

Morfometría de una cuenca de los Andes Centrales, San Juan, Argentina: evaluación de los factores condicionantes del terreno a la ocurrencia de aluviones

*Natalia Noemí Ríos¹, Carla Ginesta Torcivia^{1,2}, María Romina Onorato^{1,3},
Valeria Cortez Taillant⁴, María Yanina Esper Angillieri^{2,5}

¹ Gabinete de Neotectónica y Geomorfología-Instituto de Geología Dr. Emiliano P. Aparicio (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de la Roza 590 (O), Rivadavia, J5402DCS, San Juan, Argentina. nataliaros727@gmail.com; ginestageo@gmail.com; mronorato@unsj-cuim.edu.ar

² Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biosfera (CIGEOBIO, UNSJ-CONICET), Av. Ignacio de la Roza 590 (O), 3° Piso, Rivadavia, J5402DCS, San Juan, Argentina. yaninaesper@gmail.com

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET-Argentina), Godoy Cruz 2290, C1425FQB, CABA, Argentina.

⁴ Gabinete de Geología Ambiental-Instituto de Geología Dr. Emiliano P. Aparicio (INGEO), Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de la Roza 590 (O), 3° Piso, Rivadavia, J5402DCS, San Juan, Argentina. valeriasofia1292@gmail.com

⁵ Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña (EICAM), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan. Av. Libertador 1109 (O). Capital, J5400ARL, San Juan, Argentina.

* Autor de correspondencia: nataliaros727@gmail.com

RESUMEN. El presente trabajo tiene como objetivo determinar zonas propensas a la ocurrencia de aluviones en la cuenca del río Jáchal (provincia de San Juan, Argentina). La cuenca del río Jáchal abarca una superficie de ~29.000 km² y un perímetro de ~2.400 km, mientras que el río homónimo se extiende por ~570 km. Es una cuenca de 7° orden, según la clasificación de Strahler, y debido a su extensión regional en este trabajo se subdivide en cuatro subcuencas a partir del 6° orden. Se analizaron, además, diversas características morfométricas de la cuenca y se calcularon algunos parámetros básicos y derivados. Estos cálculos son la base para predecir en forma aproximada el comportamiento de la cuenca ante la presencia de fuertes precipitaciones, lo que se traduce en importantes volúmenes de agua con caudales máximos capaces de generar aluviones significativos. La cuenca posee un carácter torrencial, por lo que ante precipitaciones intensas las condiciones del terreno contribuirían a incrementar el flujo de los ríos principales. Se realizó un inventario de depósitos aluvionales en la zona y se evaluó su relación con las variables condicionantes del terreno. En las zonas de confluencia, los afluentes muestran mayor vigorosidad en sus crecidas que el colector principal, lo que propicia la generación de aluviones. Las zonas más propensas a ser afectadas corresponden a terrenos poco rugosos con pendientes de hasta 15°, concentrados en zonas con bajo contenido de humedad, ubicadas en media ladera y bajada pedemontana orientadas al este, así como zonas bajas de llanuras de inundación y confluencia de tributarios sobre el lecho de los ríos principales. Centros poblados y rutas provinciales y nacionales podrían verse afectadas en caso de eventos aluvionales en la zona.

Palabras clave: Inventario, Morfometría, Aluvión, Río Jáchal.

ABSTRACT. Morphometry of a Central Andean basin, San Juan, Argentina: assessment of conditional factors to the occurrence of flash floods. The present work aims to determine flash flood occurrence prone areas, in the Jáchal river basin, San Juan Province, Argentina. The Jáchal river basin covers ~29,000 km² and has a perimeter of ~2,400 km, while the eponymous river extends for nearly 570 km. It is a 7th order basin according to Strahler's classification, subdivided into four 6th order sub-basins. Various morphometric basin characteristics are analysed and some basic and derived parameters are calculated. These calculations allow predicting the basin behaviour due to heavy rainfall, which

translates into large volumes of water with peak flows capable of generating significant flash floods. The basin has a torrential character, so in case of intense rainfall the terrain conditions would contribute to increasing the flow of the main rivers. An inventory of alluvial deposits was carried out and their relationship with the conditioning variables of the terrain was evaluated. At the confluence zones, the river tributaries show more intense overflows than the main collector. This promotes the generation of flash floods. The areas most likely to be affected by flash flood events correspond to low-humidity, east-facing slightly rough terrains, with slopes of up to 15° as well as low-lying flood plain sectors, and at the confluence of tributaries with the main rivers. Populated centres and provincial and national routes are prone to be affected by alluvial events in the study area.

Keywords: Inventory, Morphometry, Flash floods, Jáchal river.

1. Introducción

Las cuencas hidrográficas son unidades físicas que deben ser consideradas para la planificación y gestión del desarrollo sostenible en el territorio (*e.g.*, Botelho y Silva, 2004; Cohen y Davidson, 2011; Senisterra *et al.*, 2014). Una cuenca hidrográfica posee múltiples funcionamientos, los cuales dependen de las condiciones climáticas y de las características físicas propias de la cuenca. La interacción entre estas variables condicionantes resulta en una serie de procesos naturales que permiten comprender la dinámica de la cuenca, particularmente a partir del estudio y caracterización de sus parámetros morfométricos (*e.g.*, Cordeiro *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2019; Godínez-Tamay *et al.*, 2020). Dicho análisis es de gran importancia para comprender e interpretar el comportamiento morfodinámico de la cuenca, así como su respuesta hidrológica frente a diferentes escenarios de precipitaciones (*e.g.*, Méndez y Marcucci, 2006; Gaspari y Delgado, 2010; da Silva Alves *et al.*, 2021).

Un aluvión (*flash flood* en inglés) corresponde a un flujo de agua rápido, repentino, que ocurre generalmente en ambientes áridos (NWS/NOAA, 2010¹; Karkani *et al.*, 2021). Se define como un súbito incremento en el nivel del agua en una corriente, como resultado de lluvias torrenciales o del colapso de diques naturales o artificiales, el cual crece en magnitud en especial cuando la tasa de infiltración del suelo se ve reducida debido a lluvias previas (Karkani *et al.*, 2021).

Los aluviones son uno de los procesos naturales con más frecuencia en el mundo y pueden causar daños considerables (*e.g.*, Ahmadalipour y Moradkhani, 2019; Filho *et al.*, 2022). Su comportamiento y ocurrencia están estrechamente relacionados con la intensidad de las precipitaciones pluviales, las condiciones climáticas, las características topográficas y morfológicas, las condiciones de drenaje y las actividades humanas

(Khajehei *et al.*, 2020). Para reconocer la correlación entre los factores condicionantes de los aluviones y su incidencia se necesita un mapa inventario (Pradhan *et al.*, 2015). Este insumo constituye una línea de base para el análisis espacial de la ocurrencia de aluviones en la zona de interés. Es también una herramienta necesaria para la evaluación de la susceptibilidad espacial a través de métodos estadísticos (Aristizábal *et al.*, 2019).

En la provincia de San Juan, Argentina, los análisis de cuencas hidrográficas están enfocados en zonas cercanas a centros poblados. En este caso, cabe destacar el aporte de Perucca y Paredes (2005), el que permitió evaluar los aspectos hidrográficos de una cuenca de régimen torrencial, e identificarla como la causante de la mayoría de los daños en el departamento de Pocito. Por otro lado, en la zona del río Santa Cruz, D'odorico *et al.* (2009) y Perucca y Esper Angillieri (2009) estudiaron el aluvión resultante del colapso de un dique natural, originado por un previo deslizamiento de rocas y detritos en el curso medio de dicho río. En otro estudio, Perucca y Esper Angillieri (2011) analizaron las características morfométricas de la cuenca del río Molle con la finalidad de predecir su comportamiento ante la presencia de futuras lluvias. Pittaluga y Suvires (2010), en el valle de Iglesia-Calingasta, analizaron la ocurrencia de aluviones con base en un estudio de las unidades geomorfológicas. Esper Angillieri *et al.* (2016) realizaron estudios morfométricos en la cuenca del río del Agua para evaluar la susceptibilidad/peligrosidad de ocurrencia de aluviones con énfasis en el comportamiento y respuesta hidrográfica del sistema. Esper Angillieri y Fernández (2017), por su parte, emplearon herramientas SIG (sistemas de información geográfica) y de teledetección para analizar varias cuencas a lo largo de la ruta nacional 150. Ginesta Torcivia *et al.* (2021), mediante análisis morfométricos, generaron un inventario de aluviones asociados a la dinámica de cuencas para

¹ NWS/NOAA. 2010. <https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=flash+f>

determinar alternativas de caminos de montaña con respecto a la ruta nacional 150. Localmente, análisis de susceptibilidad de la ocurrencia de aluviones fueron realizados por Esper Angillieri (2011, 2014, 2020) sobre cuencas pequeñas. Finalmente, en los Andes Centrales de la provincia de Mendoza, Espósito *et al.* (2023) correlacionaron variables topográficas con la distribución de depósitos de remoción en masa, entre ellos depósitos aluvionales.

De acuerdo con el registro en periódicos locales (provincia de San Juan) acerca de aluviones ocurridos durante la temporada estival de los últimos años, se establece la cuenca del río Jáchal (Fig. 1) como una zona con tendencia a la generación de estos eventos. En este trabajo, se busca determinar el comportamiento dinámico e hidrográfico de la cuenca del río Jáchal, y con base en la evaluación de los factores condicionantes del terreno establecer las



FIG. 1. A. Temporal de tres días que dañó al menos 18 rutas en la provincia de San Juan, donde las más perjudicadas fueron las rutas nacionales 40 y 150; marzo de 2021 (<https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/El-temporal-de-3-dias-dano-al-menos-18-rutas-y-5-calles-en-toda-la-provincia-20210303-0076.html>). B. Ruta nacional 40 afectada por aluvión e inundaciones luego de precipitaciones intensas: enero de 2022 (<https://www.diariohuarpe.com/nota/alerta-por-crecientes-como-estan-las-rutas-en-san-juan-202212710140> y <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/Temporal-en-San-Juan-algunas-rutas-estan-cortadas-y-hay-badenes-cubiertos-por-el-agua-20220127-0019.html>). C. y D. Bajada de la creciente en Rodeo, la que provocó roturas en caños e inundaciones, anegó las calles contiguas con barro y agua, y afectó la ruta nacional 150; enero de 2023 (<https://radiounsuj.com/cortes-de-luz-calles-anegadas-y-cultivos-destrozados-lo-que-dejo-la-tormenta-de-anoche/> y <https://www.canal13sanjuan.com/san-juan/2023/1/27/impactantes-imagenes-la-lluvia-causo-desastres-en-la-ruta-150-197753.html>). E. Corte de rutas nacionales 40 y 150 durante eventos veraniegos de tormentas; enero de 2023 (<https://www.youtube.com/watch?v=Mv-7AQznSMA>). F. Efectos de un aluvión sobre la ruta nacional 40 en Jáchal; marzo de 2023 (<https://www.diariomovil.info/2023/03/16/san-juan-la-lluvia-arraso-con-un-tramo-de-la-ruta-40/>).

zonas más propensas a ser afectadas por aluviones detonados por eventos de lluvias torrenciales.

2. Área de estudio

2.1. Ubicación

La cuenca del río Jáchal está ubicada en el centro-norte de la provincia de San Juan y oeste de la provincia de La Rioja (Fig. 2), sector andino del oeste de Argentina, entre las latitudes 28°0' y 31°9' S y las longitudes 70°1' y 67°5' O. La cuenca forma parte del espacio geográfico llamado Sistema Desagüadero (Damiani, 2016). Corresponde a una cuenca de 7° orden (Fig. 3) según la clasificación de

Strahler (1952b), con una superficie de 28.991,30 km² y un perímetro de 2.395,96 km. Debido al carácter regional del estudio, la cuenca del río Jáchal se dividió en cuatro subcuencas denominadas S1, S2, S3 y S4 (Figs. 2 y 3).

El río Jáchal es uno de los ríos permanentes más importantes y caudalosos de la provincia de San Juan, con un caudal medio anual de 10,2 m³/s (Vich *et al.*, 2016). Este río es alimentado por los procesos nivoglaciales de la alta cordillera de las provincias de San Juan y La Rioja. Posee una longitud de 571,02 km, nace con el nombre de Salado y adquiere varias denominaciones conforme va escurriendo hasta su punto de desagüe (Lupano y Abeucci, 2008²).

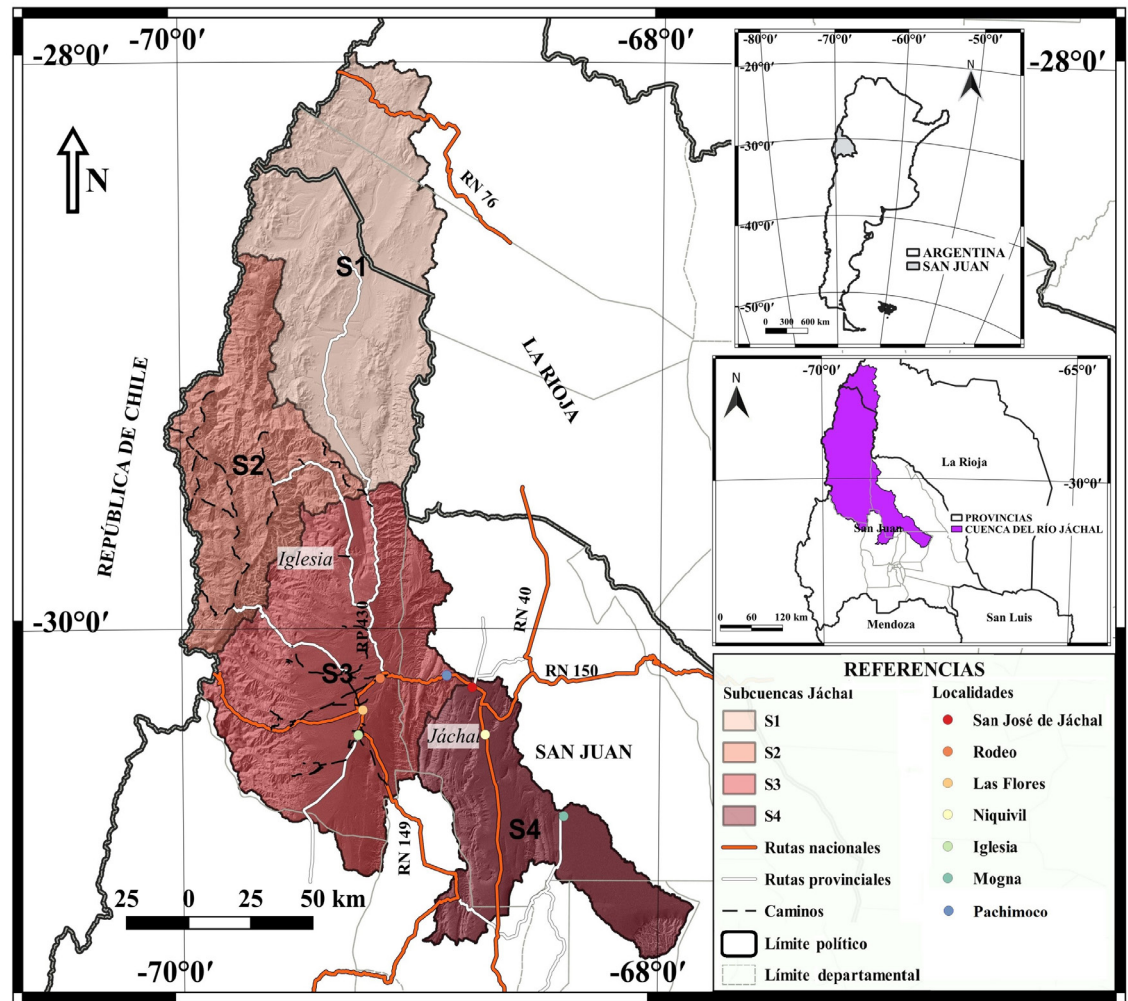


FIG. 2. Mapa de ubicación de la cuenca y subcuencas del río Jáchal, así como localidades, límites políticos, y rutas nacionales y provinciales. Destacan los departamentos de Iglesia y Jáchal.

² Lupano, C.; Abeucci, C. 2008. Cuenca del río Jáchal (Cuenca N° 53). Buenos Aires; Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación; mayo 2008.

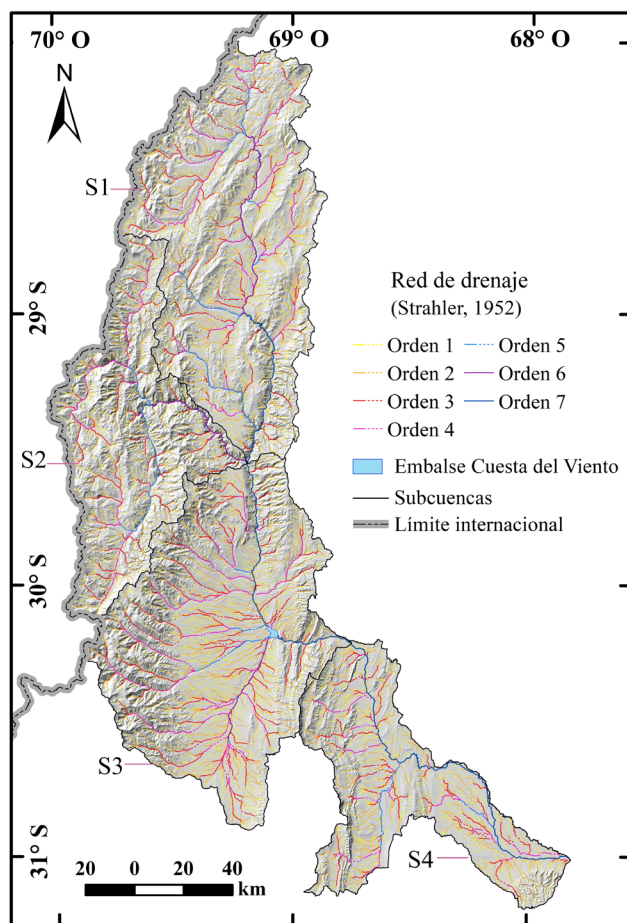


FIG. 3. Red de drenaje de la cuenca del río Jáchal (de acuerdo con clasificación según Strahler, 1952b).

2.2. Clima

El clima que predomina en la cuenca del río Jáchal, según la clasificación de Köppen y Geiger (1936), es del tipo seco desértico “BW”, en el cual la evaporación excede a la precipitación media anual (Poblete y Minetti, 1989). Existe una marcada deficiencia hídrica, por lo que no hay cursos de agua permanentes alimentados por precipitaciones pluviales, sino que son típicos los arroyos con régimen de escorrentía intermitente o efímero en la región. Las precipitaciones pluviales se concentran en el verano, con un valor anual promedio de 93,3 mm (Minetti *et al.*, 1986). En el valle de Iglesia-Calingasta, y en algunos sectores de la Precordillera Occidental y Cordillera Frontal (Fig. 4), la temperatura media del mes de enero supera los 22 °C, lo que configura a la zona como un desierto de altura relativamente

fresco entre los 1.800 y 2.400 m s.n.m. Por encima de los 3.300 m s.n.m., se desarrolla en la región un clima nevado de tipo “E”, con una temperatura media anual inferior a 10 °C. Entre los 3.300 y 4.250 m s.n.m., en la Cordillera Frontal, se distinguen zonas con climas de Tundra “ET”, de nieves perpetuas “EF” y seco de alta montaña “EB”. Este último, en particular, se caracteriza por la presencia de un periodo de precipitaciones en verano, cuya distribución geográfica incluye la cuenca superior del río Jáchal. Por encima de los 4.250 m s.n.m., la temperatura media de enero es de 0 °C, y corresponde al clima de nieves perpetuas “EF” (Suvires y Pereyra, 1994).

La cuenca del río Jáchal presenta dos regímenes de precipitación, uno de origen atlántico y otro pacífico. Respecto al primero, los mayores aportes ocurren entre los meses de octubre y marzo, típicamente mediante

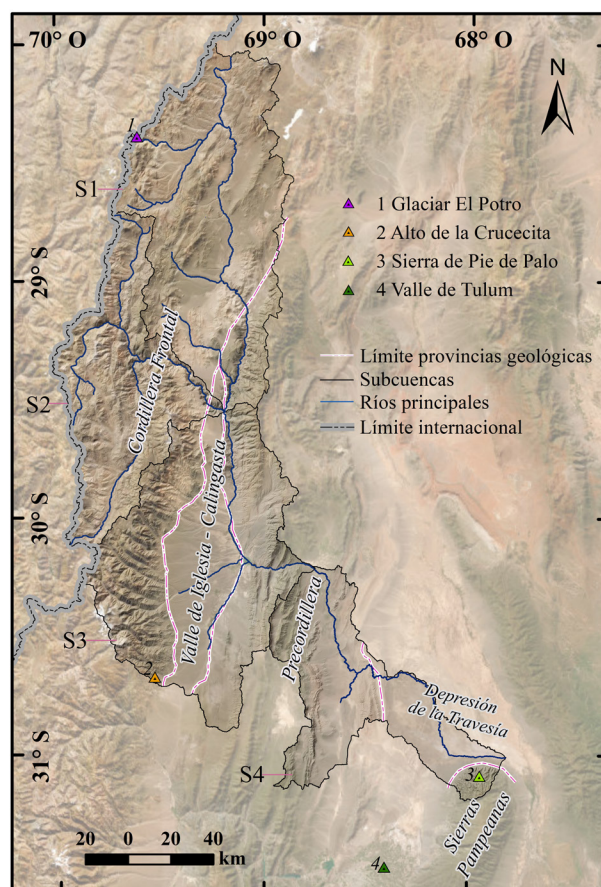


FIG. 4. Ubicación de la cuenca del río Jáchal respecto a las unidades morfoestructurales elevadas de Cordillera Frontal, Precordillera (Occidental, Central y Oriental) y Sierras Pampeanas, separadas por las unidades bajas del valle de Iglesia-Calingasta y depresión de la Travesía (Imagen modificada de Perucca y Vargas, 2014).

eventos de lluvias cortas, esporádicas y torrenciales, con valores máximos de precipitación de hasta 25,8 mm/día (Mulet, 2021³), los que son responsables de las crecientes extraordinarias reconocidas en el sector. Las precipitaciones provenientes del Pacífico, en tanto, acontecen entre los meses de abril y septiembre, usualmente en estado sólido (nieve o nevisca); estas constituyen los principales aportes al río Jáchal (Bereciartua *et al.*, 2009).

2.3. Infraestructura crítica y antecedentes históricos

En la cuenca del río Jáchal existen importantes áreas urbanizadas (Fig. 2), entre ellas las ciudades de San José de Jáchal (25.462 habitantes) e Iglesia (8.763 habitantes) (INDEC, 2022⁴). La zona también

destaca por una importante actividad agrícola, turística y fundamentalmente minera en la zona cordillerana, que incluye algunos de los principales proyectos mineros nacionales (*e.g.*, mina Veladero y proyectos Filo del Sol y José María). Asimismo, obras civiles de gran importancia se encuentran en el área de estudio. Entre ellas cabe mencionar rutas nacionales y provinciales, así como el embalse Cuesta del Viento (Figs. 2 y 3). Este último tiene la función de regular el caudal del río Jáchal y generar energía hidroeléctrica para la zona, alcanza una capacidad de hasta 40 gigavatios por hora. Esta infraestructura crítica puede verse seriamente expuesta ante eventos aluvionales, tal como ocurrió, por ejemplo, durante la temporada estival entre los años 2021 y 2023 (Fig. 1).

³ Mulet, M.A. 2021. Caudales Mensuales Históricos. Departamento de Hidráulica. Gobierno de San Juan.

⁴ INDEC. 2022. Censo Nacional de Población; hogares y vivienda. Argentina. Disponible en <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-3-999-70-000-2022>.

En los últimos años, según periódicos y reportes locales, se han registrado a lo largo de la cuenca del río Jáchal diversas tormentas de carácter torrencial que dieron origen a eventos aluvionales que produjeron cortes de rutas (Fig. 1), caídas de árboles y destrucción de viviendas y vehículos en los departamentos de Iglesia y Jáchal. Estas tormentas torrenciales ocurrieron principalmente entre los meses de octubre a marzo. Según los reportes publicados en periódicos locales, las tasas de precipitación que ocasionaron estos eventos variaron desde los 17 a 23,5 mm/día. Existe también registro de procesos aluvionales generados a partir de valores menores de precipitación diaria, lo que sucede en casos de eventos de lluvias consecutivas (Diario de Cuyo, 2017⁵, 2018⁶, 2021⁷, 2022⁸; Diario Huarpe, 2022⁹; Diario Móvil, 2023¹⁰; Radio UNSJ, 2023)¹¹. Bereciartua *et al.* (2009) registraron, en la cuenca del río Jáchal para el periodo 1960-2009, un aumento de las crecidas del 24% con caudales de hasta 214 m³/s.

3. Rasgos geomorfológicos y estructurales

La cuenca del río Jáchal se desarrolla de noroeste a sureste sobre las unidades morfoestructurales de la Cordillera Frontal, Precordillera Occidental, Precordillera Central y Precordillera Oriental y parte de las Sierras Pampeanas (extremo norte de la Sierra de Pie de Palo) (Fig. 4). Los límites entre estas unidades morfoestructurales están representados por valles intermontanos de orientación norte-sur y de origen tectónico (Fig. 4). En particular, la cuenca estudiada tiene una pendiente que disminuye alrededor de 6 km hacia el sureste, desde la Cordillera Frontal (altitud máxima de 6.449 m s.n.m.) hasta el valle de Tulum (640 m s.n.m. en promedio). La morfología del área de estudio se caracteriza por cordones montañosos y serranías en las unidades Cordillera Frontal, Precordillera y Sierras Pampeanas, y por geoformas bajas, tales como piedemonte y playas o barreales, en el valle de Iglesia-Calingasta y en la depresión de la Travesía (Fig. 4).

En el extremo noroeste de la cuenca del río Jáchal, hacia las áreas elevadas predominan las

geoformas erosivas glaciales, sin embargo, el proceso morfogenético más importante es el fluvial. Los principales ríos son Blanco, Salado, Macho Muerto, Santa Rosa y San Guillermo en la subcuenca S1; los ríos de la Sal, de las Taguas, la Palca y del Valle del Cura en la subcuenca S2; los arroyos del Agua Negra, de Iglesia y el río Blanco en la subcuenca S3, los que confluyen en el embalse Cuesta del Viento, y los ríos Tajín y Zanjón en la subcuenca S4 (Fig. 5). Esta última subcuenca ocupa parte de la depresión de la Travesía, que al igual que el valle de Iglesia-Calingasta (parte de la subcuenca S3), son cuencas intermontanas de origen tectónico, rellenas por un gran espesor de sedimentos cuaternarios (Suvires, 2000; Perucca, 2016).

La morfología glacial en la zona se restringe a los sectores por encima de los 5.000 m s.n.m., en los extremos occidentales de las subcuencas S1, S2 y S3, donde se han reconocido pequeños glaciares y depósitos morrénicos (*e.g.*, Uliarte *et al.*, 1990; Perucca, 2016). Una de las principales geoformas es el glaciar El Potro (Fig. 4), ubicado en el cerro homónimo, sobre los 5.880 m s.n.m. Otras geoformas glaciares han sido reconocidas de igual manera para esta región, tales como valles en “U”, valles colgados, circos, aristas, espolones truncados y lagos en rosario, así como morrenas frontales, terminales y de retroceso (Suvires, 2000). Los procesos periglaciares señalados por otros investigadores para esta región (Suvires, 2000; Perucca y Esper Angillieri, 2008; Perucca, 2016) corresponden a glaciares de roca o escombros, formas de solifluxión, detritos de faldeo y terrazas criogénicas, entre otras geoformas típicas de regiones sometidas a una intensa actividad criogénica. Los glaciares de escombros se ubican, preferentemente, en las laderas escarpadas orientadas hacia el sur, mientras que los valles poseen perfiles marcadamente asimétricos, con laderas cubiertas por detritos.

El valle de Iglesia-Calingasta corresponde a una unidad morfoestructural deprimida, ubicada entre la Cordillera Frontal y la Precordillera Occidental (Fig. 4). La cuenca del río Jáchal ocupa el sector norte de esta unidad, que corresponde al valle de Iglesia hasta el Alto de la Crucecita y que conforma la divisoria de

⁵ Diario de Cuyo. 2017. <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/Impresionante-tormenta-en-Rodeo-hubo-10-personas-evacuadas--20171201-0010.html>

⁶ Diario de Cuyo. 2018. <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/Iglesia-una-crecida-complica-la-comunicacion-de-dos-localidades-20180205-0014.html>

⁷ Diario de Cuyo. 2021. <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/El-temporal-de-3-dias-dano-al-menos-18-rutas-y-5-calles-en-toda-la-provincia-20210303-0076.html>

⁸ Diario de Cuyo. 2022. <https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/Temporal-en-San-Juan-algunas-rutas-están-cortadas-y-hay-badenes-cubiertos-por-el-agua-20220127-0019.html>

⁹ Diario Huarpe. 2022. <https://www.diariohuarpe.com/nota/alerta-por-crecientes-como-están-las-rutas-en-san-juan-202212710140.html>

¹⁰ Diario Móvil. 2023. <https://www.diariomovil.info/2023/03/16/san-juan-la-lluvia-arraso-con-un-tramo-de-la-ruta-40/>

¹¹ Radiounsj. 2023. <https://radio.unsj.edu.ar/cortes-de-luz-calles-anegadas-y-cultivos-destrozados-lo-que-dejo-la-tormenta-de-anoche/>

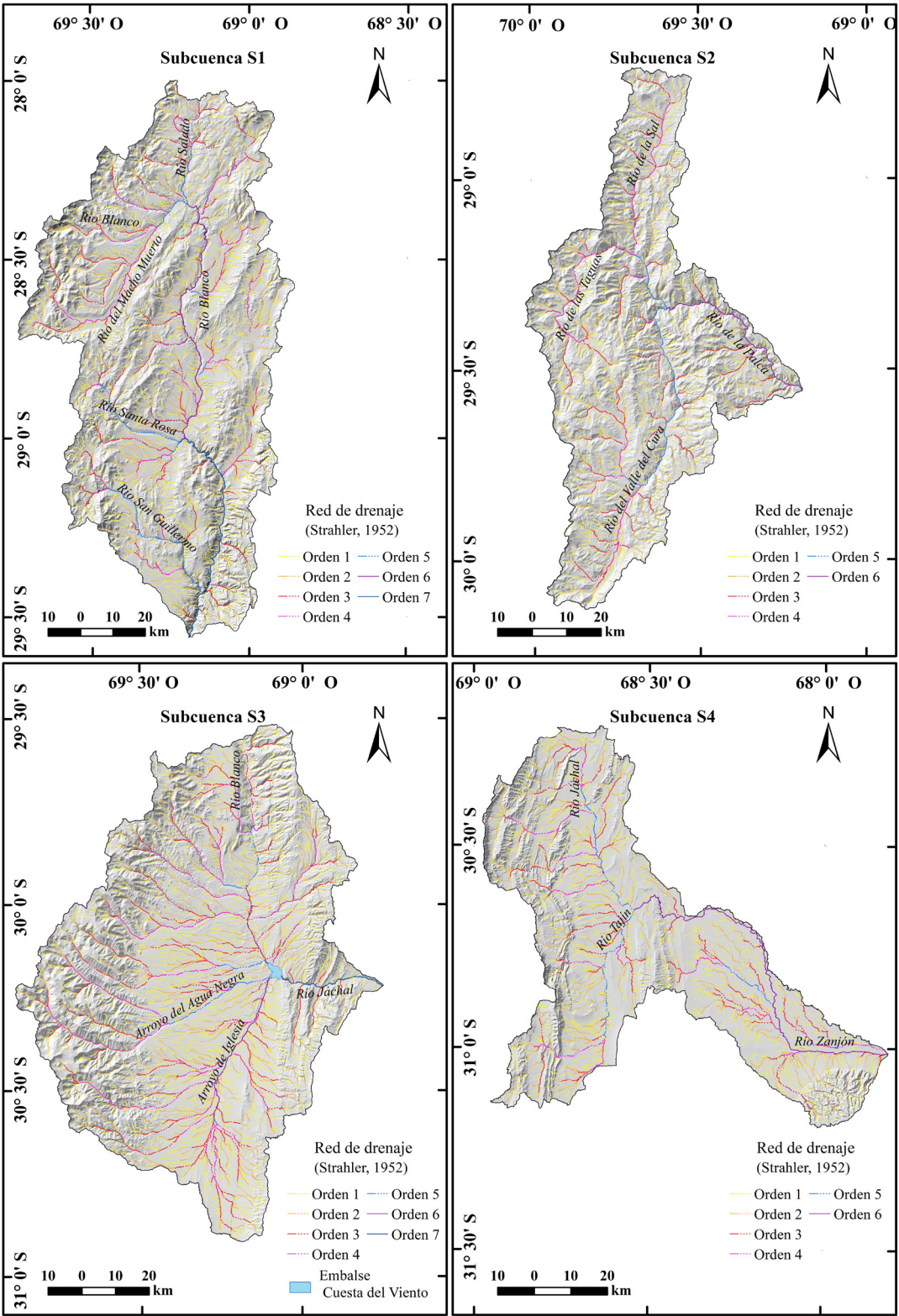


FIG. 5. Hidrografía de las subcuencas del río Jáchal. Se muestra la red de drenaje según Strahler (1952b) y sus ríos principales.

aguas con el valle de Calingasta hacia el sur (Perucca, 2016). Al continuar hacia el sureste de la cuenca del río Jáchal, en la periferia oriental de la subcuenca S3 y gran parte del área de la subcuenca S4, se destacan los cordones montañosos de la Precordillera (Fig. 4). En esta unidad morfoestructural predominan las geoformas vinculadas a los sistemas áridos y semiáridos con manifestaciones de aluviones, procesos eólicos, disgregación mecánica y depósitos de remoción en masa (Suvires, 2000).

La Precordillera, sobre la base de sus características litológicas y estructurales, se subdivide en Precordillera Occidental, Central y Oriental (Ortiz y Zambrano, 1981). Coincidentes en sus estilos estructurales, las dos primeras están asociadas con una faja plegada y corrida de piel fina y vergencia oriental (Ramos, 1999), mientras que la Precordillera Oriental se vincula con un bloque alzado de basamento limitado por fallas inversas, con vergencia occidental (Rolleri, 1969; Ramos, 1988, 1999). El estilo estructural de las Sierras Pampeanas, al igual que la Precordillera Oriental, está dado por bloques de basamento ígneo-metamórfico con cobertura sedimentaria, elevados mediante fallas inversas (Fauqué *et al.*, 2020). Este sistema en bloques, fallado y con vergencia al oeste, presenta actividad neotectónica en las fallas que afectan los piedemontes (Perucca y Vargas, 2014). En la Precordillera, los cursos fluviales que nacen ahí desarrollan una amplia bajada de piedemonte hacia el este (Perucca, 2016).

4. Metodología

4.1. Morfometría de cuencas y subcuencas

Para el análisis morfométrico y la delimitación de las cuencas y subcuencas, se emplearon modelos digitales de elevación (MDE) del tipo ALOS PALSAR (<https://asf.alaska.edu>) con una resolución espacial de 12,5 m obtenidos en el año 2008, así como imágenes satelitales a través de la plataforma Google Earth (<https://www.googleearth.com>). El análisis se efectuó mediante sistemas de información geográfica (SIG) con los *softwares* SAGA GIS 7.2 y ArcGIS 10.8, lo cual permitió obtener parámetros morfométricos básicos y derivados.

Las direcciones de flujo se calcularon usando el modelo de flujo de ocho direcciones (D8), introducido por O'Callaghan y Mark (1984) y refinado por Jenson y Domingue (1988). La aplicación de este modelo

permitió la delimitación automática de la cuenca del río Jáchal y de sus subcuencas, así como la obtención de las redes de drenaje. La determinación del orden de las subcuencas y la jerarquización de las redes de drenaje se basó en la metodología propuesta por Strahler (1952b) (Figs. 2 y 5). Para la delimitación del cauce principal, se consideraron criterios topográficos y de longitud propuestos por Senciales González (1999). Estos criterios son particularmente útiles en el presente estudio, debido a que el desnivel de una cuenca y la longitud de sus cauces tienen incidencia directa en el comportamiento hidrológico de la misma y, por tanto, en la propagación de crecidas (Moretto *et al.*, 2019).

Los parámetros morfométricos básicos calculados fueron los siguientes: área (A), perímetro (P), longitud (L), ancho (W), orden de la cuenca (On), orden de curso (O), altura máxima (H), altura mínima (h), longitud total de cauces (Ltc) y longitud del cauce principal (Lcp). Los parámetros L y Lcp fueron obtenidos según los criterios de Schumm (1956). A partir de estos parámetros morfométricos básicos se calcularon los parámetros morfométricos derivados (Tabla 1): factor de forma (Ff), razón de elongación (Re), índice de compacidad de Gravelius (Ic), densidad de drenaje (Dd), factor de asimetría (AF), índice de sinuosidad del cauce principal (Sc) e integral hipsométrica (IH).

Las curvas hipsométricas describen el porcentaje de área de una cuenca que existe por debajo o por encima de una cota determinada (Strahler, 1952a; Keller y Pinter, 1996), las mismas proveen información sobre la evolución de las cuencas de drenaje (Quezada *et al.*, 2010).

4.2. Inventario de aluviones y mapas temáticos

El inventario de aluviones se realizó mediante la identificación manual de los mismos a partir de imágenes satelitales en la plataforma Google Earth. Para cada depósito aluvional identificado se seleccionó un punto ubicado en su centro, mientras para los depósitos afectados por acción fluvial y/o antrópica igualmente se seleccionaron puntos en ellos a modo de obtener un inventario completo (Fig. 6). Por lo tanto, el inventario solo toma en cuenta un punto de una parte del depósito. Se optó esta metodología principalmente por el carácter regional del estudio. De esta manera se identificaron 4.175 depósitos aluviales (Fig. 6).

TABLA 1. FÓRMULAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DERIVADOS.

Variable	Fórmula	Referencias
Factor de forma	$Ff = \frac{A}{L^2}$	Schumm (1956)
Razón de elongación	$Re = 1,129 \frac{\sqrt{A}}{L}$	Schumm (1956)
Índice de compacidad de Gravelius	$Ic = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Gravelius (1914)
Densidad de drenaje	$Dd = \frac{Ltc}{A}$	Strahler (1952b)
Factor de asimetría	$AF = 100 \left(\frac{Ar}{At} \right)$	Keller y Pinter (2002)
Índice de sinuosidad del cauce principal	$Sc = \frac{Lcp}{L}$	Schumm (1963)
Integral hipsométrica	$IH = \frac{Hmedia - Hmínima}{Hmáxima - Hmínima}$	Cuéllar-Cárdenas et al. (2014)

Ar es el área correspondiente a la margen derecha del río principal en dirección aguas abajo y At el área total de la cuenca.

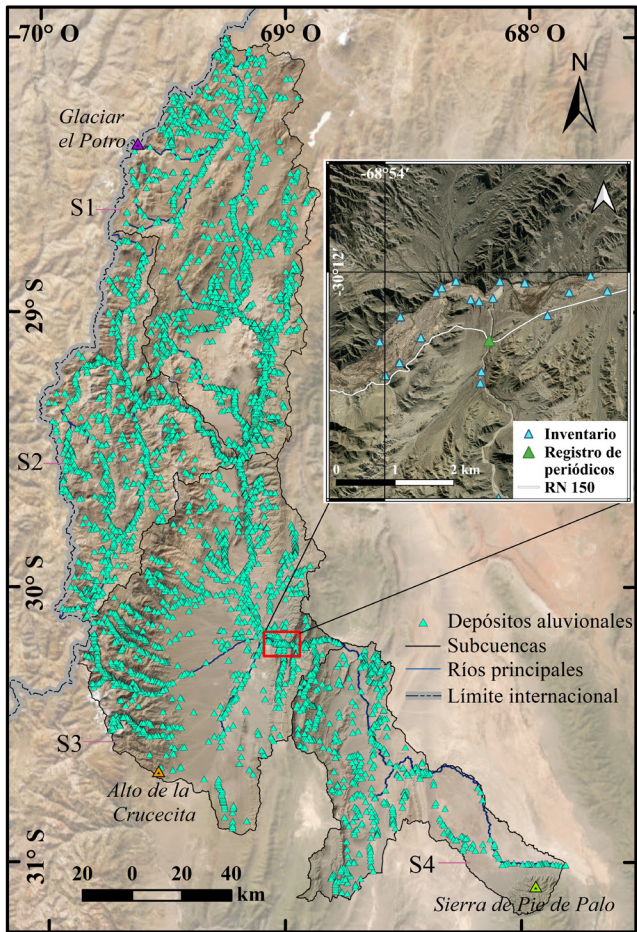


FIG. 6. Mapa inventario de depósitos de aluviones para la cuenca del río Jáchal. En detalle depósitos y evento aluvional registrado por periódicos locales, ubicados en la subcuenca S3, sobre la ruta nacional 150 que une las localidades de Rodeo y Jáchal.

TABLA 2. FÓRMULAS UTILIZADAS PARA EL CÁLCULO DE PARÁMETROS DERIVADOS DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.

Parámetro	Fórmula
Elevación	-
Pendiente	$\text{Tan}^{-1}[p^2 + q^2]^{1/2}$
Orientación de la ladera	$180 - \text{Tan}^{-1} \left[\left(\frac{H}{G} \right) + 90 \left(\frac{G}{ G } \right) \right]$
Curvatura de la ladera (Zevenbergen y Thorne, 1987)	$-2(D+E)$
Índice de convergencia (Olaya y Conrad, 2009)	$CI = \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \theta_i \right) - 90$ θ_i : ángulo entre la dirección del vector que une el centro de la celda i y el centro de la ventana
Índice de posición topográfica (Guisan <i>et al.</i> , 1999)	$TPI = \text{Elevación media} - \text{Elevación mínima} / \text{Elevación máxima} - \text{Elevación mínima}$
Índice de rugosidad del terreno (Riley <i>et al.</i> , 1999)	$TRI = \sum [(X_{ij} - X_{00})^2]^{1/2}$ X_{ij} : elevación de las celdas vecinas a la celda central (X_{00})
Índice topográfico de humedad (Moore <i>et al.</i> , 1991)	$TWI = \ln \frac{As_i}{\text{Tan } \beta_i}$ As_i : área de acumulación de flujo en la celda i β_i : pendiente local en la celda i

Donde:

$p = [(Z_1 + 2Z_4 + Z_7) - (Z_3 + 2Z_6 + Z_9)]$

$q = [(Z_7 + 2Z_8 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_2 + Z_3)]$

$D = \frac{\delta^2 z}{2\delta x^2} = \frac{\left[\frac{z_4 + z_6}{2} - z_5 \right]}{L^2}$

$E = \frac{\delta^2 z}{\delta y^2} = \frac{\left[\frac{z_2 + z_8}{2} - z_5 \right]}{L^2}$

$F = \frac{\delta^2 z}{\delta x \delta y} = \frac{(-z_1 + z_3 + z_7 - z_9)}{4L^2}$

$G = \frac{\delta_z}{\delta_x} = (-z_4 + z_6) / 2L$

$H = \frac{\delta_z}{\delta_y} = (z_2 - z_8) / 2L$

Z_{1-9} corresponden a las elevaciones a un vecindario de 3x3 en torno a la celda central de elevación Z_5

D, E, F, G y H son derivadas parciales de la superficie $Z = Z(x,y)$

L corresponde a la distancia entre el centro de dos celdas o tamaño de la celda. Tiene las mismas unidades de los valores de Z, por lo que es equivalente a la resolución del MDE.

Se calcularon las variables topográficas consideradas de importancia para estudiar la ocurrencia de aluviones (Sarkadi *et al.*, 2022; Shikhteymour *et al.*, 2023), mediante los algoritmos de SAGA GIS (Conrad *et al.*, 2015) y ArcGis10.8 aplicados al modelo de elevación digital (MDE). Las variables calculadas correspondieron a las siguientes: elevación, pendiente, orientación y curvatura de laderas (Zevenbergen y Thorne, 1987), índice de convergencia (CI; Olaya y Conrad, 2009), índice de posición topográfica (TPI; Guisan *et al.*, 1999), índice de rugosidad del terreno (TRI; Riley *et al.*, 1999) e índice topográfico de humedad (TWI; Moore *et al.*, 1991).

5. Resultados

5.1. Parámetros morfométricos

Los parámetros morfométricos básicos y derivados obtenidos para cada una de estas cuatro subcuencas se muestran en la tabla 3 y son especificados a continuación:

Según los valores obtenidos del factor de forma (Ff), y tomando como base la clasificación de Pérez (1979), S1 corresponde a una subcuenca ligeramente alargada, S2 a una subcuenca ensanchada, S3 a una subcuenca muy ensanchada y S4 no clasifica ni como alargada ni ensanchada. Sin embargo, atendiendo a la razón de elongación (Re), las subcuencas S1, S2 y S4 presentan formas alargadas, mientras que la subcuenca S3 se considera circular/ensanchada.

De acuerdo con las características morfométricas relacionadas con el índice de compacidad (Ic), la forma de las subcuencas S1 y S3 son oval-oblongas a rectangular-oblongas (Campos Aranda, 1992); mientras que las subcuencas S2 y S4 se consideran muy elongadas dados sus valores de Ic mayores que 2. Con respecto al factor de asimetría (AF), se observa que todas las subcuencas presentan una asimetría bien marcada en términos generales, las subcuencas S2 y S3 son las más asimétricas puesto que sus valores de AF se alejan de 50% (Hare y Gardner, 1985; Keller y Pinter, 2002; Ma *et al.*, 2019). Todas las subcuencas presentan valores bajos

TABLA 3. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS BÁSICOS Y DERIVADOS DE LAS CUATRO SUBCUENCAS IDENTIFICADAS EN LA CUENCA DEL RÍO JÁCHAL.

Subcuenca	S1	S2	S3	S4
Área (km²)	9.065,21	5.576,76	9.372,19	4.977,13
Perímetro (km)	640,17	602,54	577,20	576,05
Largo (km)	166,39	95,04	96,47	109,61
Ancho (km)	54,48	58,67	97,15	45,40
H (m)	6.449	6.182	6.292	3.664
h (m)	2.211	2.211	1.218	650
Δh (m)	4.238	3.971	5.074	3.014
On	7	6	7	6
Lcp (km)	238,69	189,20	150,85	226,46
Ltc (km)	6.282,57	3.396,10	7.624,24	3.972,34
Ff	0,33	0,62	1,01	0,41
Re	0,65	0,89	1,13	0,73
AF (%)	63,26	26,32	79,96	40,96
Dd (1/km)	0,69	0,61	0,81	0,8
Ic	1,9	2,28	1,68	2,3
Sc	1,44	1,99	1,56	2,07
IH	0,42	0,52	0,35	0,19

H: altura máxima; **h:** altura mínima; **Δh:** desnivel; **On:** orden de la cuenca; **Lcp:** longitud del cauce principal; **Ltc:** longitud total de cauces; **Ff:** factor de forma; **Re:** razón de elongación; **AF:** factor de asimetría; **Dd:** densidad de drenaje; **Ic:** índice de compacidad de Gravelius; **Sc:** índice de sinuosidad del cauce principal, e **IH:** integral hipsométrica.

de densidad de drenaje (D_d), considerando que son menores que $2/\text{km}$. Según el índice de sinuosidad (Sc), la forma del canal principal de la subcuenca S1 corresponde a un cauce transicional (sinuoso), el de las subcuencas S2 y S4 es irregular (entrelazado), mientras que el cauce de la S3 es regular, es decir, meandriforme.

Para las subcuencas S1 y S2, el valor de la integral hipsométrica (IH) indica que los procesos tectónicos y erosivos están balanceados. Atendiendo a la forma de la curva hipsométrica (Fig. 7), se sugiere un gran potencial erosivo en estas subcuencas, lo que indica estadios juveniles con un predominio de procesos de levantamiento tectónico en las cabeceras ubicadas en el cordón montañoso de Cordillera Frontal. Esto se traduce en la mayor densidad de procesos aluvionales generados y depositados en estas áreas, algo que también se observa al analizar los valores del factor de asimetría (AF). La curva hipsométrica de la subcuenca S3 (Fig. 7) denota un mayor grado de evolución del relieve y un menor porcentaje de preservación del relieve original, donde el valor de la IH (0,35) indica un predominio de procesos erosivos sobre los procesos tectónicos. El valor de la IH (0,19) para la subcuenca S4 está asociado a una curva cóncava (Fig. 7), lo que indica una subcuenca altamente erosionada (e.g., Giaconia *et al.*, 2012).

5.2. Variables del terreno y distribución de depósitos aluvionales

La cuenca del río Jáchal presenta una elevación máxima de 6.449 m s.n.m. y una elevación mínima de

650 m s.n.m. La elevación máxima se encuentra en la subcuenca S1 y la mínima en la subcuenca S4 (Fig. 8). La mayor concentración de depósitos aluvionales (3.072, ~73,5% del total) se distribuye entre los 2.389 y los 4.544 m s.n.m. (Fig. 8). Estos se encuentran en su mayoría asociados a pies de laderas.

Respecto a las pendientes de la cuenca, los valores máximos están concentrados sobre las unidades morfoestructurales Cordillera y Precordillera (Fig. 9). Al noroeste de la cuenca, en la zona cordillerana dentro de las subcuencas S1 y S2, las pendientes superan los 30° , lo que corresponde a un relieve fuertemente accidentado a escarpado. En el segmento del río Blanco, comprendido entre las confluencias con los ríos Santa Rosa y San Guillermo (ver subcuenca S1 en Fig. 5 para ubicación), las pendientes son frecuentemente superiores a 35° . En las laderas del río de la Palca (ver subcuenca S2 en Fig. 5 para ubicación), de orientación noroeste-sureste, los valores de las pendientes superan los 40° . En la subcuenca S3, se observan dos zonas, una en el extremo occidental y otra en el extremo oriental, donde predominan pendientes superiores a 30° . En la zona central de la misma subcuenca, las pendientes son menores que 10° . En el extremo sureste de la cuenca del río Jáchal (subcuenca S4), se distinguen zonas que presentan pendientes superiores a 13° , con predominio de valores mayores que 30° , coincidentes con las sierras más elevadas (Figs. 8 y 9). Para toda la cuenca del río Jáchal, la mayor concentración de depósitos aluvionales se observan en sectores con pendientes de hasta 15° , de los cuales 3.229 depósitos (~77,3% del total) se encuentran en sectores con pendientes de 0 a 10° (Fig. 9).

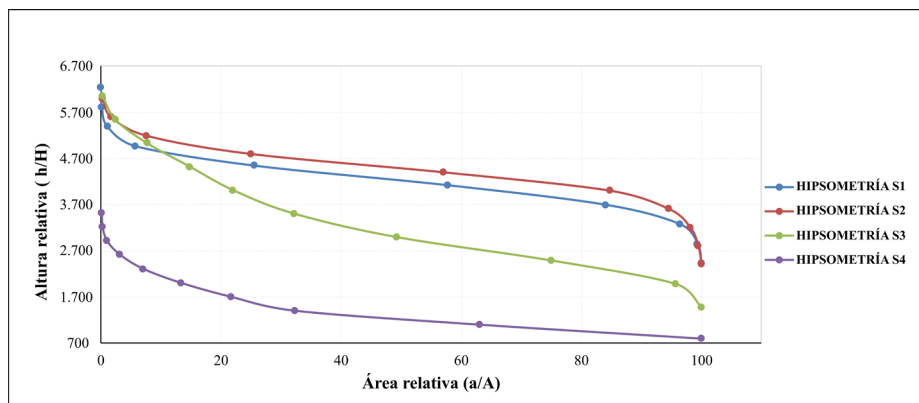


FIG. 7. Curvas hipsométricas de las subcuencas S1, S2, S3 y S4. H : altura total de la subcuenca (m). h : altura relacionada con la superficie a (m). A : área total de la subcuenca (km^2). a : área de la superficie dentro de la subcuenca por encima de una altura (h) dada (km^2).

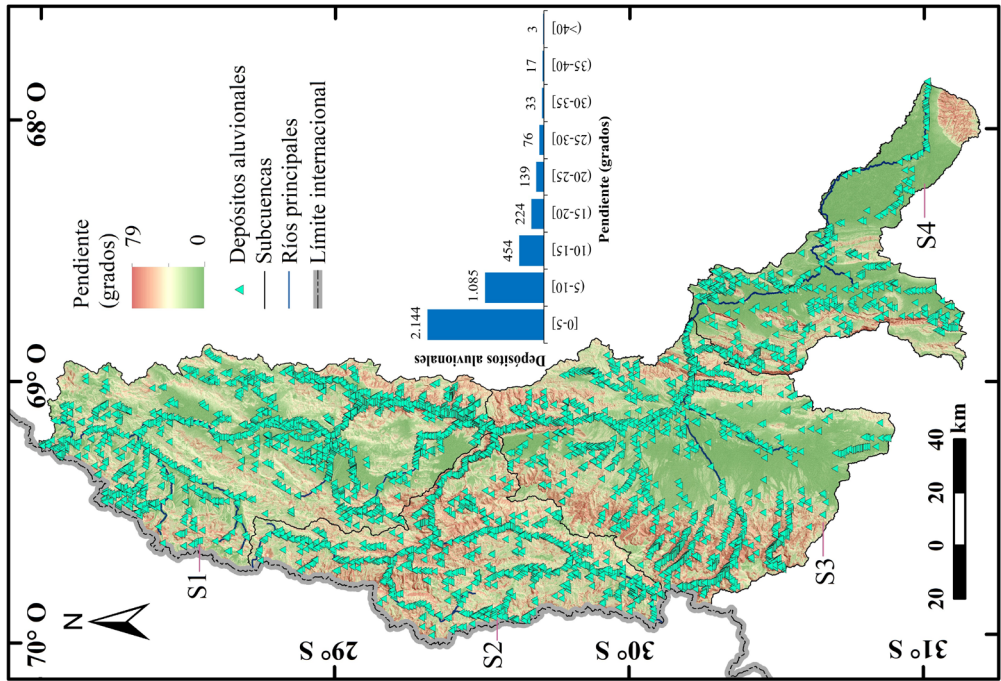


FIG. 9. Mapa de pendientes de la cuenca del río Jáchal, junto al inventario y distribución de depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes pendientes.

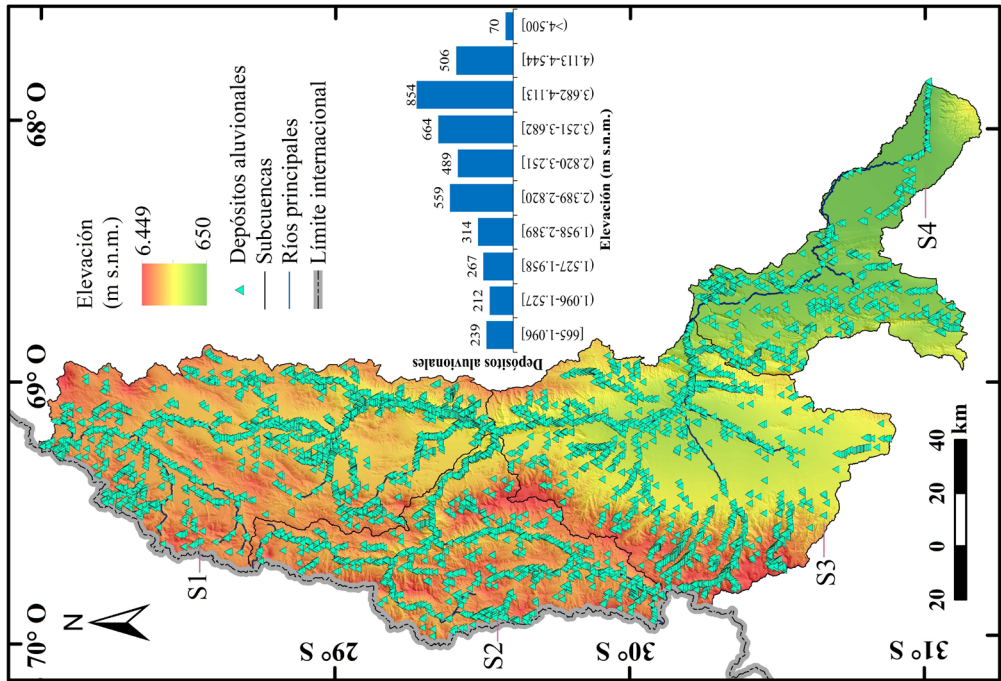


FIG. 8. Elevación (en m s.n.m.) de la cuenca del río Jáchal, junto al inventario y distribución de depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes elevaciones.

Desde el punto de vista hidrográfico, la orientación de laderas indica la dirección del flujo de agua en la zona. Localmente, la orientación predominante coincide con las bajadas pedemontanas de los frentes montañosos, la cual es más pronunciada en las laderas del sector oriental. Los depósitos de aluviones tienen una distribución prácticamente uniforme con respecto a la orientación de laderas, aunque se observa una relativa mayor frecuencia de depósitos en laderas orientadas hacia el este (Fig. 10). También, en las laderas del sector oriental se reconocen las mayores pendientes (Fig. 9), lo que favorece el movimiento de material (Junquera-Torrado *et al.*, 2019). Soria *et al.* (2013), en particular, indican que los estratos sedimentarios ubicados al este de la Precordillera presentan mayor exposición a la

erosión hídrica y eólica, lo cual facilita el aporte de material y desplazamiento de este.

El valor de la curvatura de laderas se puede utilizar para detectar patrones de erosión del suelo (Moore *et al.*, 1991). La cuenca presenta valores de curvatura máximos de 22 (condiciones de erosión en áreas convexas) y mínimos de -22 (condiciones de depositación y convergencia del flujo en áreas cóncavas). Valores bajos de curvatura (-7 a -2) sugieren que en zonas de cauces hay un predominio de áreas convergentes y zonas de depositación, lo cual coincide también con una disminución de pendiente. En tanto, en zonas de elevada pendiente, como por ejemplo en laderas y lechos de ríos montañosos, se observan valores de curvatura interpretados como correspondientes a áreas de aceleración de flujos, donde predominan procesos erosivos (Fig. 11).

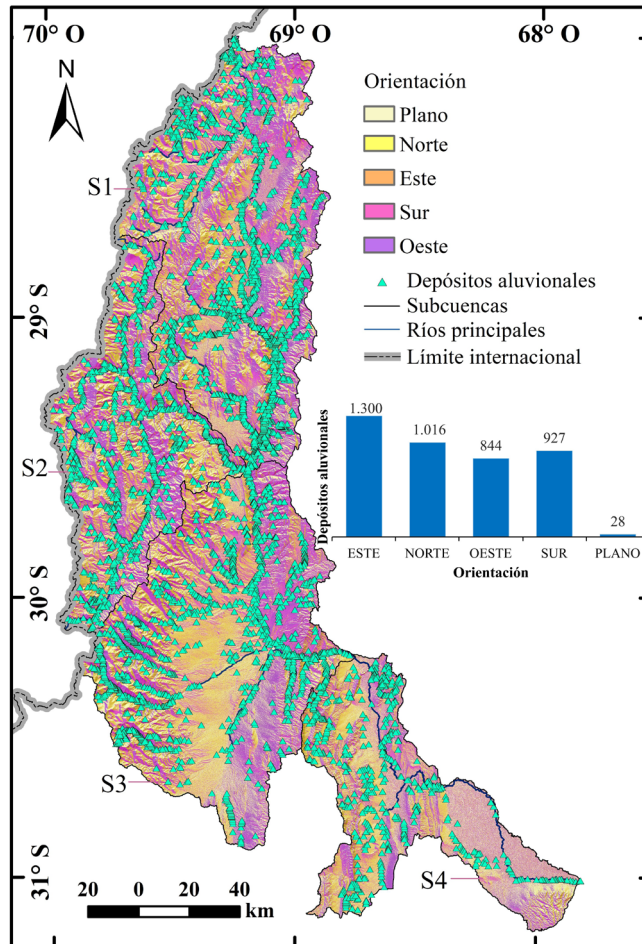


FIG. 10. Mapa de orientaciones de laderas de la cuenca del río Jáchal (definida para cuatro direcciones), junto al inventario y distribución de los depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes orientaciones de laderas.

Escarpes y divisorias de aguas muestran valores de curvatura positivos, lo cual indica divergencia de flujo. Valores de curvatura cercanos a cero corresponden a morfologías relativamente planas e infraestructuras del tipo dique. Para la gran mayoría de los depósitos aluviales identificados en la cuenca del río Jáchal (4.052, ~97% del total), la curvatura se concentra en valores entre -2 y 1 (Fig. 11), lo cual indica un predominio de depósitos en zonas planas y/o convergentes.

Con respecto al índice de posición topográfica (TPI), los valores positivos se manifiestan en zonas de crestas, picos de montañas y sierras (Fig. 12). Los valores negativos coinciden con zonas de quebradas y sobre los cursos de ríos. Zonas de pampas

o llanos, márgenes de ríos y zonas de media ladera o bajada pedemontana presentan valores cercanos a 0. La mayoría de los depósitos aluviales en la cuenca del río Jáchal (3.751, ~90% del total) poseen valores de TPI entre -8 y 2 (Fig. 12).

Los valores máximos del índice de rugosidad del terreno (TRI; Fig. 13) coinciden con los cordones montañosos, sierras y escarpas, los cuales se asocian a pendientes muy elevadas y por ende a zonas más propensas a la generación de aluviones. Una vez generados, estos aluviones discurren con un gran potencial erosivo, y se depositan en zonas con rugosidades bajas. El predominio de depósitos aluviales se da en terrenos con muy baja rugosidad, mayormente con valores de TRI entre 0 y 3 (Fig. 13).

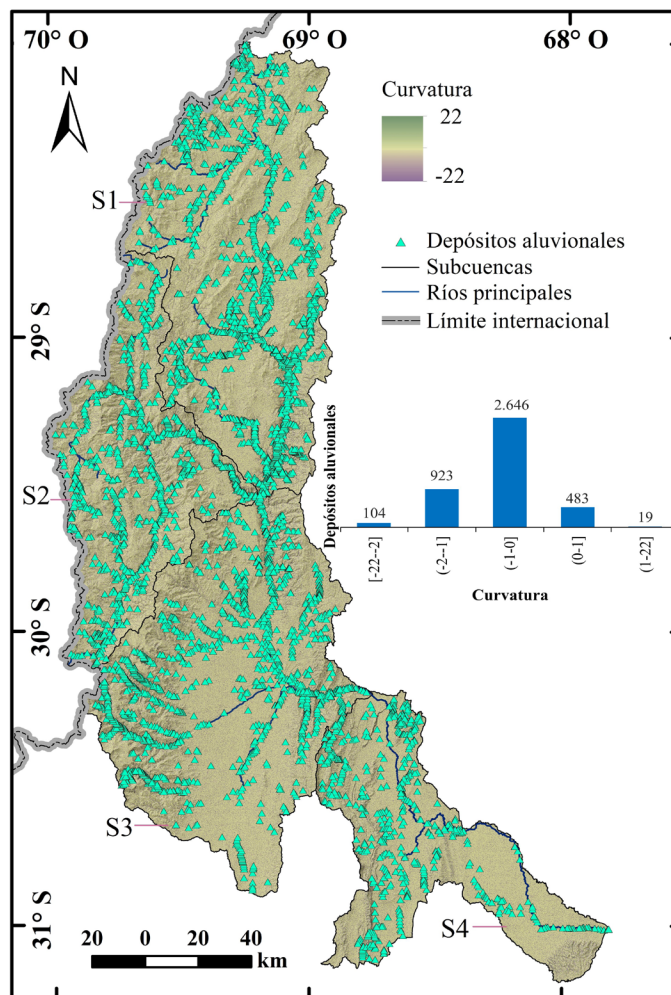


FIG. 11. Mapa de curvaturas de la cuenca del río Jáchal (adimensional), junto con el inventario de depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes curvaturas.

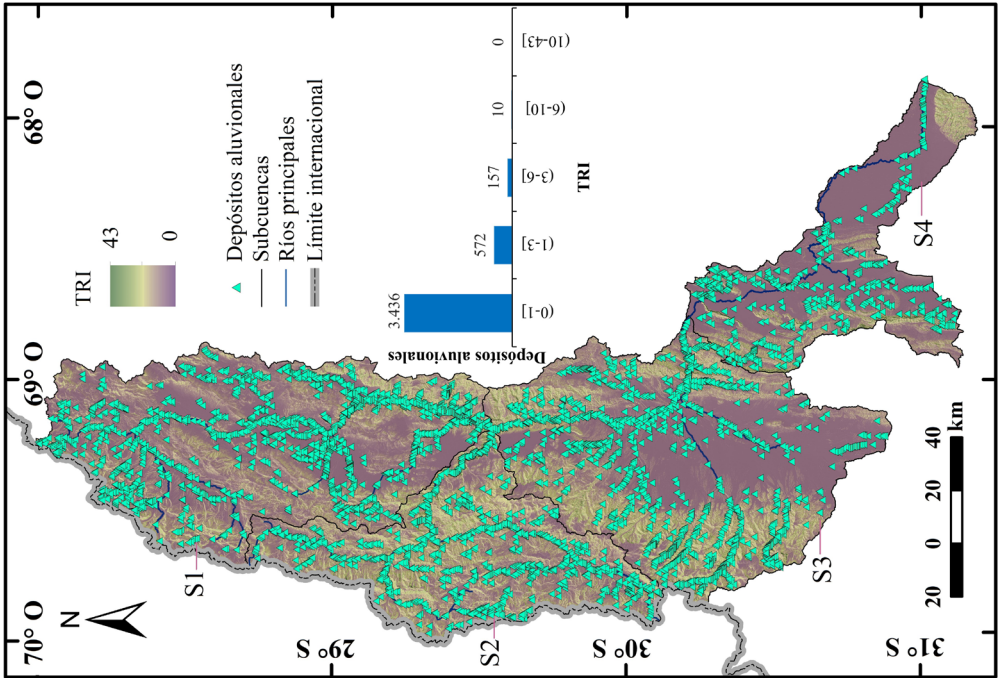


FIG. 13. Mapa del índice de rugosidad del terreno (TRI) de la cuenca del río Jáchal (adimensional), junto con el inventario de depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes TRI.

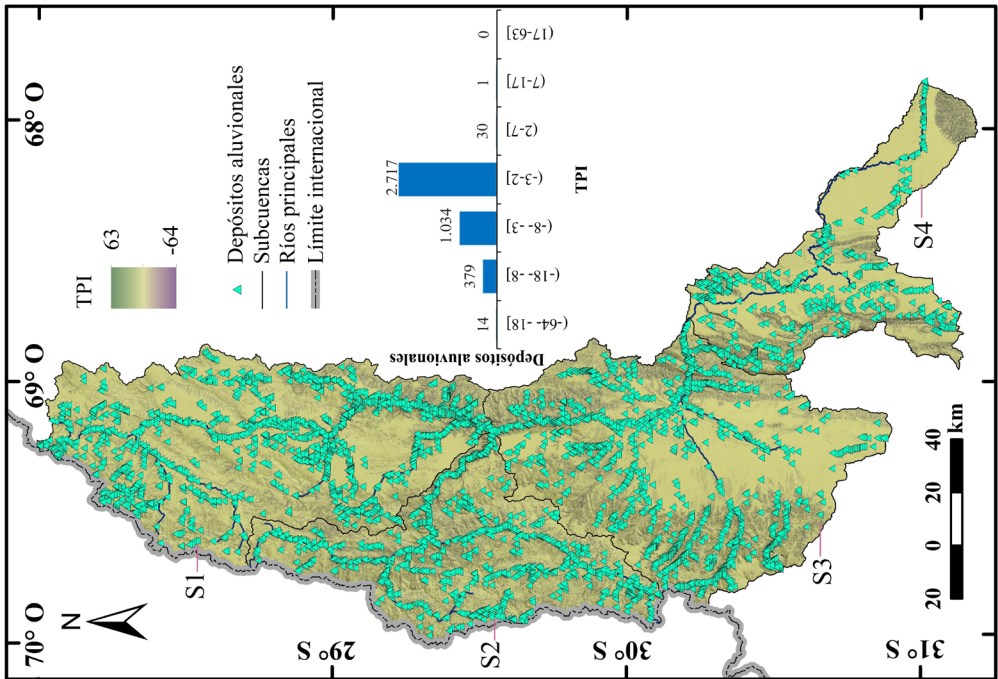


FIG. 12. Mapa del índice de posición topográfica (TPI) de la cuenca del río Jáchal (adimensional), junto con el inventario de depósitos aluviales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes TPI.

El Índice Topográfico de Humedad (TWI) está relacionado con la cantidad de agua disponible en el suelo. Valores elevados de TWI se observan en los principales cursos fluviales (TWI superiores a 9; Fig. 14). Cabe destacar la observación de que algunas laderas orientadas al sudeste presentan valores de TWI superiores a 7, las que también tienen zonas propicias al desencadenamiento de aluviones. Sus respectivos depósitos aluvionales, de acuerdo con el inventario, se observan a los pies de laderas donde sus valores de TWI son relativamente bajos (Fig. 14).

6. Discusión

Del análisis morfométrico de la cuenca del río Jáchal, se desprende que el carácter torrencial de las subcuencas se ve mayormente favorecido en las cabeceras de las mismas producto de los relieves escarpados en dichos sectores (Figs. 8, 9). A menor escala, en cauces cuyas laderas escarpadas presentan diferencias amplias de pendientes, el inventario de depósitos aluvionales pone en evidencia que estos sectores son los más propensos a ser afectados (Fig. 6).

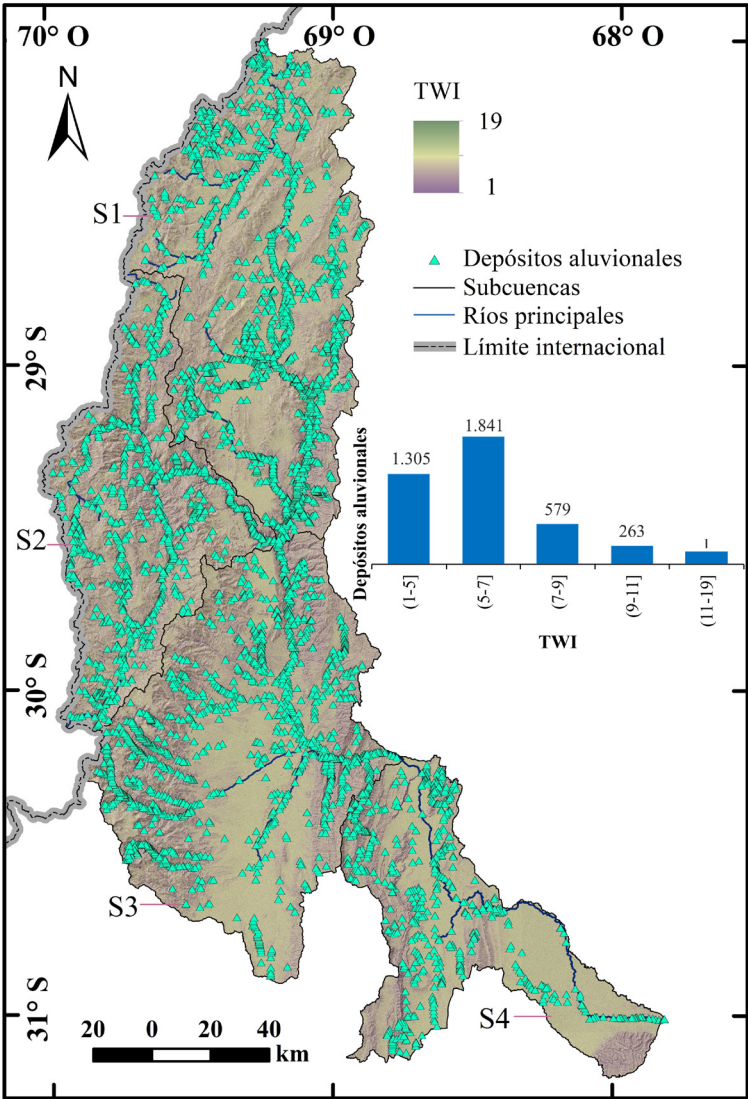


FIG. 14. Mapa del índice topográfico de humedad (TWI) de la cuenca del río Jáchal (adimensional), junto con el inventario de depósitos aluvionales identificados en el presente trabajo. Estos últimos están provistos en el mapa y mediante histograma de frecuencias para diferentes TWI.

Esto concuerda con las propuestas de Perucca y Esper Angillieri (2011), Ginesta Torcivia y Ríos (2020) y Ginesta Torcivia (2022) para la zona de estudio, quienes definen cuencas alargadas con alto potencial de generación de aluviones. Sin embargo, al ser este un estudio regional, los resultados no se condicen con lo observado a escalas más locales, ya que diversos autores como Ocaña y Flores (2017) y Ginesta Torcivia (2022) caracterizan cuencas y subcuencas de forma circular, con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa, lo que forma fácilmente grandes crecidas en las salidas de ellas.

El índice de compacidad (I_c) sugiere que las zona más propensas a sufrir eventos aluvionales serían aquellas aledañas al río Blanco y el embalse Cuesta del Viento, debido al gran desnivel de las laderas. Esper Angillieri (2011 y 2014) concuerdan con lo anteriormente mencionado, en cuencas que drenan hacia los ríos Blanco, Colanguil y El Carrizal (zona central de la subcuenca S3), y sugieren que cuencas alargadas de escarpado relieve tienen una alta susceptibilidad de aluviones.

Las curvas e integrales hipsométricas calculadas en este estudio sugieren una evolución del paisaje de oeste a este, desde estadios juveniles a maduros. Los primeros, con predominio de procesos de levantamiento en las cabeceras, lo que implica un gran potencial erosivo al presentar pendientes elevadas tanto en las cabeceras como en las desembocaduras de las cuencas (subcuencas S1 y S2; Tabla 3). Más al este, se observan cuencas con un mayor grado de evolución del relieve y menor porcentaje de preservación del relieve original, donde existe un predominio de procesos erosivos sobre procesos tectónicos (subcuenca S3; Tabla 3). Esta evolución culmina con una cuenca (subcuenca S4; Tabla 3) con un alto nivel de erosión (Strahler, 1952a) y bajo intervalo de elevación, donde los procesos de sedimentación se concentran en zonas cercanas a su desembocadura. En contraposición, Tejada *et al.* (2018), Ocaña *et al.* (2020) y Ginesta Torcivia *et al.* (2022) obtuvieron valores de hipsometría relativamente mayores que los obtenidos en este estudio, lo cual sugiere una mayor participación de la variable tectónica en la región, principalmente asociada a fallas locales cuaternarias. Con respecto a este punto, cabe destacar que las inflexiones en las formas de las curvas hipsométricas (Fig. 7) están asociadas a un levantamiento y/o rejuvenecimiento del paisaje. Esto puede estar reflejando la actividad neotectónica en la provincia de San Juan.

En regiones montañosas compuestas por diferentes unidades morfoestructurales, es esperable que los depósitos aluvionales estén distribuidos en una amplia gama de elevaciones (Fig. 8). Sin embargo, en la cuenca del río Jáchal la mayor concentración de depósitos aluvionales se da en elevaciones que superan los 2.400 m s.n.m. Esta observación coincide con lo reportado por Espósito *et al.* (2023) en la Cordillera Principal, donde observaron depósitos aluvionales entre los 2.200 y los 3.200 m s.n.m.

Quiroga *et al.* (2014) establecieron que pendientes elevadas favorecen el escurrimiento de las precipitaciones por sobre la superficie, y disminuyen la posibilidad de infiltración y permanencia en el sistema por mucho tiempo. En la zona de laderas, al margen de los ríos principales y en la cordillera, los altos valores de pendiente podrían servir como zonas de alimentación de material para posibles aluviones, los que una vez gatillados podrían discurrir y erosionar el sustrato hasta depositarse en terrenos con pendientes menos pronunciadas (*e.g.*, Abu El-Magd, 2022). Esto se observa en el presente trabajo, dado que en las zonas de relativa baja pendiente se encuentran emplazados más del 86% de los depósitos aluvionales inventariados (Fig. 9). Esto concuerda también con estudios a nivel local realizados por Esper Angillieri (2008, 2011, 2014, 2020), quien indica que la mayoría de los depósitos aluvionales en la región se encuentran en zonas con pendientes inferiores a 20°.

Ginesta Torcivia *et al.* (2021), para el tramo precordillerano de la ruta nacional 150 (tramo Cuesta del Viento-Pachimoco), así como Pittaluga y Suvires (2010) en el valle de Iglesia-Calingasta (sur de la cuenca del río Jáchal), indican que la ocurrencia de eventos aluvionales gatillados por eventos climáticos está determinada principalmente por las fuertes pendientes y la alta torrencialidad. Ambos estudios reconocen, además, las consecuencias de los aluviones en los sectores caracterizados por un relieve suavizado y muy baja pendiente. Los resultados obtenidos en este estudio indican un predominio de distribución de los depósitos aluvionales en terrenos con pendientes de hasta 10°. Los depósitos afectan mayormente a zonas aledañas a la confluencia de los ríos tributarios con los ríos principales (Figs. 5, 9).

En la zona de estudio, los procesos aluvionales afectan el pie de laderas montañosas, principalmente ubicadas hacia el este y sureste. Si bien esta tendencia puede deberse a la configuración morfoestructural regional (Junquera-Torrado *et al.*, 2019), puede

también tener un componente espacial de variación climática. Por ejemplo, Páez *et al.* (2013) observan diferencias en el clima de la región en la dirección norte-sur para los cordones y en la dirección noreste-sudeste para las quebradas o los valles secundarios de la cuenca del río Blanco.

En cuanto a los factores condicionantes de curvatura de laderas y el índice de posición topográfica (TPI), estos permiten interpretar que la mayoría de los depósitos aluvionales están emplazados en zonas de media ladera, bajada pedemontana y zonas de llanos colindantes a los márgenes de ríos o pampas. Gisbert y Martí (2010)¹² mencionan que el índice de rugosidad (TRI) es un parámetro que funciona como un indicador de la morfología del terreno a pequeña escala, sin necesidad de estar relacionado con la altitud. De esta forma, permite diferenciar las zonas altas en planicies de las zonas de baja altitud, pero montañosas, ya que no necesariamente los terrenos más elevados tienen que coincidir con los más rugosos. En este estudio, el parámetro TRI define tres zonas con base en su complejidad (Fig. 13). De ellas, se destaca la zona oeste de la Cordillera Frontal, coincidente con circos glaciales, y los tramos de los ríos principales de la Palca y Blanco. Los valores máximos del índice TRI en esta zona se encuentran en cordones montañosos, sierras y relieves escarpados, asociados a pendientes muy elevadas. Esto permite reconocer zonas más propensas a la generación de aluviones, los que una vez desencadenados discurren con un gran potencial erosivo, y depositan su carga de sedimentos en zonas con rugosidades bajas, las que también presentan bajos valores de índices TPI.

Ginesta Torcivia *et al.* (2021) y Soto *et al.* (2022) sugieren que sectores con altos valores de índices topográficos de humedad (TWI) serían áreas con alto potencial de escurrimiento, por ende, asociadas a una mayor ocurrencia de futuros aluviones. En el caso de la cuenca del río Jáchal, los depósitos aluvionales presentan en su mayoría un bajo contenido de humedad. Esto sugiere que el índice TWI es significativamente menos condicionante respecto a los demás factores analizados.

7. Conclusiones

Este estudio presenta el primer análisis morfométrico de la cuenca del río Jáchal, ubicada en las provincias de San Juan y La Rioja, Argentina, con el objetivo de determinar zonas propensas a la

ocurrencia de aluviones. Las variables analizadas exponen el comportamiento hídrico y dinámico de la cuenca, y reflejan las características y ocurrencia de eventos aluvionales ante sucesos climáticos extremos, evidenciado por los antecedentes históricos y el inventario de depósitos aluvionales recopilados en este trabajo.

Del estudio de la morfometría y los parámetros de forma se deduce el carácter torrencial de la cuenca del río Jáchal, en el que la rapidez en la concentración de las aguas provistas mediante lluvias se ve favorecida especialmente por las pendientes. Esta dinámica, sin embargo, está matizada por el tamaño de la cuenca (~29.000 km²), ya que es poco probable que un solo evento pluviométrico afecte a la totalidad de la superficie de esta. Por tanto, es posible inferir que, en las zonas de confluencia, los tributarios muestran mayor vigorosidad en sus crecidas que el colector principal, lo que propicia de esta manera la generación de aluviones.

Los factores condicionantes del terreno, con excepción del índice topográfico de humedad, intervienen e influyen en la ocurrencia de los procesos aluvionales sobre la cuenca del río Jáchal. Al analizar estos parámetros en conjunto con el inventario de depósitos aluvionales, se observa una marcada tendencia de ocurrencia de estos depósitos en terrenos de baja altitud, poco complejos, con pendientes de hasta 15°, mayormente orientados al este, ubicados en zonas de media ladera y bajada pedemontana. Estos terrenos se encuentran sobre los márgenes de los ríos principales: Blanco, la Palca y Jáchal; y sobre ríos secundarios que drenan hacia el embalse Cuesta del Viento.

El presente trabajo aporta el primer y único inventario de depósitos aluvionales a nivel regional sobre la cuenca del río Jáchal. Este inventario evidencia el efecto de estos eventos sobre rutas e infraestructura crítica, comprometiendo directa e indirectamente las actividades de desarrollo humano, tanto agrícolas y mineras como las comunicaciones entre localidades. Se sugiere a futuro complementar este estudio con la generación de mapas de susceptibilidad y/o peligrosidad a la ocurrencia de aluviones.

Agradecimientos

Se agradece al Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biosfera (CIGEOBIO-CONICET-UNSJ) por la licencia de Arcgis 10.8. También, los comentarios y sugerencias de tres revisores anónimos, los que han contribuido a una mejoría fundamental del trabajo.

¹² Gisbert, F.J.G.; Martí, I.C. 2010. Rugosidad del terreno: Una característica del paisaje poco estudiada. Documentos de trabajo 10: 30 p. Fundación BBVA.

Referencias

- Abu El-Magd, S.A. 2022. Random forest and naïve Bayes approaches as tools for flash flood hazard susceptibility prediction, South Ras El-Zait, Gulf of Suez Coast, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences* 15 (3): 1-12.
- Ahmadalipour, A.; Moradkhani, H. 2019. A data-driven analysis of flash flood hazard, fatalities, and damages over the CONUS during 1996-2017. *Journal of Hydrology* 578: 124106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124106>
- Aristizábal, E.; Vásquez, M.; Ruiz, D. 2019. Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *Tecnológicas* 22 (46): 43-64.
- Bereciartua, P.J.; Antúnez, N.; Manzelli, L.; López, P.; Callau Poduje, A.C. 2009. Estudio Integral de La Cuenca del río Desaguadero-Salado-Chadileuvú-Curacó. Tomo II. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería: 158 p.
- Botelho, R.G.M.; Silva, A.D. 2004. Bacia hidrográfica e qualidade ambiental. Reflexões sobre a geografia física no Brasil. *Bertrand Brasil*: 153-192. Río de Janeiro.
- Campos Aranda, D. 1992. Procesos del ciclo hidrológico. Capítulo 2 Geomorfología de la Cuenca. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1ra. Reimpresión: 1-30 p.
- Cohen, A.; Davidson, S. 2011. The watershed approach: Challenges, antecedents, and the transition from technical tool to governance unit. *Water Alternatives* 4 (1): 1-14.
- Conrad, O.; Bechtel, B.; Bock, M.; Dietrich, H.; Fischer, E.; Gerlitz, L.; Böhrner, J. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8 (7): 1991-2007.
- Cordeiro, T.S.; De Abreu, H.A.; da Silva, P.R.; Muller, R.F.M.; Alvarenga, D.F.; Portilho, D.B.; Cordeiro, J.L. 2019. Análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Candidópolis; Itabira (MG). *Research, Society and Development* 8 (1): 1-19.
- Cuéllar-Cárdenas, M.A.; López-Isaza, J.A.; Carrillo-Lombana, E.J.; Ibáñez-Almeida, D.G.; Sandoval-Ramírez, J.H.; Osorio-Naranjo, J.A. 2014. Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, Cordillera Central, Colombia. *Boletín de Geología* 36 (1): 37-56.
- da Silva Alves, K.M.A.; Dávila, M.C.P.; García, E.D.Z.; De Lira, D.R.; De Araujo Monteiro, K. 2021. Caracterización morfométrica de la cuenca del Salado Bajo, Región de Atacama, Chile. *Investigaciones Geográficas* (62): 90-105.
- Damiani, O. 2016. Los recursos hídricos subterráneos. In Martínez Carretero, E.; García, A.; editores. *San Juan Ambiental*: 169-186. Mendoza.
- D'odorico, P.E.; Pérez, D.J.; Sequeira, N.; Fauqué, L. 2009. El represamiento y aluvión del río Santa Cruz, Andes Principales (31° 40'S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (4): 713-724.
- Esper Angillieri, M.Y. 2008. Morphometric analysis of Colangüil river basin and flash flood hazard; San Juan; Argentina. *Environmental Geology* 55: 107-111.
- Esper Angillieri, M.Y. 2011. Inventario de Procesos de Remoción en masa en un sector del Departamento Iglesia; San Juan; Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68 (2): 225-232.
- Esper Angillieri, M.Y. 2014. Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos; mediante sig.; en una porción del departamento de Iglesia; San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (2): 267-273.
- Esper Angillieri, M.Y. 2020. Debris flow susceptibility mapping using frequency ratio and seed cells, in a portion of a mountain international route, Dry Central Andes of Argentina. *Catena* (189): 104504.
- Esper Angillieri, M.Y.; Fernández, O.M. 2017. Análisis morfométrico de cuencas utilizando SIG y teledetección de una sección andina de la ruta 150; Argentina. Una comparación entre la delimitación manual y automatizada de cuencas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34 (2): 150-156.
- Esper Angillieri, M.Y.; Perucca, L.P.A.; Rothis, L.M. 2016. Morfometría de cuencas como base en la evaluación de la susceptibilidad/peligrosidad por aluviones; caso de estudio: Cuenca del río del Agua; San Juan; Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 73 (4): 513-519.
- Espósito, M.A.; Moreiras, S.M.; Correas-González, M. 2023. Geomorfología de la cuenca del río del Cobre, Malargüe, Mendoza (35°S): un aporte al entendimiento de la inestabilidad de laderas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 80 (2): 240-255.
- Fauqué, L.E.; Limarino, C.O.; Vujovich, G.I.; Cegarra, M.I.; Yamin, M.G.; Tedesco, A.M.; Etcheverría, M.P. 2020. Hoja Geológica 2969-IV, Villa Unión, provincias de La Rioja y San Juan. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Segemar, Boletín 345: 189 p. Buenos Aires.
- Filho, L.W.; Totin, E.; Franke, J.A.; Andrew, S.M.; Abubakar, I.R.; Azadi, H. Global Adaptation Mapping Initiative Team. 2022. Understanding responses to climate-related water scarcity in Africa. *Science of the Total Environment* 806: 150420.

- Gaspari, J.F.; Delgado, M.I. 2010. Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia Chihuahua* 4 (3): 154-163.
- Giaconia, F.; Booth Rea, G.; Martínez-Martínez, J.M.; Azañón, J.M.; Pérez-Peña, J.V.; Pérez-Romero, J.; Villegas, I. 2012. Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics; SE Spain). *Geomorphology* 145: 90-106.
- Ginesta Torcivia, C.E. 2022. Análisis de la susceptibilidad/peligrosidad relacionada a la ocurrencia de procesos de remoción en masa. Cuenca río Talacasto. Precordillera Central. Provincia de San Juan. Tesis doctoral (Inédita), Universidad Nacional de San Juan: 231 p.
- Ginesta Torcivia, C.E.; Ríos, N.N. 2020. Preliminary morphometric analysis: Río Talacasto basin, Central Precordillera of San Juan, Argentina. *In Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: Special Symposium from the Argentine Association of Geomorphology and Quaternary Studies*, October 2017. Springer International Publishing: 158-168. Switzerland.
- Ginesta Torcivia, C.E.; Ocaña, R.E.; Ríos, N.; Esper Angillieri, M.Y.; Fernández, O.M.; González Alladio, C.; Pareyra, M.; Ruiz, E. 2021. Procesos de remoción en masa asociados a cuencas como base para la selección de alternativas de un camino de montaña. Caso de estudio: Ruta 150; Cuesta del Viento-Pachimoco; Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 78 (4): 564-577.
- Ginesta Torcivia, C.E.; Ríos, N.N.; Esper Angillieri, M.Y. 2022. Caracterización morfotectónica de la Cuenca del Río Talacasto, Precordillera Central, San Juan, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 74 (1): A300921.
- Godínez-Tamay, A.; Castillo, M.; Ferrari, L.; Ortega Gutiérrez, F. 2020. Assessing landscape response to tectonics in the Jalisco block and adjacent areas (west-central Mexico) using topographic analysis. *Journal of South American Earth Sciences* 98: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102469>
- Gravelius, H. 1914. *Flusskunde*. Goschen Verlagshandlung Berlin. *In Morphometry of drainage basins* (Zavoianu I.; editor). Elsevier: 237. Amsterdam.
- Guisan, A.; Weiss, S.B.; Weiss, A.D. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Kluwer Academic Publishers. Plant Ecology* 143: 107-122.
- Hare, P.W.; Gardner, T.W. 1985. Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Tectonic Geomorphology* 4: 75-104.
- Jenson, S.K.; Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (11): 1593-1600.
- Junquera-Torrado, S.; Moreiras, S.M.; Sepúlveda, S.A. 2019. Distribution of landslides along the Andean active orogenic front (Argentinean Precordillera 31-33° S). *Quaternary International* 512: 18-34.
- Karkani, A.; Evelpidou, N.; Tzouxanioti, M.; Petropoulos, A.; Santangelo, N.; Maroukian, H.; Spyrou, E.; Lakidi, L. 2021. Flash Flood Susceptibility Evaluation in Human-Affected Areas Using Geomorphological Methods-The Case of 9 August 2020, Euboea, Greece. A GIS-Based Approach. *GeoHazards* 2 (4): 366-382.
- Keller, E.A.; Pinter, N. 1996. *Active Tectonics, Earthquake Uplift and Landscape*. Prentice Hall, Upper Saddle River: 338 p.
- Keller, E.A.; Pinter, N. 2002. *Active Tectonics, Earthquakes Uplift and Landscape*. Prentice Hall, Upper Saddle River: 362 p.
- Khajehei, S.; Ahmadalipour, A.; Shao, W.; Moradkhani, H. 2020. A place-based assessment of flash flood hazard and vulnerability in the contiguous United States. *Scientific Reports* 10 (1):1-12.
- Köppen, W. 1936. *Das geographische System der Klimate*. Handbuch der klimatologie. Berlin.
- Ma, Z.; Peng, T.; Feng, Z.; Li, M.; Li, X.; Guo, B.; Song, C. 2019. Asymmetrical river valleys and their tectonic significance in the Maxianshan area, NE Tibetan Plateau. *Geomorphology* 329: 70-80.
- Méndez, W.; Marcucci, E. 2006. Análisis morfométrico de la microcuenca de la quebrada Curucutí; estado Vargas-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana* 47 (1): 29-55.
- Minetti, J.L.; Barbieri, P.M.; Carletto, M.C.; Poblete, A.G.; Sierra, E.M. 1986. El régimen de precipitación de la provincia de San Juan. CIRSAS-CONICET. Informe técnico 8. San Juan.
- Moore, I.; Grayson, R.; Ladson, A. 1991. Digital terrain modelling review of hydrological; geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes* 5 (1): 3-30.
- Moretto, B.; Gentili, J.O.; Campo, A.M. 2019. Análisis morfométrico multiescalar en la cuenca alta del arroyo Sauce Corto (Buenos Aires; Argentina). *Huellas* 23 (2): 149-167.
- O'Callaghan, J.F.; Mark, D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Visio, Graphics, and Image Processing* 28 (3): 323-344.

- Ocaña, R.E.; Flores, D.G. 2017. Tiempo de concentración de flujos hídricos de una cuenca de precordillera central. Análisis morfométricos aplicado a estudios de prevención de riesgos. *In* Congreso Binacional de Investigación Científica 1: 1-5. San Juan.
- Ocaña, R.E.; Flores, D.G.; Pittaluga, M.A.; Cortez Taillant, V.S. 2020. Aplicación de índices geomorfométricos, para el análisis del sistema erosivo fluvial de la cuenca Matagusanos. Precordillera de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77 (1): 174-191.
- Olaya, V.; Conrad, O. 2009. Geomorphometry in SAGA. *Developments in Soil Science* 33: 293-308.
- Oliveira, G.P.; Tavares, B.D.A.C.; De Barros Correa, A.C. 2019. Compartimentación geomorfológica del Macizo de Martins-Portalegre-Ne (Brasil). *Revista Contexto Geográfico* 3 (6): 01-11.
- Ortiz, A.; Zambrano, J. 1981. La provincia geológica de Precordillera Oriental. *In* Congreso Geológico Argentino No. 8, Actas 3: 59-74. San Luis.
- Páez, M.S.; Moreiras, S.M.; Brenning, A.; Giambiagi, L. 2013. Flujos de detritos y aluviones históricos en la cuenca del río Blanco (32°55'-33°10' y 69°10'-69°25'), Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (4): 488-498.
- Pérez, J. 1979. Fundamentos del ciclo hidrológico. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología: 1-38. Caracas.
- Perucca, L.P. 2016. Geomorfología de San Juan. *In* Martínez Carretero, E.; García, A.; editores. San Juan Ambiental: 95-116. Mendoza.
- Perucca, L.P.; Paredes, J.D. 2005. Peligro de aluviones en el departamento Pocito; provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* (60) 1: 064-071.
- Perucca, L.P.; Esper Angillieri, M.Y. 2008. La avalancha de rocas Las Majaditas. Caracterización geométrica y posible relación con eventos paleosísmicos. Precordillera de San Juan; Argentina. *Revista Española de la Sociedad Geológica de España* 21: 1-2.
- Perucca, L.P.; Esper Angillieri, M.Y. 2009. El deslizamiento de rocas y detritos sobre el río Santa Cruz y el aluvión resultante por el colapso del dique natural, Andes Centrales de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (3): 571-585.
- Perucca, L.P.; Esper Angillieri, M.Y. 2011. Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard; Iglesia Department; San Juan; Argentina. *Quaternary International* 233 (1): 81-86.
- Perucca, L.P.; Vargas, N. 2014. Neotectónica de la provincia de San Juan; centro-oeste de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66 (2): 291-304.
- Pittaluga, M.A.; Suvires, G.M. 2010. Susceptibilidad a las inundaciones por crecientes estivales y por desbordes en las localidades de Villa Nueva, Puchuzum y Villa Corral, Cuenca del Río Castaño, Calingasta, San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 520-528.
- Poblete, A.G.; Minetti, J.L. 1989. Los mesoclimas de San Juan. Primera y segunda parte. Informe Técnico 11. Centro de Investigación de San Juan (CISA), Universidad Nacional de San Juan, Boletín 4: 31-32.
- Pradhan, B.; Jebur, M.N.; Shafri, H.Z.M.; Tehrany, M.S. 2015. Data fusion technique using wavelet transform and Taguchi methods for automatic landslide detection from airborne laser scanning data and quickbird satellite imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54 (3): 1610-1622.
- Quezada, J.; Cerda, J.L.; Jensen, A. 2010. Efectos de la tectónica y el clima en la configuración morfológica del relieve costero del norte de Chile. *Andean Geology* 37 (1): 78-109. doi: <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV37n1-a04>
- Quiroga, D.; Gil, V.; Coronato, A. 2014. Morfometría de la cuenca del río Avilés; Tierra del Fuego; Argentina: Aportes al conocimiento de las condiciones de escurrimiento en territorios semiáridos. *Cuaternario y Geomorfología* 28 (1-2): 63-80.
- Ramos, V.A. 1988. The tectonics of the Central Andes; 30 to 33 S latitude. *Geological Society of America, Special Paper* 218: 31-54.
- Ramos, V.A. 1999. Rasgos estructurales del territorio argentino. *Geología Argentina* 29 (24): 15-75.
- Riley, S.J.; De Gloria, S.D.; Elliot, R. 1999. Index that quantifies topographic heterogeneity. *Intermountain Journal of Sciences* 5 (1-4): 23-27.
- Rolleri, E.O. 1969. Rasgos tectónicos generales del valle de Matagusanos y de la zona entre San Juan y Jocolí: Provincia de San Juan; República Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 24 (4): 408-412.
- Sarkadi, N.; Pirkhoffer, E.; Lóczy, D.; Balatonyi, L.B.; Geresdi, I.; Fábán, S.Á.; Czigány, S. 2022. Generation of a flood susceptibility map of evenly weighted conditioning factors for Hungary. *Geographica Pannonica* 26 (3): 200-214.
- Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambos; New Jersey. *Geological Society of America Bulletin* 67 (5): 597-646.
- Schumm, S.A. 1963. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. *Bulletin of Geological Society of America* 74 (9): 1089-1100.
- Senciales González, J.M. 1999. Redes fluviales. Metodología de análisis. Estudios y ensayos. España. Universidad

- de Málaga. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga: 337 p.
- Senisterra, G.E.; Vagaría, A.M.R.; Gaspari, F.J.; Mazzucchelli, M.G. 2014. Aspectos morfométricos de la cuenca alta del arroyo Napaleofú; provincia de Buenos Aires-Argentina. *Revista Geográfica Venezolana* 55 (2): 287-303.
- Shikhteymour, S.R.; Borji, M.; Bagheri-Gavkosh, M.; Azimi, E.; Collins, T.W. 2023. A novel approach for assessing flood risk with machine learning and multi-criteria decision-making methods. *Applied Geography* 158: 103035.
- Soria, M.; Varela, S.I.; Matar, M.A.; Romero, M.E.; Puertas, M.C. 2013. Unidades de paisaje, en un sector del corredor bioceánico. Departamento Jáchal. *San Juan. Tiempo y Espacio* 31: 99-128.
- Soto, M.V.; Arriagada, J.; Cabello, M.; Molina, M.; Maerker, M. 2022. Geoamenazas Hidro-Geomorfológicas en subcuencas de los Andes Costeros de Chile Semiárido. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres* 6 (2): 47-59.
- Strahler, A.N. 1952a. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117-1142.
- Strahler, A.N. 1952b. Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin* 63 (9): 923-938.
- Suvires, G.M. 2000. Geomorfología de la provincia de San Juan. Argentina. In *Recursos y Problemas Ambientales de la Zona Árida. Primera Parte: Provincias Mendoza; San Juan y la Rioja* (Abraham, E.M.; Rodríguez Martínez, F.; editores): 79-86. Buenos Aires.
- Suvires, G.M.; Pereyra, B. 1994. Catálogo de Recursos Humanos e Información Relacionada con la Temática Ambiental en la Región Andina Argentina. Universidad Nacional de San Juan. Iadiza-Cricyt-Mendoza. Instituto de Desarrollo Regional-Universidad de Granada con Aportes de la Junta de Gobierno de Andalucía-España y la Secretaría de Ciencia y Técnica de Argentina.
- Suvires, G.M.; Pittaluga, M.A. 2011. El modelo periglacial de los abanicos aluviales telescópicos: análisis en dos cuencas precordilleranas (31° 51'S y 68° 28'W). *Brazilian Journal of Geology* 41: 558-564.
- Tejada, F.E.; Onorato, M.R.; Fernández, G. 2018. Aplicación de índices para el análisis morfotectónico y evolutivo del paisaje en el piedemonte oriental de la Sierra de Talacasto y Lomas de Jayampes, San Juan. In *Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología*, No. 7: 18-21 Puerto Madryn.
- Uliarte, E.; Bastías, H.; Paredes, J. 1990. Relatorio de Geomorfología; Provincia de San Juan. In *Congreso Geológico Argentino*, No. 12 y Relatorio de Geología y Recursos Naturales de la Provincia de San Juan: 212-227. San Juan.
- Vich, A.I.J.; Lauro, C.; Bizzotto, F.; Vaccarino, E.; Manduca, F. 2016. Recursos hídricos superficiales. San Juan Ambiental. Recursos hídricos superficiales. In *Martínez Carretero, E.; García, A. (editores). San Juan Ambiental*: 141-167. Mendoza.
- Zevenbergen, L.W.; Thorne, C.R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12 (1): 47-56.