupadas antes por la ganadería (Castoldi y Emiliani, 2016).

En relación con los factores ambientales que incidieron, tal como señala Celis (2008), numerosas regiones de la Argentina han sido afectadas por distintos tipos de desastres a lo largo de la historia, siendo los más predominantes aquellos vinculados a causas de origen hidrometeorológico como las inundaciones. La vegetación ejerce un fuerte control sobre las variables hidrológicas (Rodríguez et al., 2021) ya que impacta en la respuesta de los recursos naturales a eventos. En coincidencia, Pereyra (2012) expresa que la Llanura pampeana es la región más intensamente modificada por el uso humano, donde lo natural subsiste en pequeños sectores. Si bien la actividad agrícola-ganadera predomina en la Paleollanura de Inundación, posiblemente la agricultura esté desplazando a la producción ganadera y el avance de la frontera agrícola se dé hacia la Faja Fluvial (Salguero, 2022).

En cuanto a la determinación de las vulnerabilidades ambientales se coincide en que la morfología, pendiente de la Faja Fluvial (Carignano et al., 2014), áreas de derrame (Bosnero et al., 2006) y terrazas erosivas condicionan la vulnerabilidad natural. En la Faja Fluvial, Geotaxa más joven y activa, los procesos de morfogénesis dominan sobre los de pedogénesis y se han reportado diferentes usos productivos que afectan de manera negativa la fragilidad natural del sistema. En cambio, la Paleollanura de inundación no presenta problemáticas para el uso productivo, pero precisa ser planificada respetando la dinámica fluvial (Rodríguez, 2022). Cisneros et al. (2001) indican que las inundaciones del sur de la provincia presentan factores naturales y antrópicos en interacción. Un sistema de información de los recursos naturales es necesario para un mejor diagnóstico y estudio de las condiciones del suelo y nivel de degradación (Pennock y McKenzie, 2015). Esto demuestra la importancia de considerar el factor antrópico en el análisis de vulnerabilidades ambientales y su influencia en la determinación de amenazas. Se destaca que el cálculo efectuado se trata de una gran aproximación al estudio de la vulnerabilidad, siendo necesario incluir referencias de la población afectada en estudios posteriores, para obtener resultados más completos en materia de prevención.

## 6. Conclusiones

En la presente investigación desarrollada en las Subunidades Ambientales Faja Fluvial del río Ctalamochita y Paleollanura de Inundación se determinó la vulnerabilidad ambiental en áreas rurales del ambiente fluvial Ctalamochita, Córdoba. Mediante el análisis de factores formadores del suelo (geomorfología, material originario, clima, biota y tiempo de pedogénesis) y el factor antrópico con indicadores e índices de calidad del suelo, se obtuvo una zonificación del territorio. Así, la geomorfología, tiempo de pedogénesis y la biota condicionan la vulnerabilidad natural de la Faja Fluvial, mientras que en la Paleollanura de Inundación tienen especial relevancia la biota, calidad del suelo por uso y manejo y en menor medida la geomorfología. En las Subunidades Ambientales analizadas los indicadores CO, DA, pH y RM son efectivos para evaluar la calidad de un suelo, observándose que los sitios intervenidos difieren en calidad respecto a los naturales de referencia. Las entrevistas a productores proporcionan datos valiosos sobre el uso y manejo de la tierra. Los procesos geológicos están influenciados por la dinámica del río Ctalamochita y se ven potenciados por intervenciones antrópicas. Las amenazas naturales en la Faja Fluvial incluyen inundaciones por desbordamiento del río Ctalamochita y erosión de sus márgenes, mientras que en la Paleollanura de Inundación se identifican inundaciones y anegamientos de caminos rurales.

La zonificación del territorio basada en la vulnerabilidad de las Subunidades Ambientales es fundamental para evaluar la capacidad de unidades territoriales para distintos usos. Esta metodología es sencilla de aplicar mediante factores formadores y antrópicos y replicable en las otras UAI. La identificación de las vulnerabilidades es un paso indispensable para analizar amenazas y riesgos ambientales, permite evaluar las posibilidades de implementar medidas de atenuación de accidentes en las poblaciones ribereñas, considerando la población expuesta y evaluar riesgos ambientales sobre la población y el territorio rural y urbano a nivel regional. La historia de la dinámica del sistema fluvial, así como las probabilidades de eventos de inundaciones fuertes, erosión de márgenes y anegamientos, permiten elaborar políticas integradas a nivel de cuenca.

De esta investigación surgen preguntas para futuros trabajos: ¿cómo pueden integrarse métodos de monitoreo para actualizar la zonificación de la vulnerabilidad ambiental?; ¿qué nuevos indicadores de calidad del suelo podrían incorporarse?; ¿cuáles son las mejores prácticas de manejo del suelo que podrían reducir la vulnerabilidad? Estos interrogantes, y otros, implican desafíos en el estudio de riesgos ambientales regionales y abren paso a metodologías más integradas.

## Bibliografía

- Arana, M.D., Natale, E., Ferretti, N., Romano, G., Oggero, A., Martínez, G.,...Morrone, J.J. (2021). *Esquema bio-geográfico de la República Argentina*. Opera lilloana, 56, 1-238.
- Ayala-Carcedo, F.J. (2002). El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- Becker, A. (2017). ¿Qué son los indicadores? Capítulo I. Aspectos Generales. En M.G. Wilson (Ed.), *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina* (1a ed., pp. 19-22). Entre Ríos: Ediciones INTA.
- Blake, G.R., y Hartge, K.H. (1986). Bulk density. En A. Klutr (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods* (5, pp. 363-375). Madison, Estados Unidos.
- Boletta, P.E., Ravelo, A.C., Planchuelo, A.M., y Grilli, M. (2006). Assessing deforestation in the Argentine Chaco. *Forest Ecology and Management*, 228(1-3), 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.02.045>
- Bonalumi, A., Martino, R., Sfragulla, J. A., Carignano, C., y Tauber, A. (2005). Hoja Geológica 3363-I Villa María, Provincia de Córdoba. *Boletín*, 347.

- Bonansea, M., Bazán, R., Germán, A., Ferral, A., Beltramone, G., Cossavella, A., y Pinotti, L. (2021). Assessing land use and land cover change in Los Molinos reservoir watershed and the effect on the reservoir water quality. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103243. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103243>
- Bosnero, H., Pappalardo, J., Sanabria, J., Carnero, M., y Bustos, V. (2006). *Carta de Suelos de la Rep. Argentina, Hoja 3363-9, Villa María, Escala 1:50.000*. Convenio Agencia Córdoba Ambiente-INTA.
- Bran, D.E., Gaitán, J.J., y Wilson, M. (2017). Los indicadores de calidad de suelo como un componente de la sustentabilidad de los agroecosistemas. Capítulo I. Aspectos Generales. En M.G. Wilson (Ed.), *Manual de indicadores de calidad del suelo para las ecorregiones de Argentina* (1 ed., pp. 15-18). Entre Ríos: Ediciones INTA.
- Cantú, M.P. (1992). Holoceno de la provincia de Córdoba. En M. Iriondo (Ed.), *El Holoceno de la República Argentina* (pp. 1-16). Buenos Aires: CADINQUA, INQUA-AGA-CONICET.
- Cantú, M.P., Becker, A., Bedano, J.C., y Schiavo, H.F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencias del Suelo*, 25(2), 173-178.
- Carignano, C., Kröhling, D., Degiovanni, S., y Cioccale, M. (2014). Geomorfología. *Geología del Cuaternario, Geomorfología y Cambio Climático*. Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino, Córdoba.
- Carnicelli, G., Cossavella, A., Lubrina, E., OMill, P., Rodriguez, I., y Roqué, M. (2018). Estudio de calidad de agua para diversos usos en el Río Tercero (Ctalamochita) Córdoba. *4to Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*. Buenos Aires.
- Castoldi, L.R., y Emiliani, E.I. (2016). *Evaluación de la calidad de un suelo representativo de la Paleollanura de Inundación en agroecosistemas de Villa María, Córdoba* (tesis de grado). Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina.
- Celis, A. (2008). Documento país en avance: riesgos de desastres en Argentina. En *Documento país en avance: Riesgos de desastres en Argentina*. Centro Estudios Sociales y Ambientales.
- Cisneros, J., Degioanni, A., Gil, H., Cantero, J.J., Cantero, A., Rang, S.,... Vigliocco, M. (2001). *Propuesta de Creación de los Distritos de Ordenamiento Ambiental: Gral. Levalle - Río Bamba - Laboulaye y Rosales - Leguizamón - Villa Rossi*. Convenio UNRC-Dirección de Saneamiento Obras Hidráulicas de la Provincia de Buenos Aires.
- Córdoba, F. (2012). *El registro climático del Holoceno tardío en latitudes medias del SE de Sudamérica: Limnogeología de las Lagunas Encadenadas del Oeste, Argentina* (tesis doctoral). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Cossavella, A. M., Carranza, P., Oroná, C., Monarde, F., Larrosa, N., Nadal, F.,...Díaz, A. (2013). Gestión de efluentes líquidos en la cuenca del río Tercero (Ctalamochita). *XXIV Congreso Nacional del Agua*. San Juan.
- Costa, C., Massabie, A., Sagripanti, G., Brunetto, E., y Coppolecchia, M. (2014). Geología de Superficie, Neotectónica. *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba.
- Dasso, C.M., Piovano, E.L., Pasquini, A.I., Córdoba, F.E., Lecomte, K.L., Guerra, L., y Campodónico, V.A. (2014). Recursos hídricos superficiales. *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba.
- de la Casa, A., y Nasello, O. (2012). Tendencias parciales de los días de lluvia y la intensidad media anual en la provincia de Córdoba, Argentina. *Meteorológica*, 37(2), 67-77.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M., y Robledo, C.W. (2017). *InfoStat versión*. Grupo InfoStat, FCA, UNC, Argentina.
- Fernández, P.L., y Urricariet, S. (2014). Deterioro de los recursos naturales. Degradación y calidad de suelos. En P.B. Lombardo, P.L. Fernández y S. Urricariet (Eds.), *Agroecosistemas. Caracterización, implicancias ambientales y socioeconómicas* (1 ed.). Editorial FAUBA.
- Godagnone, R.E., y De la Fuente, J.C. (2014). Los recursos naturales de Argentina en un SIG. *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas*. Buenos Aires.
- Gorgas, J., Sanabria, J., Bustos, V., y Rouzaut, S. (2014). Recursos Naturales: Los Suelos. *Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba.
- Heiri, O., Lotter, A.F., y Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of paleolimnology*, 25, 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Jackson, M. L. (1970). *Análisis Químico de Suelos*. Barcelona: Omega.
- Jenny, H. (1941). Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. Mineola.
- Jenny, H. (1980). The soil resource: Origen and behavior. *Ecological studies*, 37, 276-304.

- Lario Gómez, J., Bardají Azcárate, T., Herrera García, G., Pérez Torrado, F.J., Gutiérrez Santolalla, F., García Rodríguez, M.,...Menéndez-Duarte, R. (2017). *Introducción a los Riesgos Geológicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- Lavado, R. S. (2016). *Degradación de los suelos argentinos. Suelos y geología argentina: una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Undav Ediciones.
- Liu, X., Lee Burras, C., Kravchenko, Y.S., Duran, A., Huffman, T., Morras, H.,...Yuan, X. (2012). Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(3), 383-402. <https://doi.org/10.4141/cjss2010-058>
- Lopez, E.E., Pintos, G., Corral, M.A., y Rodríguez, A. (2021). Vulnerabilidad hídrica del gran Córdoba ante escenarios de sequías y análisis de alternativas para la provisión de agua. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 8(1), 31-39.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I., y Rodríguez, G.R. (2005). Changes in climate and crop production during the 20th century in Argentina. *Climatic change*, 72, 229-249. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5374-9>
- Mazziotti, H.J.M. (2014). Plan de desarrollo del sudoeste bonaerense: política pública en ambientes frágiles. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas. Buenos Aires.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., y Díaz, J. M. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río Ctalamochita, Provincia de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 3(2), 95-101.
- Organización de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (1979). *Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Experts Group Meeting*. Recuperado de <https://digitallibrary.un.org/record/95986?ln=es&v=pdf>
- Paruelo, J.M., Guerschman, J.P., y Verón, S.R. (2005). Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy*, 15(87), 14-23.
- Pennock, D., y McKenzie, N. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo, Resumen técnico*. Roma, Italia: FAO y GTIS.
- Pereyra, F.X. (2012). *Suelos de la Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Anales N°50. SEGEMAR-AACS-GAEA.
- Pereyra, F.X. (2019). Geology and Geomorphology. En G. Rubio, R.S. Lavado y F.X. Pereyra (Eds.), *The soils of Argentina*. Springer International Publishing.
- Pereyra, F.X., y Torres Duggan, M. (Eds.). (2016). *Suelos y geología argentina: una visión integradora desde diferentes campos disciplinarios*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Undav Ediciones.
- Pérez Tovar, G.A. (2017). *Dinámica espacio-temporal (2004-2017) en el parque ecológico Distrital de humedal Capellanía en Bogotá a partir de parámetros de calidad de agua* (tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Piovano, E., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M., y Sylvestre, F. (2009). Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka. En F. Vimeux, F. Sylvestre y M. Khodri (Eds.), *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions: From the Last Glacial Maximum to the Holocene* (pp. 323-351). Springer-Developments in Paleoenvironmental Research Series (DPER).
- Pla, I. (2012). Problemas de degradación de suelos en América Latina: Evaluación de causas y efectos. *X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo*. Quito, Ecuador.
- Plencovich, M.C., Vugman, L.I., Cordon, G., Rodriguez, M., Mella, A., y Sónora, M.V. (2017). La Construcción del conocimiento en las ciencias ambientales. En EFA (Ed.), *La investigación en las ciencias ambientales*, 1 ed.
- Rodriguez, M.J. (2022). *Evaluación de la calidad de suelos mediante indicadores e índices en la región de Villa María, Córdoba* (tesis doctoral). Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Rodriguez, M.J., Becker, A., Grumelli, M., Bouza, P., Castoldi, L., Giaccone, C.,...Gastaldi, B. (2017b). Implementación de la geopedología para contribuir a la evaluación ambiental del Departamento General San Martín, Córdoba. *IV Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables*. Universidad Nacional de Villa María, Córdoba.
- Rodriguez, M.J., Becker, A., Grumelli, M., Bouza, P., y Conci, E. (2017a). Conformación de unidades morfopedológicas para el desarrollo de una planificación sustentable del Departamento General San Martín, Córdoba. *XX Congreso Geológico Argentino. Geología, Presente y Futuro*. San Miguel de Tucumán.

- Rodríguez, M.J., Becker, A., Grumelli, M., Pagliano L., Bedano, J. C., y Cabrera, F.S. (2014). Variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo en agroecosistemas del Centro-sur de Córdoba. *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional Materia Orgánica y Sustancias Húmicas*. Buenos Aires.
- Rodríguez, M.J., Conci, E., Becker, A., Grumelli, M., Ledesma, M.M., Rangone, A.,...Bouza, P. (2021). Environmental Risk in the Fluvio-Aeolian Plain of the Region Center of the General San Martín Department, Córdoba, Argentina. En P. Bouza et al. (Eds.), *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: Proceedings of the Seventh Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress* (pp. 244-284). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-66161-8_11)
- Rubio, G., Pereyra, F.X., y Taboada, M.A. (2019). Soils of the Pampean Region. En G. Rubio, R.S. Lavado y F.X. Pereyra (Eds.), *The soils of Argentina*. Springer International Publishing.
- Salguero, J.F. (2022). *Caracterización del avance de la frontera agrícola: impacto potencial del nitrógeno en el ambiente fluvial Ctalamochita* (tesis de grado). Universidad Nacional de Villa María, Córdoba, Argentina.
- Sanabria, J., Tauber, A., Argüello, G., Morrás, H., Moretti, L., Krapovickas, J.,...Zahn, E. (2014). Paleosuelos del Holoceno en el área de Los Gigantes, Sierra Grande de Córdoba, Argentina. *XIX Congreso Geológico Argentino*. Córdoba.
- Soil Survey Staff. (2014). *Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. Washington: USDA.
- Soil Survey Staff. (2017). *Soil Survey Manual*. Handbook 18. Washington: USDA.
- Zinck, A. (2005). Suelos, información y sociedad. *Gaceta ecológica*, 76, 7-22.
- Zinck, A. (2012). *Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales: Enschede*. The Netherlands, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation.

## Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional de Villa María (UNVM) y Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC) Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Mendoza (UTN-FRM) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

## Contribución de autorías

Eliana Conci: conceptualización, metodología, investigación, organización y análisis formal, y redacción original. María Jimena Rodríguez: conceptualización, metodología, investigación, análisis y redacción; Analía Rosa Becker: supervisión metodológica y análisis; María Micaela Ledesma: investigación, análisis de datos espaciales, elaboración de mapas y redacción; Aldo Fernando Rangone: supervisión metodológica y análisis de datos sociales; Julieta Fabiola Salguero: análisis y redacción.

## Financiación

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de investigación "Evaluación de riesgos ambientales en agroecosistemas de la región central del departamento General San Martín, Córdoba" 2018-2019, Res. Rect. N° 615, Universidad Nacional de Villa María (UNVM), Argentina. También, con recursos humanos del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

## Conflicto de intereses

Los/as autores/as de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.