



Distribución Espacial y Evaluación de La Ocurrencia de Aluviones, Cuenca del Río San Juan, Provincia de San Juan, Argentina

Natalia Noemí RIOS^{1,2} y Carla GINESTA TORCIVIA^{1,2}

¹CIGEOBIO. UNSJ-CONICET. Centro de Investigaciones de la Geósfera y la Biosfera, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de San Juan.

²Gabinete de Neotectónica y Geomorfología (INGEO) Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan.

Emails: nataliaros727@gmail.com, ginestageo@gmail.com

Editor: María Romina Onorato

Recibido: 19 de mayo de 2023

Aceptado: 19 de septiembre de 2023

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo determinar la distribución espacial y las características de las zonas propensas a la ocurrencia de aluviones. Se logró a través de un análisis morfométrico regional, inventario de depósitos de aluviones, evaluación de mapas temáticos derivados de un Modelo Digital de Elevación, y el cálculo de densidad de Kernel. La cuenca del río San Juan presenta una superficie de 38147 km², abarcando casi en su totalidad el desarrollo las actividades humanas de la provincia. Debido al carácter regional del estudio, se dividió en cuatro subcuencas para la obtención de un mayor detalle. A partir de los resultados, se deduce el carácter torrencial de la cuenca, estimando que las condiciones del terreno contribuirían a incrementar el flujo de la corriente de los ríos principales, ante la ocurrencia de intensas precipitaciones. Los depósitos de aluviones están establecidos principalmente en terrenos poco rugosos con pendientes de hasta 16°, distribuidos mayormente en zonas de media ladera y bajada pedemontana orientadas al este; y zonas bajas de llanuras de inundación de los ríos o áreas planas. Constituyendo las mismas, evidencia sobre rutas e infraestructuras, comprometiendo directamente e indirectamente las actividades humanas.

Palabras clave: Índices topográficos, Densidad de Kernel, Parámetros morfométricos.

ABSTRACT

Spatial Distribution And Evaluation Flash Floods Occurrence, San Juan River Basin, San Juan Province, Argentina.

This work aims to determine, spatial distribution and characteristics of flash floods prone areas. This achieved through a regional morphometric analysis, flash flood active deposits inventory, thematic maps evaluation, derived from a Digital Elevation Model, and the Kernel density calculation. The San Juan river basin has 38147 km², encompassing almost all human activities in the province. Due to the regional nature of the study, it divided into four sub-basins to obtain detail. Based on the results, it is deduced that the basin has a torrential nature, and the terrain conditions would contribute to increasing the flow of the main rivers during intense precipitation events. Flow deposits are mainly established in relatively smooth terrains with slopes of up to 16°, mostly distributed in mid-slope and east-facing piedmont areas, as well as low-lying floodplain areas or flat areas. Constituting the same evidence of the effect on routes and infrastructures, directly and indirectly compromising human activities.

Keywords: Topographic indexes, Kernel Density, Morphometric parameters.

INTRODUCCIÓN

Un aluvión (*flash flood*) es un flujo muy rápido y repentino, casi siempre de carácter local, detonado por lluvias torrenciales o por un aporte de un gran volumen de agua en poco tiempo, que se origina en pendientes empinadas y discurre a una cierta velocidad con gran potencial erosivo y destructivo (Karkani et al. 2021). Su comportamiento y ocurrencia está estrechamente relacionada con la intensidad de las precipitaciones pluviales, las condiciones climáticas, características topográficas, las condiciones de drenaje del área y actividades humanas (Khajehei et al. 2020).

Los aluviones constituyen procesos geológicos recurrentes y representan una amenaza latente en la zona bajo estudio, por su vínculo con eventos hidrometeorológicos extraordinarios, donde rutas y localidades ubicadas en los pies de laderas son afectadas en épocas estivales (Figs. 1 y 2).

Debido a los antecedentes de eventos registrados, dentro de la cuenca de estudio, es importante analizar la distribución espacial y las características de las zonas propensas a la ocurrencia de los mismos.

El inventario de movimientos en masa es una herramienta necesaria para la evaluación de la susceptibilidad a través de métodos estadísticos (Aristizábal et al. 2019). Constituye la información fundamental y de base para el análisis espacial de la ocurrencia de aluviones en la zona bajo estudio.

En este estudio, se analizan 10162 aluviones activos, distribuidos en la cuenca de estudio. Los mismos, han sido inventariados en una escala regional, debido a la enorme superficie que abarca la cuenca en cuestión. Para el levantamiento de los mismos, se identificaron puntos en el centro de la morfología del depósito, con el fin de representar las zonas más propensas, ubicadas en su mayoría en relación a los centros poblados e infraestructura de la provincia de San Juan. Comprender su distribución espaciotemporal y los factores desencadenantes, son esenciales para identificar áreas de alta probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa y predecir el comportamiento hidrológico (Ahemaitihali y Dong 2022).

La cuenca del río San Juan, presenta una superficie de 38146.83 km², es la principal fuente de recursos hídricos para el desarrollo de la provincia y ocupa el alrededor del cuarenta y cinco por ciento de la superficie de la misma. Localizada



Figura 1. Imágenes tomadas de diarios locales: a) Media Agua, Sarmiento (<https://www.tiempodesanjuan.com/departamentales/2013/2/2/media-agua-recupero-agua-potable-horas-despues-crecida-26144.html>); b) Matagusanos, Ruta Nacional N 40. (<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) Parque El Leoncito, Calingasta (<https://www.diariodecuyo.com.ar/sanjuan/Un-aluvion-destrozo-el-ingreso-del-Parque-El-Leoncito-y-hay-19-turistas-varados-en-su-interior-20220113-0014.html>); d) Ruta Provincial N 60, Ullum (<https://www.canal13sanjuan.com/san-juan/2021/3/1/advierten-por-nuevas-tormentas-mas-intensas-en-san-juan-155168.html>)



Figura 2. Imágenes tomadas de diarios locales: a) departamento Sarmiento (<https://www.diariodecuyo.com.ar/argentina/Pronostican-que-habra-exceso-de-lluvia-y-posibles-inundaciones-en-San-Juan-20180413-0065.html>); b) Departamento Rivadavia, Ruta Provincial N 12 (<https://www.diariohuarpe.com/nota/el-jardin-de-los-poetas-inundado-casas-desmoronadas-y-autos-arrastrados-las-consecuencias-del-temporal--2021122820170>); c) Barreal, Calingasta (<https://www.sanjuan8.com/san-juan/evacuaron-8-familias-las-crecientes-barreal-n1076904>); d) Departamento Pocito, (<https://www.sanjuan8.com/san-juan/entre-10-y-14-casas-al-borde-del-derrumbe-la-intensa-lluvia-n813690>).

en el sector centro sudoccidental de la provincia, alcanza el límite interprovincial abarcando un pequeño sector del norte de la provincia de Mendoza. La cuenca de estudio, es del tipo imbrífera e irriga la mayor superficie de hectáreas útiles: casi el setenta y cinco por ciento en el Gran San Juan, concentrando el setenta por ciento aproximadamente de la población total, 4.5 en el valle de Calingasta y 3.5 en Ullúm-Zonda. El río San Juan con un caudal medio anual de 35.52 m³/seg para el periodo 2017 -2018 (estación DH 2023), es el principal recurso hídrico que aporta el agua a la provincia. Para el aprovechamiento de este recurso se construyeron los embalses Caracoles, Punta Negra y Ullum, que generan nuevos niveles base para la cuenca media y regulan el caudal para el tramo inferior del río.

Respecto al clima de la provincia de San Juan, si bien hay una variabilidad climática producto de la configuración topográfica, según Poblete y Minetti (1989), el grupo climático que predomina según la clasificación de Köppen es el tipo seco desértico "BW", en el cual la evaporación excede a la precipitación media anual. Las precipitaciones pluviales se concentran en el verano, con un valor anual promedio de 93.3 mm (Minetti et al. 1986) y la temperatura media anual es de 22°C.

En los últimos años, un número creciente de estudios (Gonzalez y Moreiras 2021, Hassan et al. 2022, Othman et al. 2023) ha demostrado que los impactos del cambio climático persistirán incluso con las vías de mitigación más ambiciosas. En consecuencia, se anticipa un incremento en la frecuencia de los procesos de remoción en masa (PRM) (Mamadjanova y Leckebusch 2022).

La escasez en las precipitaciones níveas por períodos prolongados son causantes de crisis hídricas, y afecta todos los aspectos de la relación hombre-medio en la provincia de San Juan (Montserrat 2022). Se espera que producto de las tendencias a futuro que muestra el calentamiento global, aumente la frecuencia y la intensidad de las precipitaciones. Este hecho ha sido confirmado en la mayor parte de las áreas continentales (Camilloni et al. 2020), un desencadenante principal de los PRM que causan numerosas muertes, daños a las estructuras, poblaciones, rutas, entre otros (Gariano et al. 2017).

En lo que respecta a los antecedentes en la materia de estudio, en la Argentina, varios son los autores que realizaron trabajos referidos a PRM, entre ellos pueden mencionarse a Fauqué et al. (2000, 2001), Fernández y Lutz (2003), Gon-

zález Díaz et al. (2005), Moreiras et al. (2008), Penna et al. (2008) Fernández (2009), Cardozo (2013), Balbi et al. (2020), Padilla et al. (2022), Schönfeldt et al. (2020), Winocur et al. (2021), entre otros.

En la provincia de San Juan, puede mencionarse a Esper Angillieri y Fernández (2017), Lauro et al. (2017), Ginesta Torcivia y Ríos (2020), Ginesta Torcivia et al. (2021), Acosta et al. (2021), entre otros; quienes realizaron estudios de estos eventos con base a la utilización de sistemas de información geográfica (SIG).

El análisis de los parámetros morfométricos proporciona, además, información útil sobre la respuesta hidrológica de las cuencas de drenaje a eventos de lluvia de alta intensidad, constituyendo información valiosa para comprender el potencial de aluviones o inundaciones repentinas de las mismas (Alam et al. 2021).

La aplicación de la densidad de Kernel, permite comparar o apoyar los resultados de estos tipos de estudio (Lazzari y Danese 2012, Subiela et al. 2019, Ahemaitihali y Dong 2022). Es decir, permite visualizar de forma más fácil y directa las zonas donde se concentran más datos, con mayor probabilidad

de presentar valores altos de presencia de aluviones (Troiani et al. 2017).

El análisis morfométrico regional, evaluación de mapas temáticos derivados de un Modelo Digital de Elevación (MDE), inventario de depósitos de aluviones y el cálculo de densidad de Kernel, son herramientas útiles para determinar la distribución espacial y las características de las zonas susceptibles a la ocurrencia de aluviones.

El presente estudio constituye el primer mapa inventario y de distribución espacial de los eventos aluvionales a escala regional, aportando un mapa base para el ordenamiento territorial de la cuenca del río San Juan en la provincia homónima.

AREA DE ESTUDIO

La cuenca del río San Juan está ubicada en el sector centro-suroccidental de la provincia homónima (Fig. 3), traspasando el límite interprovincial, abarcando un sector del norte de la provincia de Mendoza. Presenta una superficie de 38146.83 km², con un perímetro de 2324.27 km y longitud

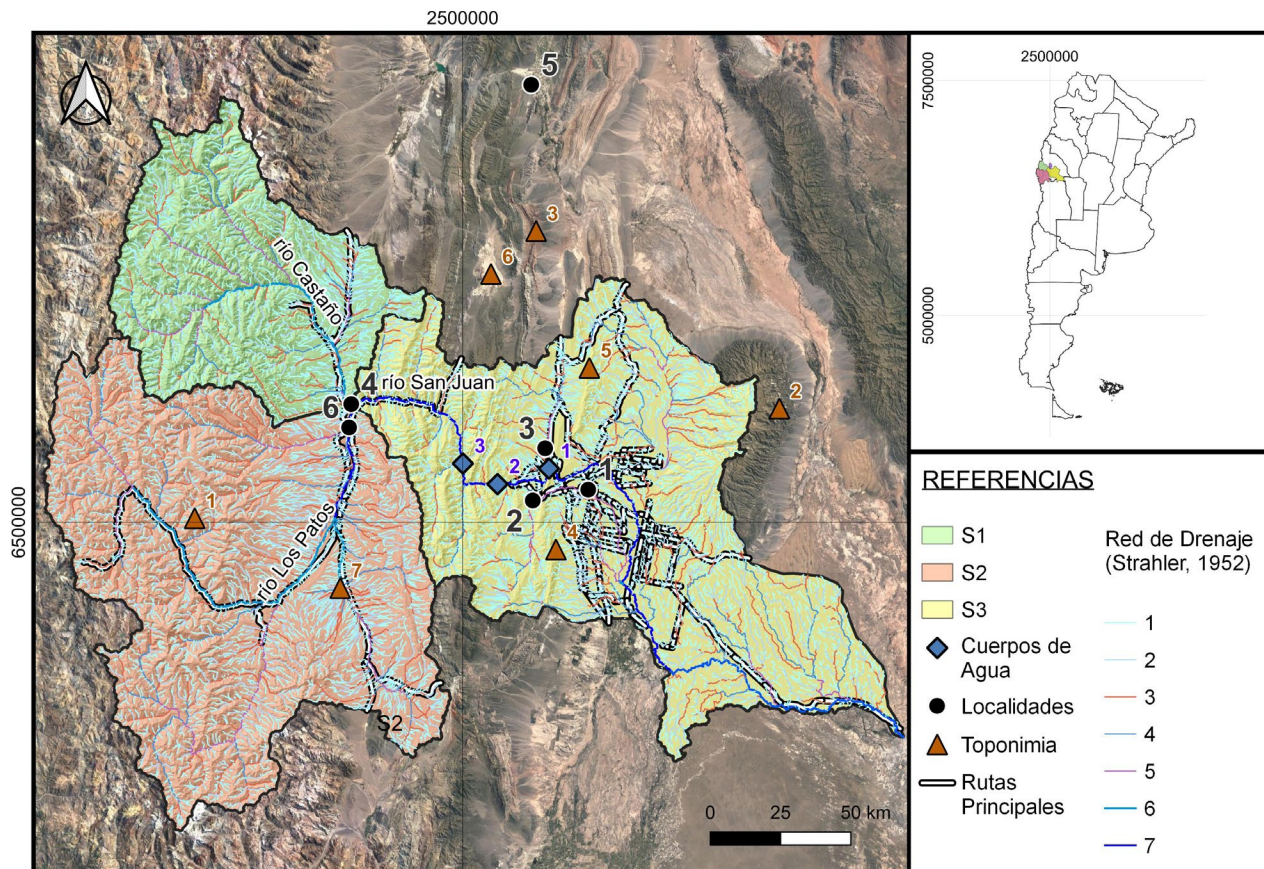


Figura 3. Ubicación del área de estudio. Se visualizan las redes de drenaje clasificadas según Strahler, 1952 y las cuatro subcuencas delimitadas. Cuerpos de agua: 1 Embalse Ullum, 2 Embalse Punta Negra y 3 Embalse Caracoles. Localidades: 1 Ciudad de San Juan, 2 Zonda, 3 Ullum, 4 Las Juntas, 5 Jáchal, 6 Calingasta. Toponimia: Toponimia: 1 Cordillera de Ansilta 2 Sierra de Pie de Palo, 3 Sierra de Talacasto, 4 Sierra Chica de Zonda, 5 Sierra de Villicum 6 Pampa de Gualilán y 7 Pampa del Leoncito.

del río principal de 618.11 km. La misma fue subdividida en cuatro subcuencas (Fig. 3) con base al 6^o orden de Strahler (1952) y la confluencia de los ríos principales.

El río San Juan es un río de carácter permanente, nace en confluencia de los ríos Castaño y Los Patos a la altura del kilómetro 128 de la ruta provincial N412 (Calingasta), escurre de oeste a este y es la principal fuente de agua superficial de la cuenca (Fig. 3). En los últimos años ha sido notable la disminución del caudal medio anual del mismo, variando de 56.41 m³/seg para el periodo 2004 (Lupano, 2008) a 35.52 m³/seg para el periodo 2017 -2018 en la estación km 101 (DH, 2023), en coincidencia con lo expuesto por Celis et al. (2009) en el estudio de series históricas del caudal anual de los ríos San Juan y Los Patos.

La cuenca del río San Juan abarca cuatro provincias geológicas (Fig.4), Cordillera Frontal, Cordillera Principal, Precordillera y Sierras Pampeanas. En cuanto a la estratigrafía de la región está resumida en un basamento metamórfico, en gran parte de segura edad precámbrica correspondiente a las Sierras Pampeanas; una completa secuencia paleozoica principalmente en rocas sedimentarias de la Precordillera; escasas unidades mesozoicas. Sin embargo, en Sierras

Pampeanas, se hayan secuencias mesozoicas completas en rocas sedimentarias. Finalmente, series cenozoicas ampliamente distribuidas en todos los ámbitos de la región. Las cordilleras, emplazadas al oeste de la provincia se caracterizan, en su mayoría, por diversos complejos volcánicos de diferentes composiciones litológicas, con edades desde el Jurásico, mientras que las secuencias sedimentarias cenozoicas son escasas, en contraposición a las otras provincias geológicas.

En el territorio de la provincia de San Juan y alrededores, actúan numerosos procesos geomorfológicos, generando en muchos casos, peligrosidad asociada. Las formas del paisaje resultante en la región se deben a procesos degradacionales y agradacionales vinculados a la acción glacial, periglacial, gravitacional, fluvial, aluvial y eólica, así como a la actividad neotectónica y cambios climáticos (Perucca 2016). Los principales rasgos geomorfológicos de la cuenca corresponden a montañas y serranías, que incluyen los sectores más elevados de Cordillera Frontal, Cordillera Principal, Precordillera y Sierras Pampeanas. Respecto a las áreas bajas, se destacan las depresiones tectónicas regionales de Iglesia – Calingasta y depresión de la Travesía (incluyendo las unidades geomorfológicas del valle del Tulum y planicie aluvial del río Zanjón

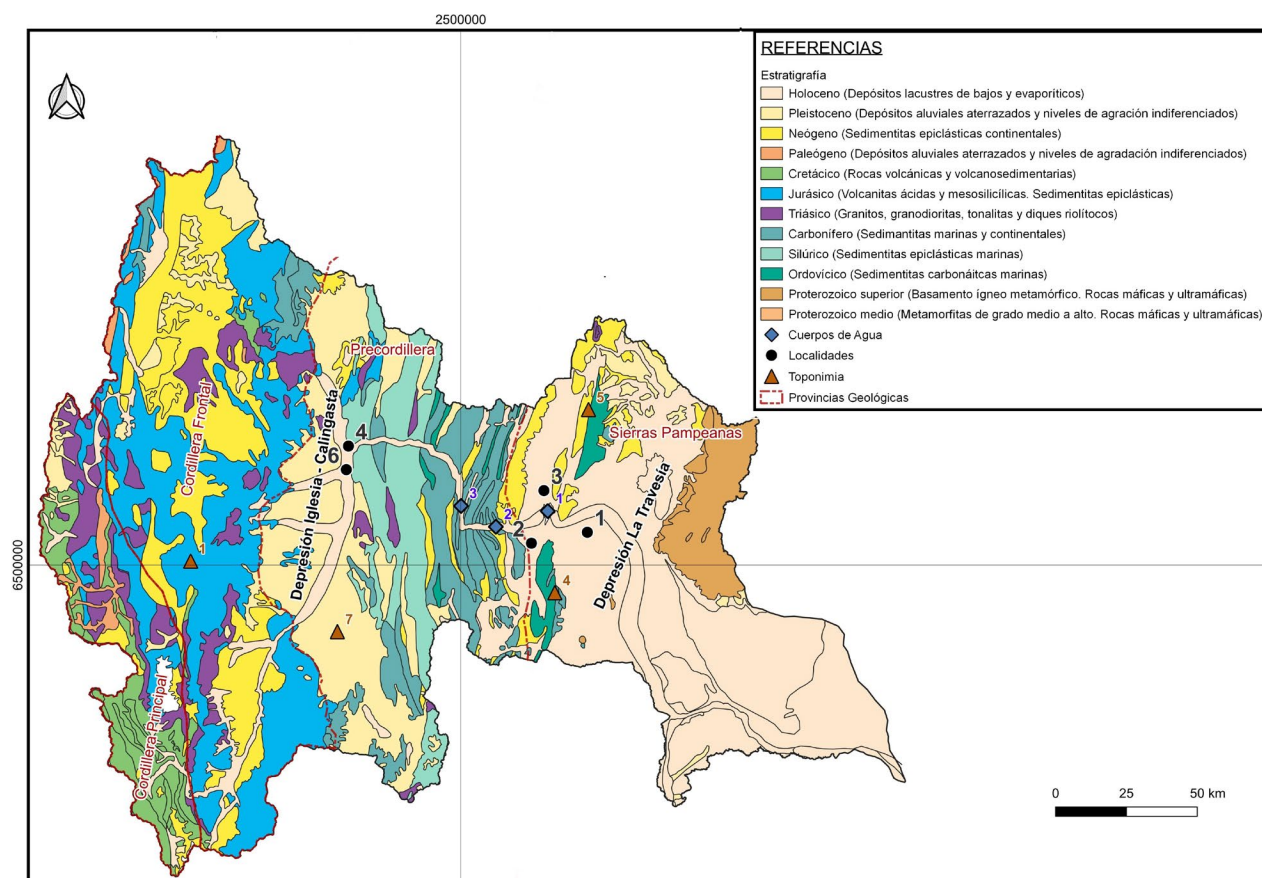


Figura 4. Mapa Litológico de la Cuenca del Río San Juan, en el marco de las Provincias Geológicas. Localidades: 1 Ciudad de San Juan, 2 Zonda, 3 Ullum, 4 Las Juntas, 6 Calingasta. Toponimia: 1 Cordillera de Ansilta, 4 Sierra Chica de Zonda, 5 Sierra de Villicum, y 7 Pampa del Leoncito.

– Bermejo) (Fig. 4). Se destacan también, el semibolsón de Matagusanos, el barreal del Jumeal, el barreal del Leoncito (Suvires 1996); además de regiones deprimidas elongadas meridionalmente y en muchos casos de origen tectónico, ubicadas entre cordones montañosos, correspondientes a depresiones intermontanas precordilleranas (Perucca 2016).

METODOLOGÍA

Respecto a la metodología general para establecer la distribución y zonación de las áreas más propensas a ser afectadas por los eventos aluvionales, una vez delimitadas las subcuencas, se parte del análisis morfométrico de las mismas sumado a la evaluación e interacción del inventario de aluviones respecto a las características del terreno. Finalmente, integrando el análisis y tomando como base el inventario realizado, se aplica la densidad de Kernel para obtener una representación gráfica de densidades de aluviones para toda la cuenca del río San Juan.

Para el análisis morfométrico y la delimitación de las cuencas, se utilizó como base de representación del terreno modelos digitales de elevación (MDE) de la plataforma *ALOS PALSAR* de una resolución de 12.5 m obtenido en el año 2008, así como imágenes satelitales de la plataforma *Google Earth*. El análisis se efectuó en ambiente de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con la aplicación de los softwares *SAGA GIS 2.2.4* y *ArcGis 10.8*.

A partir de la construcción de un mosaico proveniente de los MDE, se extrajeron mapas de dirección y acumulación de flujo. Las direcciones de flujo se calcularon usando el modelo de flujo de ocho direcciones (D8), (O' Callaghan y Mark 1984, Jenson y Domingue 1988). La aplicación de este modelo permitió la delimitación automática de la cuenca y sus subcuencas, además se obtuvo las redes de drenaje de las mismas. La determinación del orden de las subcuencas y la jerarquización de las redes de drenaje se basó en la metodología propuesta por Strahler (1952). Para la determinación del cauce principal, se consideraron los criterios topográficos y de longitud propuestos por Senciales González (1999).

Los parámetros morfométricos básicos que se calcularon fueron; área (A), perímetro (P), ancho (W) orden de la cuenca (On), altura máxima y mínima (H, h), longitud total de cauces (Ltc), longitud de cauce principal (Lcp). La longitud del cauce principal (Lcp) y la longitud de la cuenca (L), se obtuvieron según los criterios de Schumm (1956). Los parámetros derivados que se calcularon fueron: factor de forma (Ff), razón de elongación (Re), índice de compacidad de Gravelius (Ic) (Cuadro 1).

Se determinaron, además, curvas hipsométricas (IH) para cada uno de los cauces principales de las subcuencas (Cuadro 1). Estas describen el porcentaje de área de una cuenca que existe por debajo o por encima de una cota determinada (Strahler 1952, Keller y Pinter 1996). La integral hipsométrica (IH), da idea del ciclo de erosión del paisaje (Cuéllar Cárdenas et al. 2014, Greenidge Moro et al. 2020), la influencia de los factores tectónicos, climáticos y el control de la litología sobre la evolución de las cuencas de drenaje (Quezada et al. 2010).

Con el objeto de analizar los factores condicionantes del terreno que influyen en la ocurrencia de aluviones, se elaboraron distintos mapas temáticos; como elevación, pendiente, orientación y curvatura de laderas (Zevenbergen y Thorne 1987), índice de posición topográfica (TPI) (Guisan et al. 1999), índice de rugosidad del terreno (TRI) (Riley et al. 1999), índice topográfico de humedad (TWI) (Moore et al. 1991) y factor LS (Moore et al. 1991) utilizando los algoritmos de *SAGA GIS* (Conrad et al. 2015) y *ArcGis10.8*. (ESRI). Los mapas temáticos, se categorizaron en cinco clases por el método cortes naturales (natural breaks o natural Jenks, 1967), debido a que los datos no presentaban una distribución estadística normal para un adecuado manejo de variables.

El inventario de los aluviones se realizó mediante la identificación y observación manual a partir de imágenes satelitales de *Google Earth*. El mismo se mapeó a partir de la selección de un punto ubicado en el centro de los depósitos de los aluviones activos en toda la superficie de la cuenca, en ciertos casos donde la acción fluvial y/o antrópica ha disipado el mismo, se mapearon los puntos en los vestigios de los depósitos a modo de obtener un inventario completo (Fig. 5). 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.

A partir del inventario de puntos de los depósitos de aluviones se extraen los valores de los mapas temáticos categorizados, y se realizaron histogramas de frecuencias para

Cuadro 1. Fórmulas utilizadas para el cálculo de los parámetros morfométricos derivados.

Parámetro derivado	Fórmula
Factor de Forma (Ff)	A/L^2
Razón de Elongación (Re)	$1.129 \sqrt{A/L}$
Índice de Compacidad (Ic)	$0.28 P/\sqrt{A}$
Curvas Hipsométricas (IH)	$\frac{H_{media} - H_{mínima}}{H_{máxima} - H_{mínima}}$

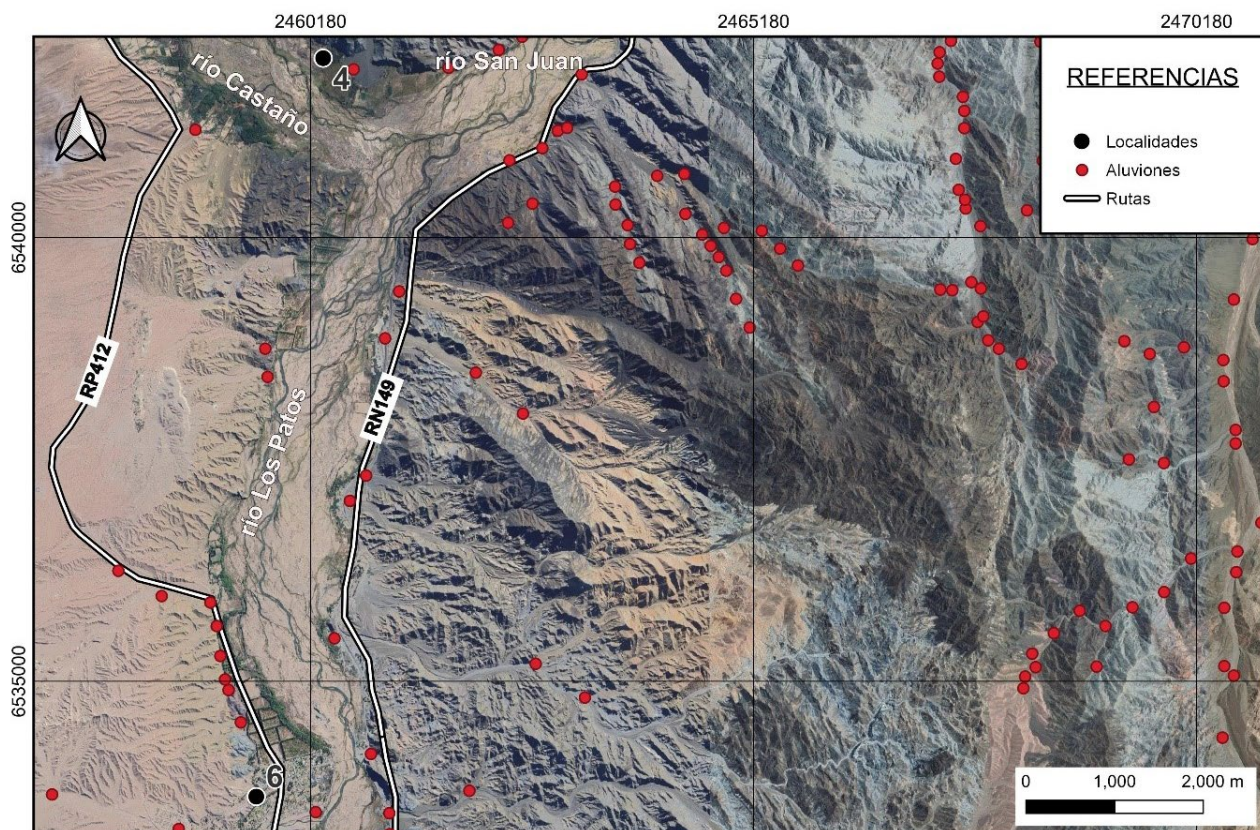


Figura 5. Imagen satelital de Google Earth, mostrando la localización y disposición de los puntos del inventario, en el marco de las rutas afectadas. Localidades: 4 Las Juntas y 6 Calingasta.

la evaluación de la incidencia de las variables condicionantes del terreno respecto a la concentración de los aluviones.

La técnica de estimación de densidad Kernel se utiliza para crear una representación de los aluviones, ya que la función permite calcular la intensidad espacial de los mismos a partir de la siguiente ecuación

$$\lambda_h(P) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n m \left(\frac{P - P_i}{h} \right)$$

Dónde $\lambda_h(P)$ representa la intensidad espacial probable de los aluviones, y $m(\cdot)$ es la función central, que es una función invariable; P_1, \dots, P_n representa la ubicación de los n (numero) de aluviones observados, y h es el ancho de banda, que determina el semidiámetro del círculo centrado en P .

La densidad espacial de los aluviones se calculó de forma semiautomática (Troiani et al. 2017) a partir de la herramienta “estimación de la densidad de Kernel” en ArcGIS 10.8 (ESRI).

(Strahler 1952), se dividió en tres subcuencas denominadas S1, S2 y S3 con base en orden 6 (Strahler 1952). Estas se analizaron y procesaron individualmente por separado, debido a la extensión regional de la zona de estudio.

De acuerdo a la clasificación de Campos Aranda (1992), las subcuencas S1, S2 y S3 se corresponden a cuencas de tamaño muy grandes.

Se inventariaron (Fig. 6) un total de 10162 puntos (Cuadro 2) que identifican depósitos de aluviones activos en toda la cuenca del río San Juan (Fig. 3).

En cuanto a los parámetros de forma (Cuadro 3), las subcuencas S1 y S2 responden a cuencas ligeramente alargadas con cierto grado de ensanchamiento, S3 responde a una cuenca alargada. Según Henao Sarmiento (1988) cuencas alargadas estarán sujetas a crecientes de menor magnitud que un área de igual tamaño con un factor de forma mayor, por tanto, asumiendo que la subcuenca S3 es alargada, la

Cuadro 2. Aluviones inventariados por subcuencas.

Subcuenca	Aluviones Inventariados
S1	3277
S2	3922
S3	2963

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cuenca del río San Juan, corresponde a un 7^{mo} orden

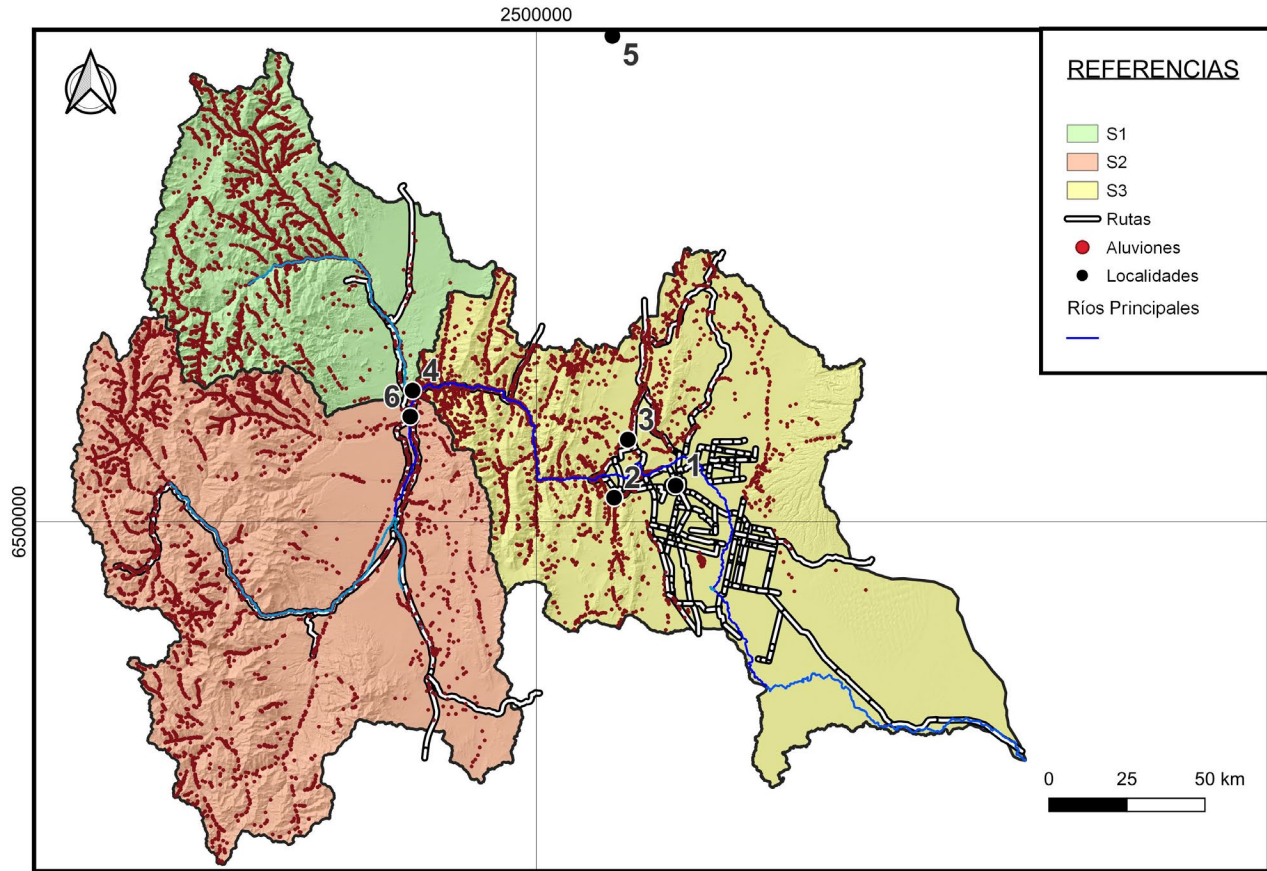


Figura 6. Se muestran los aluviones distribuidos a lo largo de toda la cuenca de estudio. Localidades: 1 Ciudad de San Juan, 2 Zonda, 3 Ullum, 4 Las Juntas, 5 Jáchal, 6 Calingasta.

misma posee menor probabilidad a la generación de crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a lo largo de la cuenca es mayor que en las subcuencas S1 y S2 que presentan mayor ensanchamiento (Lux Cardona, 2016).

Si bien, no hay estudios a nivel regional hasta el momento,

Cuadro 3. Parámetros básicos y derivados de las subcuencas del río San Juan, donde Ff: factor de forma; Re: razón de elongación; Ic: índice de compacidad de Gravelius; IH: integral hipsométrica.

SUBCUENCA	S1	S2	S3
Área (km ²)	7243.98	15599.05	15303.8
Perímetro (km)	530.92	868.23	924.42
Ancho (W) (km)	60.39	95.74	66.07
H-max (H) (m)	6300	6744	4401
h-min (h) (m)	1350	1345	507
On	6	7	7
Ltc (km)	4885	11112	12341
Lcp (km)	183.5	248.7	392.8
Longitud (L) (km)	119.95	162.93	231.64
Ff	0.5	0.59	0.29
Re	0.8	0.86	0.6
Ic	1.76	1.96	2.11
IH	0.41	0.36	0.19

en cuanto a parámetros de forma, para las subcuencas S1 y S2 se puede destacar los estudios de Ceballos (2006), D'odorico et al. (2009), Perucca y Esper Angillieri (2009), Pittaluga y Suvires (2010), Jeanneret y Moreiras (2018) entre otros, donde exponen la presencia de eventos de origen climático a los márgenes de los ríos principales de la zona vinculados principalmente a cuencas con gran desnivel, en coincidencia con el inventario de aluviones realizado; a su vez Pittaluga y Suvires (2010) mediante un análisis cualitativo determinan que el río Castaño es una de las unidades de relieve más vulnerables a sufrir avulsión por las aguas por crecidas ordinarias y extraordinarias, afirmando lo expuesto para la subcuenca S1.

Los parámetros de forma calculados para la subcuenca S3 (Cuadro 3), indican que en la misma no se ve favorecida para la ocurrencia de crecidas súbitas, por lo que existen bajas probabilidades de experimentar frecuentes procesos de flujos aluvionales, sin embargo estudios realizados a nivel local en las cuencas del río Seco (Esper Angillieri y Perucca, 2014), cuenca río del Agua (Esper Angillieri et al. 2016) entre otros, obtienen valores similares a las de este estudio, denotando cuencas alargadas en las cuales la probabilidad de que se presenten crecidas con picos de caudales pronunciados y de

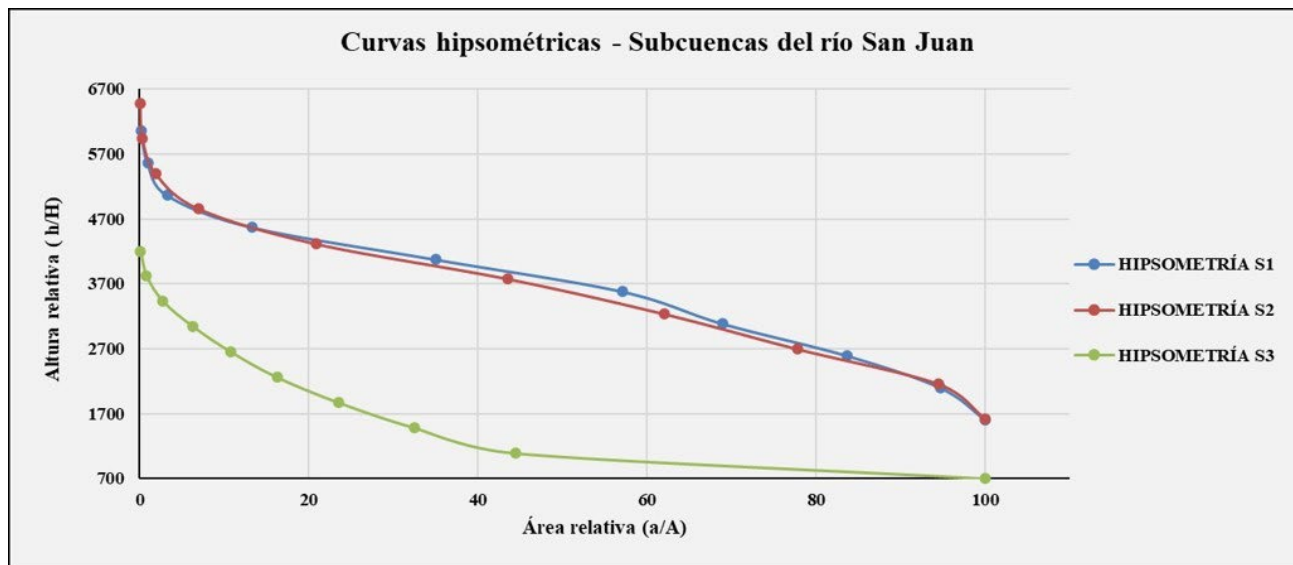


Figura 7. Curvas hipsométricas calculadas para las subcuencas del río San Juan.

corta duración es alta, debido a las características del relieve y a la presencia de lluvias de carácter torrenciales favoreciendo la generación de aluviones. Por tanto, en la mayoría de las cuencas pequeñas de Precordillera con formas alargadas, el gran desnivel de las mismas sumado a la actividad neotectónica

propician escenarios ideales para la generación de los mismos, evidenciado por el inventario de aluviones.

Para las subcuencas S1 y S2, según Keller y Pinter, (1996), el valor de la integral hipsométrica (IH) fluctúa entre 0.41 y 0.36 (Cuadro 3), asociadas a curvas de morfología si-

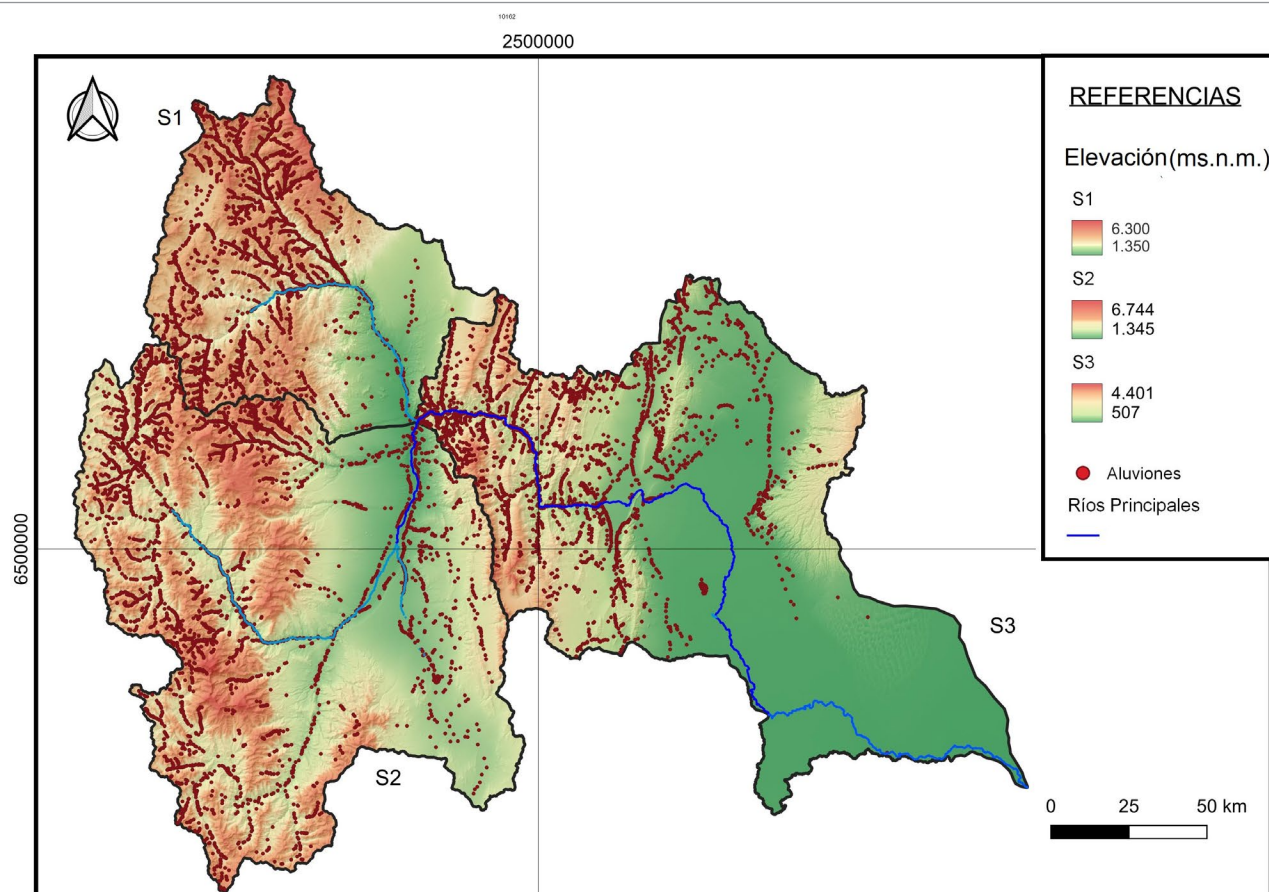


Figura 8. Elevación (m s.n.m.) e inventario de aluviones de las subcuencas del río San Juan.

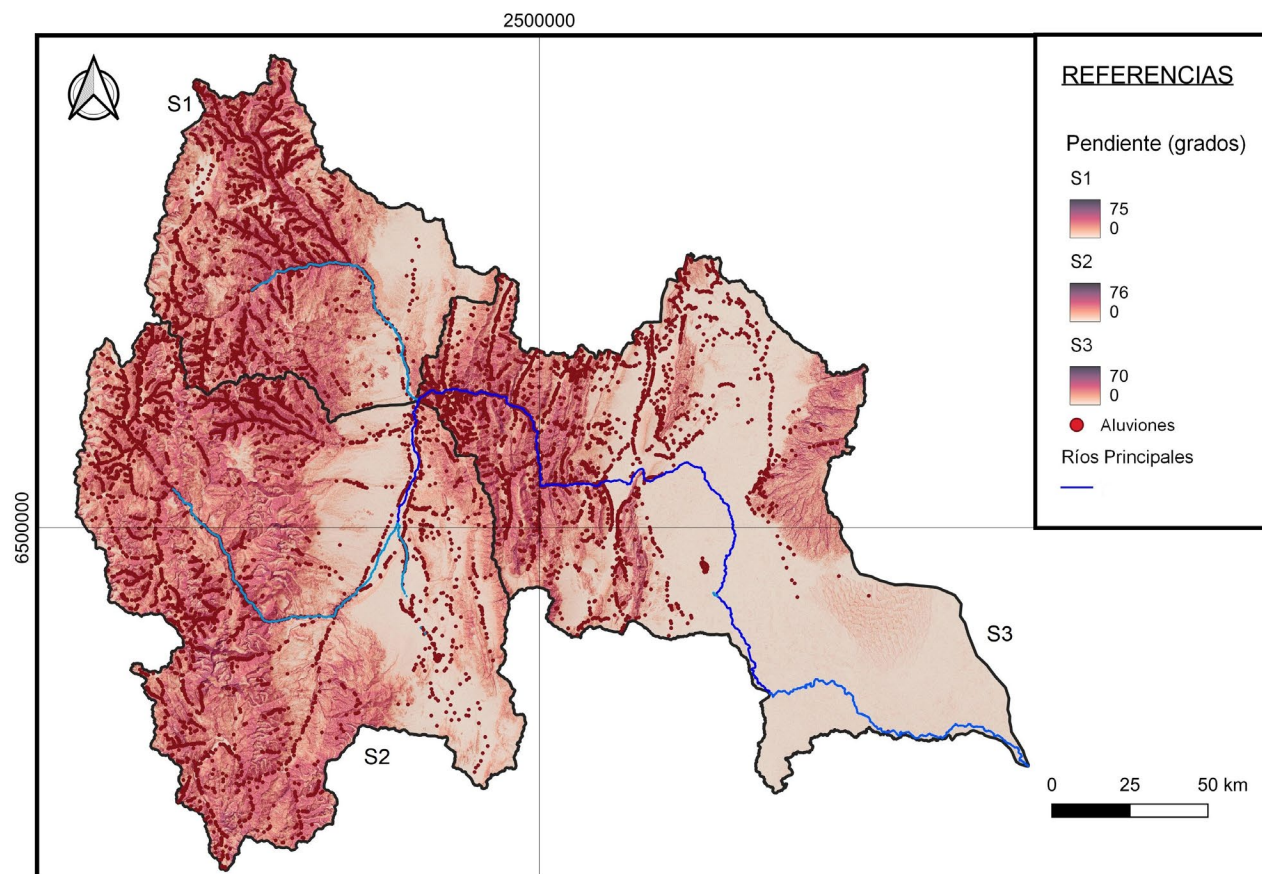


Figura 9. Pendiente e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan.

nusoidal cóncava-convexa, indica que los procesos tectónicos y erosivos están balanceados. Atendiendo a la forma de la curva hipsométrica (Fig. 7) las mismas sugieren un gran potencial erosivo, mostrando pendientes fuertes, en los orígenes y desembocaduras de las cuencas, indicando estadios juveniles en la evolución de la cuenca con predominio de procesos de levantamiento en las cabeceras, las curvas reflejan en su parte baja una tendencia convexa, que según Giaconia et al. (2012), indica procesos de rejuvenecimiento en la base del drenaje, lo cual influye directamente en un aumento del potencial erosivo en esta zona, que es la confluencia de los ríos Castaño y los Patos con el río San Juan. La curva de la subcuenca S3, tiende a ser curva cóncava con procesos de levantamiento y erosión en su cabecera (nacimiento del río San Juan), denota un mayor grado de evolución del relieve correspondiente a un estadio senil (Strahler, 1952); y el valor de la IH es de 0.19 que representaría una subcuenca altamente erosionada, estudios a nivel local demarcan una variabilidad en cuanto a los valores obtenidos para las IH, Ocaña et al. (2020) obtienen valores similares para las subcuencas localizadas al este del semibolsón de Matagusanos.

La cuenca del río San Juan presenta elevaciones (Fig. 8)

máximas (6744 m s.n.m.) en la subcuenca S2 y mínimas (507 m s.n.m.) en el punto de desagüe del río San Juan en la subcuenca S3.

En general, para la cuenca de San Juan, 4553 depósitos de aluviones se distribuyen hasta los 2905 m s.n.m., luego 5388 de los aluviones hasta los 4324 m s.n.m. principalmente vinculados a las zonas de cordillera, el resto (221 aluviones) se distribuyen hacia los 5270 m s.n.m. (Fig. 16); sin embargo, es notable que la distribución de los depósitos de los mismos se ve concentrada a elevaciones menores, por lo que, los procesos aluvionales se originan en elevaciones mayores y depositan en sectores medios a bajos vinculados principalmente al desnivel de las laderas.

Valores de pendientes elevadas (Fig. 9) se observan para las subcuencas S1 y S2 en laderas de cordones montañosos de Cordillera Frontal y Cordillera Principal, normalmente en aquellas laderas (30 – 55°) a los márgenes de los ríos principales, cuyos valores de pendiente disminuye abruptamente en los mismos (2 – 5°), propiciando un gran potencial erosivo para la generación de aluviones en estas zonas, que luego van a depositar en las márgenes de los ríos principales. En contraposición, laderas de sierras y montañas ubicadas en

Precordillera poseen valores notablemente menores ($16 - 29^\circ$) a las observadas en los cordones montañosos ubicados al oeste. Para la subcuenca S3, zonas de elevada pendiente ($26 - 45^\circ$) se muestran coincidentes en laderas de los cordones montañosos y sierras con orientación norte – sur de Precordillera, en algunos sectores de laderas orientadas hacia el este se puede apreciar mayores pendientes ($50 - 67^\circ$). Hacia el este, en la Sierra de Pie de Palo, pendientes desde 35 a 67° se observan en laderas escarpadas de orientación norte – sur, noroeste – sudeste siguiendo lineamientos.

Considerando las zonas de depositación de los aluviones, la mayor concentración (7148 depósitos) se observan emplazados en áreas con pendientes de hasta 16° , que van disminuyendo en cantidad hacia mayores valores de pendientes, generalmente asociados a depósitos de aluviones en áreas de Cordillera, cuyos procesos (arranque y transporte) se generan en pendientes aún mayores (Figs. 9 y 16).

Desde el punto de vista hidrográfico la orientación de las laderas indica la dirección del flujo, para las respectivas subcuencas existe una tendencia hacia el este y oeste de orientación de laderas (Fig. 10). Si bien, los depósitos de aluviones tienen una distribución prácticamente uniforme con respecto a la orientación de laderas, hay una tendencia de aumento en

porcentajes de los depósitos ubicados en laderas orientadas hacia el este (Figs. 10 y 16). Esta tendencia se debe a la orientación de los esfuerzos en dirección este- oeste producto de la subducción andina, que determina un ascenso y exposición de las secuencias involucradas en la deformación. Por lo tanto, salvo casos puntuales, en las laderas orientales se distinguen las mayores pendientes favoreciendo así el movimiento de material (Junquera-Torrado et al. 2019). Soria et al. (2013), afirman esta aseveración indicando que, los estratos sedimentarios al este de la Precordillera presentan mayor exposición a la erosión hídrica y eólica, favoreciendo el aporte de material y movimiento del mismo.

El valor del índice de curvatura se puede utilizar para buscar patrones de erosión del suelo, así como la distribución del agua en el planeta Tierra (Moore et al. 1991). El índice de curvatura para la subcuenca S1 (Fig.11) presenta valores máximos (24) y mínimos (-25), para la subcuenca S2 de -26 a 27, para la subcuenca S3 de -21 a 21. Valores bajos (concavidad), indicarían que en zonas de cauces hay un predominio de áreas convergentes y zonas de depósitos coincidiendo con una disminución de pendiente, mientras que en zonas de elevada pendiente como en laderas y lechos de ríos montañosos se observan valores positivos (convexidad) que se in-

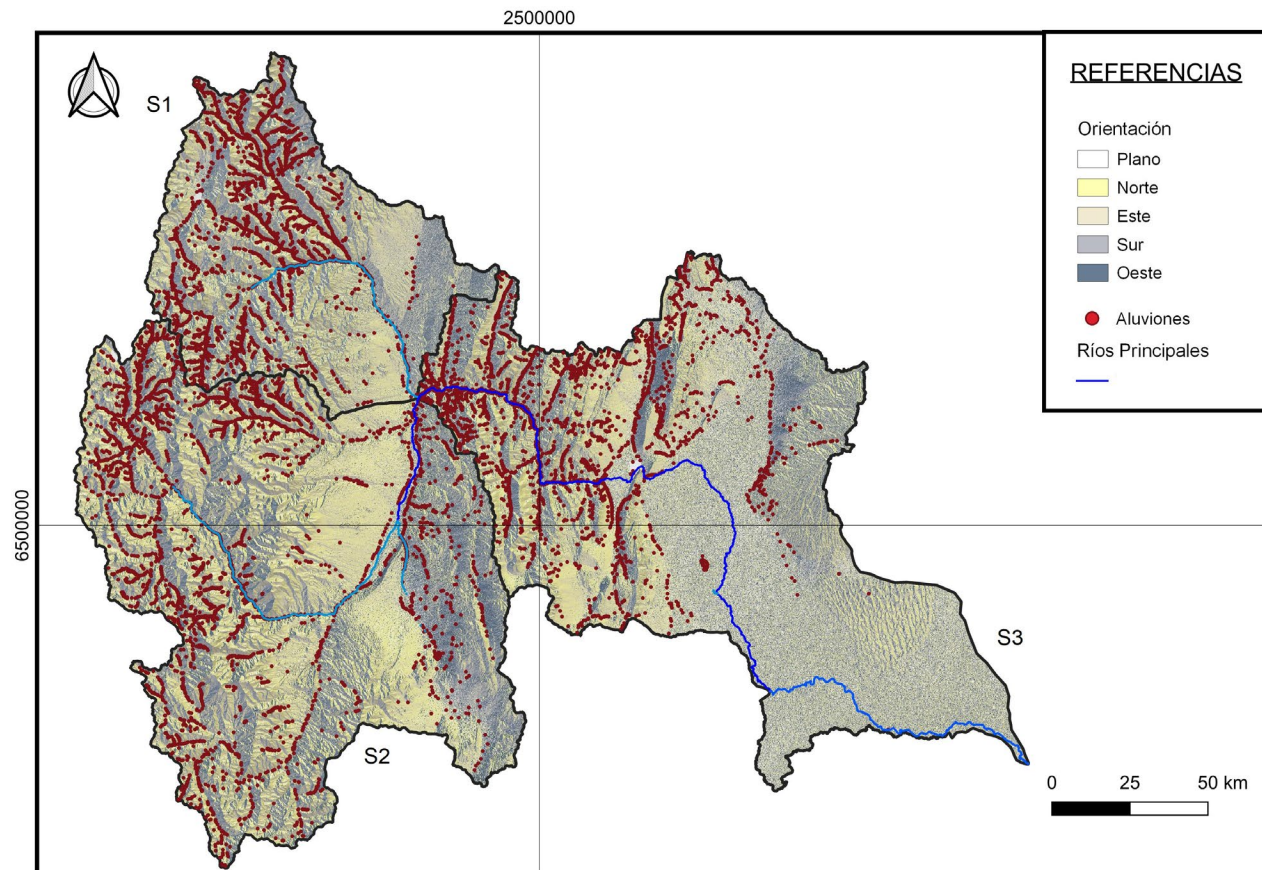


Figura 10. Orientaciones de laderas e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan, definida en puntos cardinales.

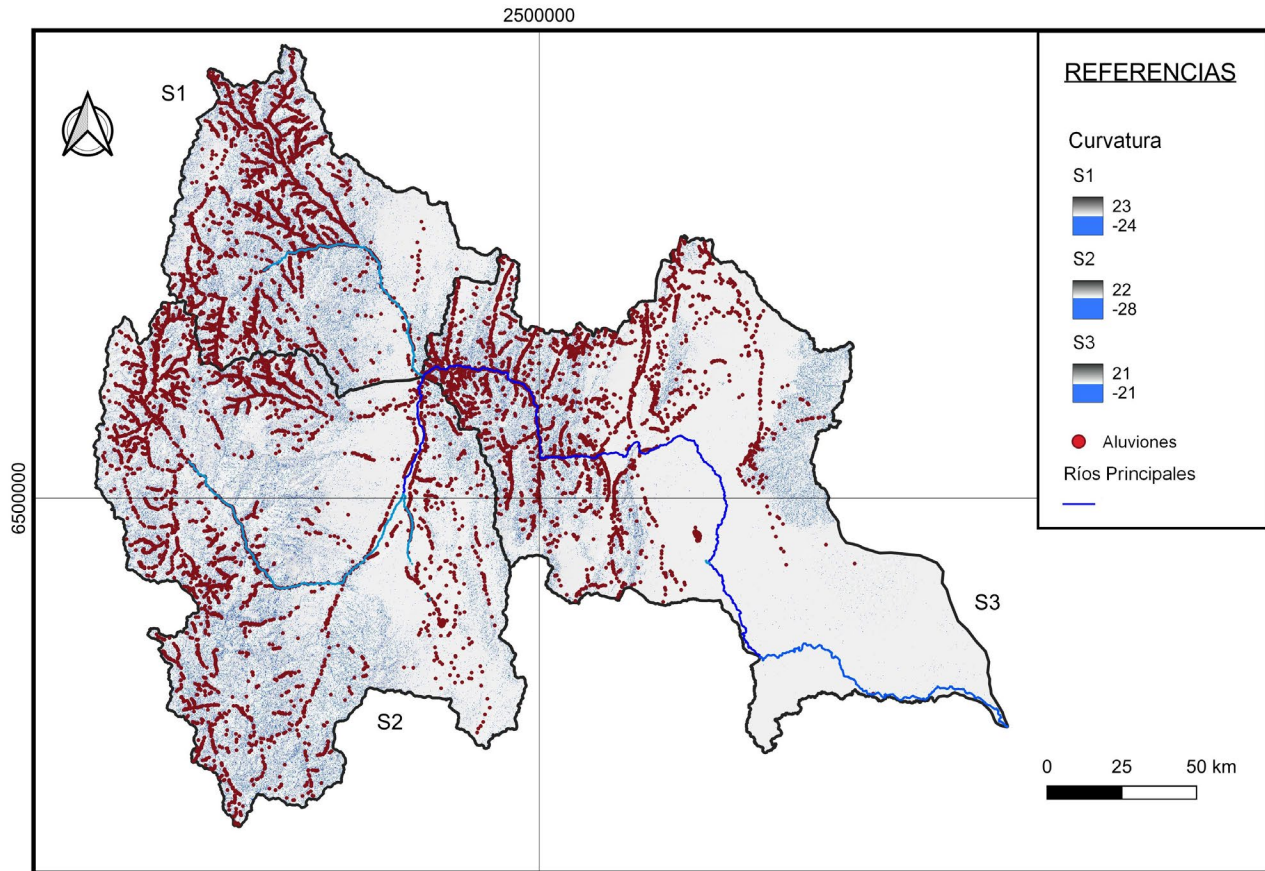


Figura 11. Curvatura e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan.

terpretan como áreas donde predomina erosión y aceleración del agua. En zonas de escarpes y divisorias de aguas, muestran valores positivos de curvatura horizontal plana indicando divergencia del flujo acuoso. Valores cercanos a cero, coinciden con geomorfologías planas, como terrazas, abanicos aluviales y llanuras de inundación de los ríos, principalmente.

Los depósitos de aluviones involucrados en la cuenca del río San Juan se presentan en terrenos cuya curvatura concentra en valores desde -1 a 0, indicando un predominio de depósitos de aluviones (8030) en zonas planas y/o levemente convergentes (Fig. 16).

Con respecto al Índice de Posición Topográfica (TPI), los valores positivos mayores a 18 se interpretan como zonas de crestas y picos de montañas, y entre 7 a 11 como sierras. Los valores negativos más bajos, coinciden con zonas de quebradas (-3 a -13) y valores menores a -16 sobre los cursos de ríos incididos en zonas montañosas. Zonas de llanos, cauces y márgenes de ríos principales, y zonas de media ladera o bajada pedemontana presentan valores cercanos a 0 (Fig. 12).

Del total de depósitos aluviales acumulados, 9919 depósitos arrojan valores de TPI entre -19 – 2, interpretándose que la mayor cantidad de depósitos están constituidos en zonas mayormente de media ladera o bajada pedemontana y

zonas bajas de llanuras de inundación de los ríos (Fig. 12 y Fig. 16).

En tanto, al Índice de Rugosidad del Terreno (TRI), dentro de las subcuencas S1 y S2 se puede apreciar que, en la zona cordillerana ubicada al oeste, y en la zona oriental correspondiente a Precordillera los valores positivos (2 a 26) son coincidentes con la morfología de las mismas, donde valores elevados de este índice se pueden observar en aquellas laderas orientadas hacia el este, sur y sudeste con valores de hasta 26. Valores altos del índice TRI, son coincidentes con circos de glaciares en el sector correspondientes a la Cordillera Frontal y Principal. En la subcuenca S3, se diferencian dos zonas con diversa complejidad, las zonas occidental y oriental muestran valores de TRI mayores a 3 siguiendo la orientación norte – sur de cordones y sierras, donde se pueden observar valores superiores a 10 en escarpes de laderas orientadas al este. Las áreas colindantes a las mencionadas presentan valores de TRI igual a 1 o 0, coincidiendo con las zonas de ríos, valles y pampas (ej. El Leoncito) para las tres subcuencas (Fig. 13).

En la cuenca del río San Juan, altos valores del TRI indican las zonas más propensas a la generación de aluviones, que se muestran coincidentes con los cordones montañosos,

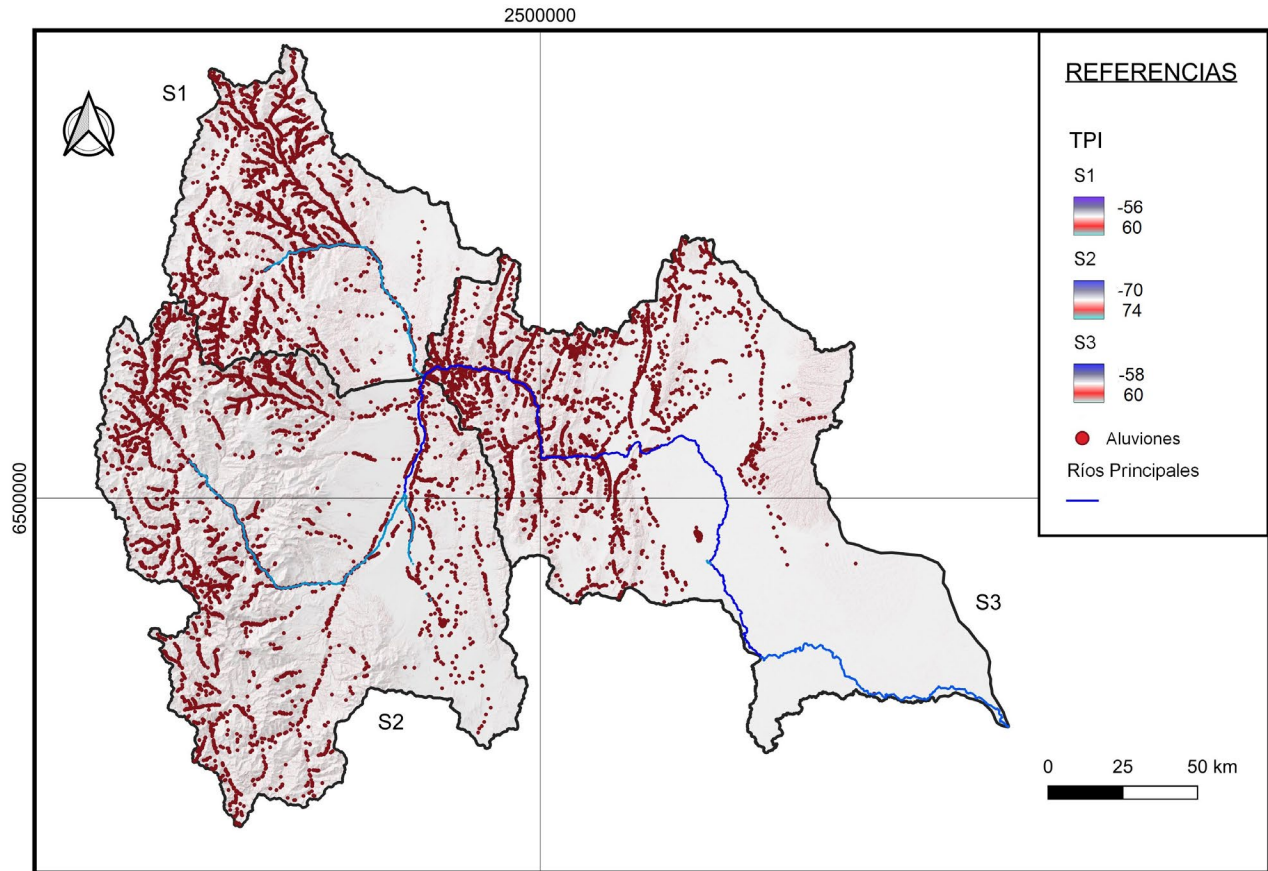


Figura 12. Índice TPI e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan.

sierras y escarpas de laderas, los que una vez generados discurren con un gran potencial erosivo debido a la elevada pendiente, depositando en zonas con rugosidades bajas. En general, para toda la cuenca del río San Juan el predominio de depósitos de aluviones se da en terrenos con muy baja complejidad topográfica, acumulando 8774 depósitos con valores de TRI de 0 a 3 (Fig. 16).

El Índice Topográfico de Humedad (TWI), está relacionado con la cantidad de agua disponible del suelo, valores elevados del índice topográfico de humedad (Fig. 14), se muestran concurrentes con los cursos fluviales (TWI superiores a 8), y particularmente en zonas de depresión como llanos, pampas o diques se observan valores de 9, mostrando similitudes respecto a la contención de humedad en esas zonas para todas las subcuencas. Además, es destacable el hecho que algunas laderas orientadas al sudeste presentan acumulaciones de valores de TWI cercanas a 7, las cuales, si bien no muestran valores elevados de este índice, las mismas proveen zonas que propician el desencadenamiento de los procesos aluvionales, y sus respectivos depósitos se observan a los pies de las mismas, por lo que permite determinar zonas de acumulación de agua (Soto et al. 2022). Para la totalidad de depósitos de aluviones en la cuenca, se acumulan 8772 aluviones con

valores de TWI de 3 – 9, lo que se traduce en depósitos con bajo a medio contenido de humedad (Fig. 16).

El factor topográfico LS, en las subcuencas muestra valores bajos en zonas de pendientes bajas, en zonas planas y lechos de ríos principales, donde el valor es generalmente de cero; zonas de media ladera y ladera de quebradas con pendientes considerables hasta 24° superan valores de 6 hasta 13. Valores de LS de 18 o más se observan en zonas con laderas escarpadas orientadas principalmente hacia el este y sudeste, denotando un efecto topográfico mayor en estas zonas sobre la erosión del suelo (Fig. 15).

Valores altos del índice LS indican una pendiente alta corroborada con una pequeña longitud del flanco, lo que amplifica la velocidad del flujo de agua (Pravalié y Costache 2014), discutiendo y depositando en zonas con valores menores de este índice. En general, para las tres subcuencas 4790 depósitos de aluviones tienen valores LS de hasta 2, en menor proporción 3716 aluviones poseen valores LS entre 2 y 8 (Fig. 16).

A continuación, se presentan los histogramas de frecuencias para los depósitos de aluviones en relación a las variables condicionantes del terreno para la cuenca del río San Juan (Fig. 16).

La densidad de Kernel (Fig. 17) muestra que la dinámica

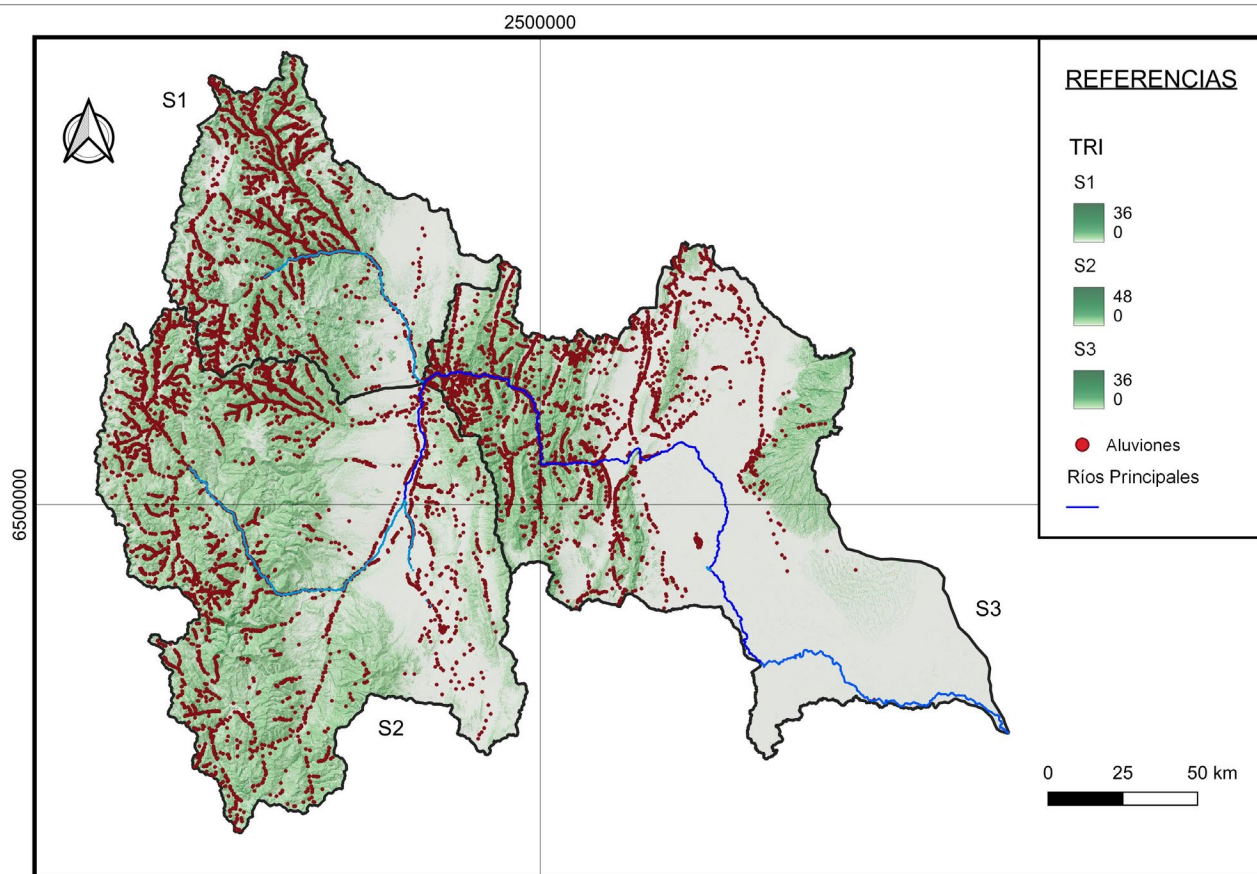


Figura 13. Índice de rugosidad del terreno (TRI) e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan, adimensional.

de mayor concentración de los depósitos aluvionales está distribuida en zonas montañosas correspondientes a Cordillera Principal y Frontal y Precordillera, vinculados principalmente a los pies de laderas y márgenes de los ríos. En contrapartida, en las zonas de las depresiones Iglesia- Calingasta y la Travesía, se pueden distinguir dos zonas principales, una de muy baja densidad de depósitos en áreas planas, y la segunda de densidad moderada a alta estrechamente relacionada a los cauces y márgenes de los ríos principales Los Patos, Castaño y San Juan.

Por lo expuesto anteriormente, los valores de mayor densidad de Kernel (Fig. 17) se manifiestan en terrenos que presentan valores de posiciones topográficas, pendientes, elevaciones y contenido de humedades bajos. Se ubican en su gran mayoría al oeste de cada subcuenca, debido a la configuración tectónica de la provincia, sobre laderas escarpadas que buzanan hacia el este. Apoyando a la evaluación de la interacción de los depósitos aluvionales con los índices condicionantes del terreno.

CONCLUSIONES

El presente estudio presenta una distribución espacial de

aluviones que afectan a la cuenca del río San Juan a partir del análisis integrado de su inventario y las variables condicionantes del terreno, apoyado por la densidad de Kernel.

Respecto a los parámetros de forma, el estudio morfométrico indica que las subcuencas poseen poca a media probabilidad a la generación de aluviones. Sin embargo, el inventario indica la ocurrencia de los mismos, mayormente vinculados a eventos climáticos extremos y al desnivel de las laderas. Por lo que, el análisis morfométrico realizado en cuencas de tamaños grandes a muy grandes, podría arrojar resultados erróneos si no se complementa con un inventario de aluviones, los cuales no son tenidos en cuenta en el análisis morfométrico.

Las curvas e integrales hipsométricas, sugieren en general de oeste a este una evolución del paisaje desde estadios juveniles con predominio de procesos de levantamiento en las cabeceras, lo que genera un gran potencial erosivo mostrando pendientes fuertes, en los orígenes y desembocaduras de las cuencas; evolucionando a cuencas con un mayor grado de evolución del relieve y menor porcentaje de preservación del relieve original del terreno, donde existe un predominio de procesos erosivos sobre procesos tectónicos, lo que genera una gran cantidad de material para ser removido.

El inventario de 10162 puntos relacionados a depósitos de

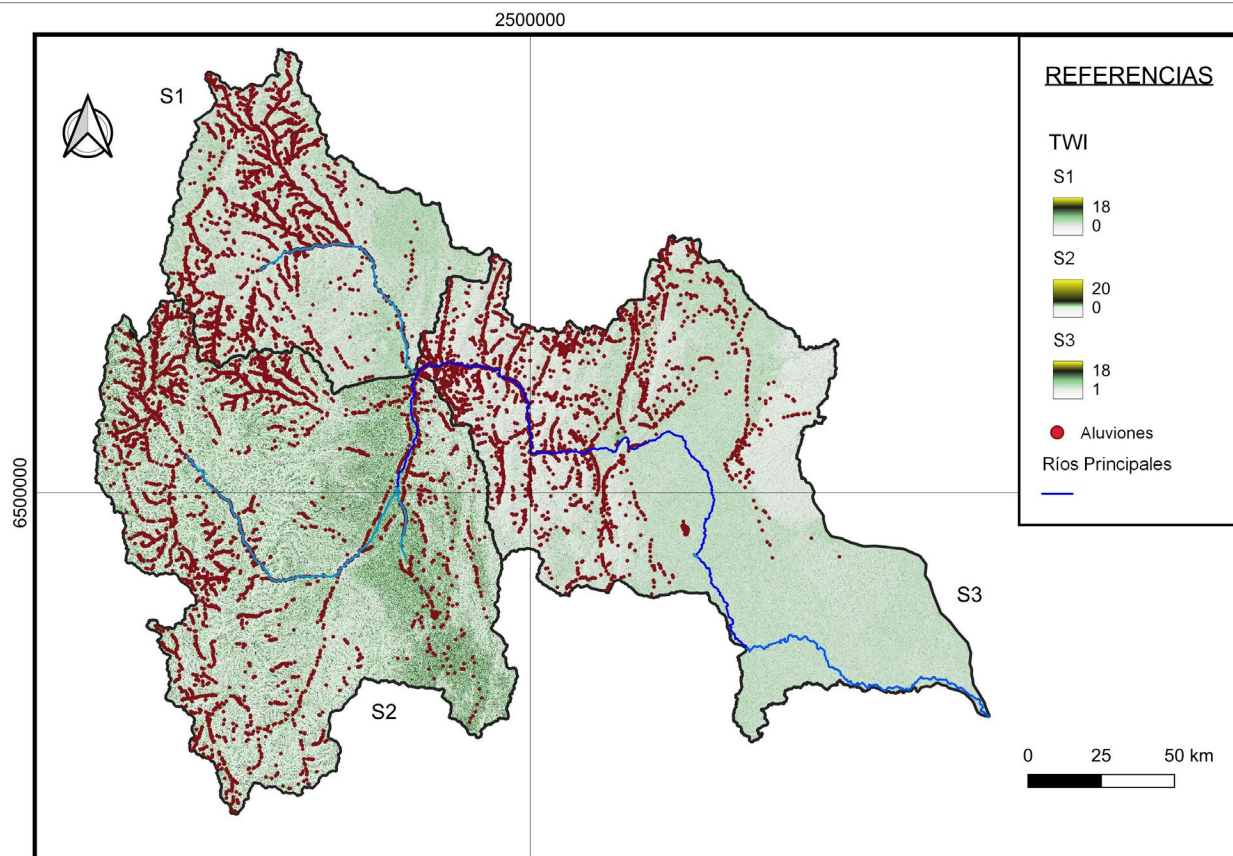


Figura 14. TWI e inventario de aluviones para la cuenca del río San Juan, adimensional.

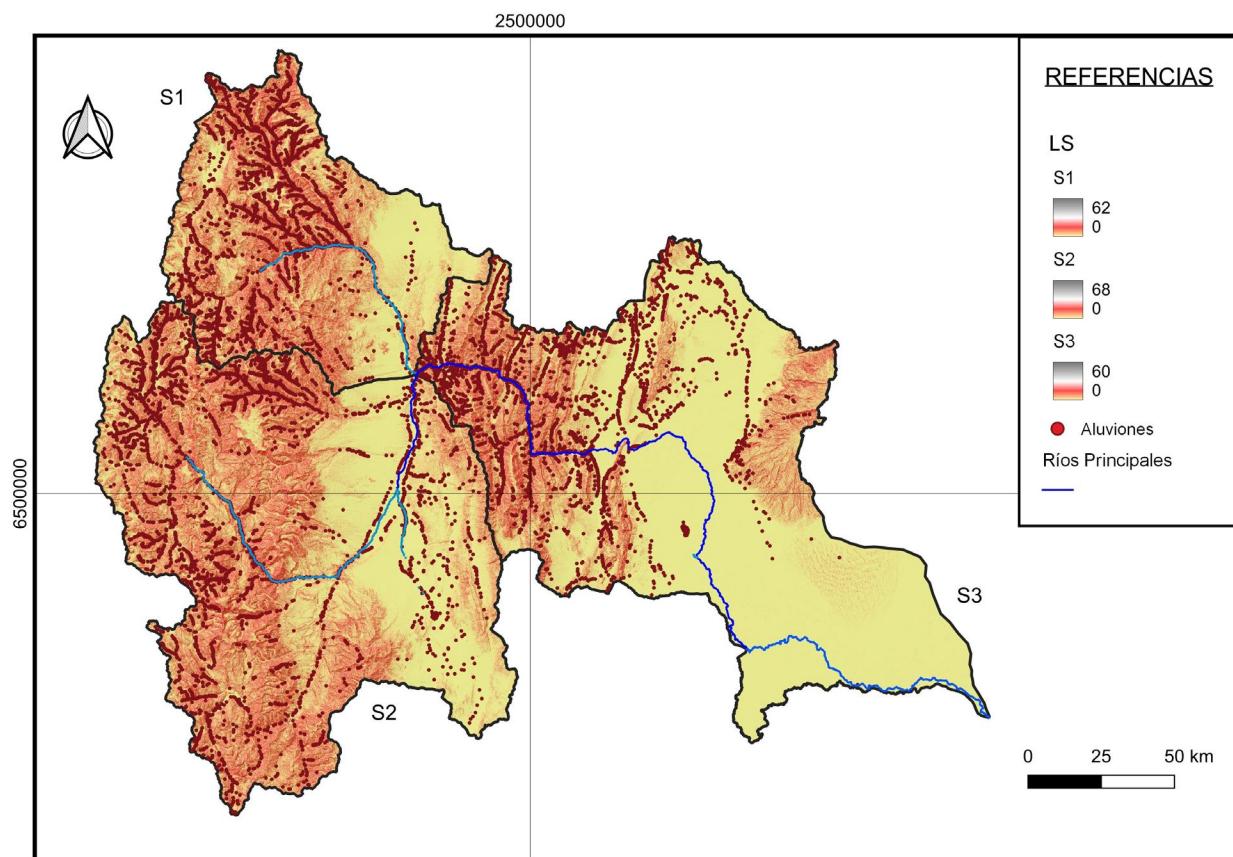


Figura 15. Factor LS e inventario de aluviones de la cuenca del río San Juan, adimensional.

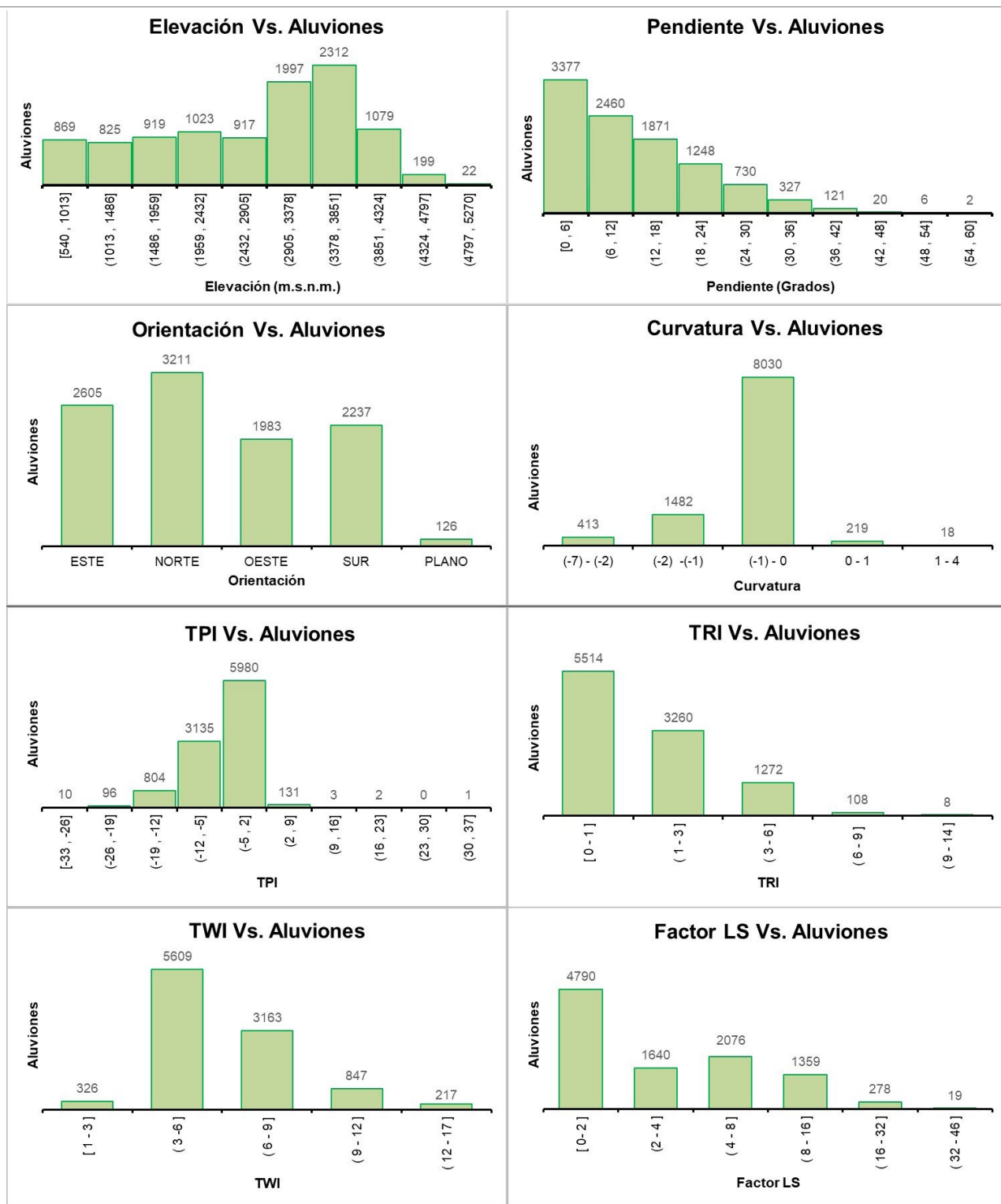


Figura 16. Gráficos que exponen la distribución en cuanto a cantidad de depósitos aluvionales inventariados acumulados, versus los valores de cada una de las variables condicionantes del terreno para la cuenca del río San Juan.

aluviones distribuidos en toda la zona de estudio, evidencia el efecto de estos eventos sobre rutas e infraestructuras, comprometiendo directa e indirectamente las comunicaciones entre localidades, y el consecuente desarrollo urbano, agrícola y minero de todas las actividades humanas y económicas en la

provincia de San Juan.

La mayoría de los depósitos de aluviones, están emplazados en zonas con pendientes de hasta 16°, con una leve tendencia de aumento de la presencia de estos ubicados en laderas orientales, las cuales presentan en sus cabeceras

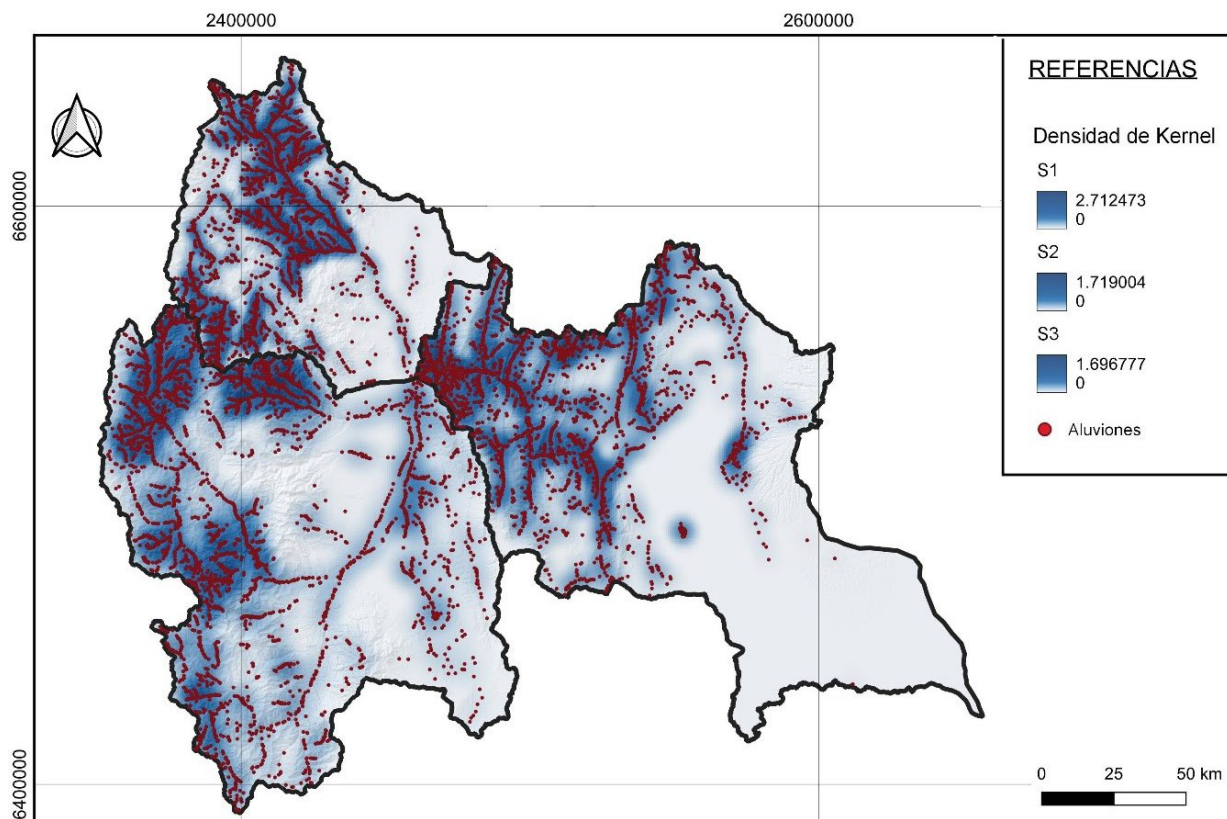


Figura 17. Distribución de los aluviones inventariados, bajo el cálculo de la densidad de Kernel. Se muestran cantidad relativa de los mismos por área.

elevadas pendientes, debido principalmente al acortamiento producido por el efecto de la compresión andina, que genera un perfil regional asimétrico en las serranías y montañas.

Respecto a los índices condicionantes, se concluye que, en terrenos poco complejos, es decir, asociados a una posición topográfica de menor elevación, donde hay una disminución de pendiente, se produce una desaceleración del flujo propiciando el depósito del mismo.

La densidad de Kernel, es una herramienta muy útil para simplificar y visualizar de manera rápida y sencilla la distribución de los aluviones en el área de estudio. La mayor densidad en cuanto a la distribución espacial de aluviones, está vinculada principalmente a los pies de laderas y márgenes de los ríos principales.

Se concluye que, para un análisis de distribución espacial y evaluación de la ocurrencia de aluviones, y la consecuente obtención de resultados congruentes a la realidad acontecida, es imperiosamente necesario tomar datos de identificación de los aluviones ya sea en campo o mediante herramientas indirectas. Obteniendo así, un inventario de los procesos que servirá como dato duro de base para los subsiguientes análisis.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al CIGEOBIO (CCT SAN JUAN -CONICET-UNSJ) por los fondos aportados para la adquisición de la licencia del software ArcGIS, y a los evaluadores por las sugerencias y comentarios que han ayudado enormemente a la mejora de este trabajo.

REFERENCIAS

- Acosta, G., Rodríguez, A., Euillades, P., Euillades, L., Ruiz, F., Rosell, P., Sanchez M., Leiva M. F., Ariza, J.P. y García, H. 2021. Detection of active landslides by DInSAR in Andean Precordillera of San Juan, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 108: 103205.
- Ahemaitihali, A. y Dong, Z. 2022. Spatiotemporal Characteristics Analysis and Driving Forces Assessment of Flash Floods in Altay. *Water* 14 (3): 331.
- Alam, A.; Ahmed, B., y Sammonds, P. 2021. Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International* (575): 295-307.
- Aristizábal, E., Vásquez, M., y Ruíz, D. 2019. Métodos estadísticos para la evaluación de la susceptibilidad por movimientos en masa. *Tecnológicas* 22(46): 43-64.

- Balbi, A. B., Carballo, F. D., Azcurra, D., Nicosia Burgos, F. R., Cavallaro, S. L., y Scarpa, R. 2020. Zonificación de la Susceptibilidad a los Procesos de Remoción en Masa de la Provincia de Jujuy. Serie Contribuciones Técnicas Peligrosidad Geológica;20. 48p. Buenos Aires, Servicio Geológico Minero Argentino. Instituto de Geología y Recursos Minerales.
- Camilloni, I., Barros, V., Moreiras, S., Poveda, G., y Tomasella, J. 2020. Inundaciones y sequías. Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos—Informe RIOCCADAPT, 391-417, España.
- Campos Aranda, D. 1992. Procesos del Ciclo Hidrológico. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.
- Cardozo, C. P. 2013. Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina). Universidad Nacional de Córdoba. Tesis Doctoral (inédita). Córdoba.
- Celis, A., Ostuni, F., Kisilevsky, G., Schwartz, E., Fernández Bouzo, S., y Lopresti, L. 2009. Documento País: Riesgos de desastres en Argentina. CAPITULO 5: Cambio climático: variabilidad pasada y una prospectiva de las amenazas de acuerdo a los escenarios futuros. Cruz Roja Argentina, Centro Estudios Sociales y Ambientales. Buenos Aires.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V. y Böhner, J. 2015. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1. 4. Geoscientific Model Development 8 (7), 1991-2007.
- 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.
- D'odorico, P. E., Pérez, D. J., Sequeira, N. y 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., y Perucca, L. P. 2014. Geomorphology and morphometry of the de La Flecha river basin, San Juan, Argentina. Environmental Earth Sciences 72(8): 3227-3237.
- Esper Angillieri, M. Y. 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.
- Estación Dirección Hidráulica 2023 <https://hidraulica.sanjuan.gob.ar/datos%20y%20estadisticas/km101.php>.
- Fauqué, L., Cortés, J.M., Folguera, A. y Etcheverría M. 2000. Avalanchas de roca asociadas a neotectónica en el valle del río Mendoza, al sur de Uspallata. Revista de la Asociación Geológica Argentina 55 (4): 419-423.
- Fauqué, L. E., Cortés, J. M., Folguera, A., y Etcheverría, M. P. 2001. Avalanchas de Rocas Asociadas a Neotectónica en el Valle del Río Mendoza. Peligrosidad Geológica Asociada. Hoja Geológica 3369 – 15. Potrerillos. SEGEMAR. Mendoza, Argentina.
- Fernández, D. S. 2009. Eventos de remoción en masa en la provincia de Tucumán: tipos, características y distribución. Revista de la Asociación Geológica Argentina 65(4): 748-759.
- Fernández, D. S., y Lutz, M. A. 2003. Procesos de remoción en masa y erosión fluvial en la quebrada del río Los Sosa, provincia de Tucumán. Revista de la Asociación Geológica Argentina 58(2): 255-266.
- Gariano, S. L., Rianna, G., Petrucci, O., y Guzzetti, F. 2017. Assessing future changes in the occurrence of rainfall-induced landslides at a regional scale. Science of the total environment 596: 417-426.
- Giaconia, F., Booth-Rea, G., Martínez-Martínez, J. M., Azañón, J. M., Pérez-Peña, J. V., Pérez-Romero, J., y Villegas, I. 2012. Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). Geomorphology 145: 90-106.
- Ginesta Torcivia, C. E., y Rios López, N. N. 2020. Preliminary morphometric analysis: Río Talacasto basin, Central Precordillera of San Juan, Argentina. En Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: 158-168. Springer, Cham.
- Ginesta Torcivia C., Ocaña, R. E., Rios, N., Angillieri, M. Y. E., Fernández, O. M., Alladio, C. G., Fernández O. M. y Ruíz, 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. 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, Universidad Nacional de San Juan (inédita), 130p., San Juan.
- Gonzalez, M. C., y Moreiras, S. M. 2021. El recurso hídrico asociado a lagos en los Andes Centrales de Argentina (31°-36° S). Boletín de Estudios Geográficos 116: 73-101.
- González Díaz, E. F., Folguera, A., y Hermanns, R. 2005. La avalancha de rocas del cerro Los Cardos (37 10 S, 70 53 O) en la región norte de la provincia del Neuquén. Revista de la Asociación Geológica Argentina 60(1): 207-220.
- Greenidge-Moro, S., Rodríguez-Infante, A., y Díaz-Barrios, I. 2020. Geomorfología tectónica del sureste del municipio de Mayarí, provincia de Holguín. Minería y Geología 36(2): 155-171.
- Quezada, J., Cerda, J. L., y 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.
- Guisan, A., Weiss, S. B. y Weiss, A. D. 1999. GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. Plant Ecology 143: 107-122.
- Hassan, S. A., Amlan, H. A., Alias, N. E., Abd Kadir, M. A., y Sukor, N. S. A. 2022. Vulnerability of road transportation networks under natural hazards: A bibliometric analysis and review. International Journal of Disaster Risk Reduction, 103393p.

- Henao Sarmiento, J. E. 1988. Introducción al manejo de cuencas hidrográficas. Universidad Santo Tomás, Centro de enseñanza desescolarizada. Bogotá.
- Jeanneret, P., y Moreiras, S. M. 2018. Inventario de procesos de remoción en masa en la cuenca baja del Río Blanco (31° S), Andes Centrales Argentinos. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 35(3): 215-227
- Jenson, S. K., y 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., y 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., Tzouxioti, M., Petropoulos, A., Santangelo, N., Maroukian, H., Spyrou, E. y 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. y Pinter, N. 1996. *Active tectonics* Vol. 338. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Khajehei, S., Ahmadalipour, A., Shao, W. y Moradkhani, H. 2020. A place-based assessment of flash flood hazard and vulnerability in the contiguous United States. *Scientific Reports* 10(1): 448.
- Lauro, C., Moreiras, S. M., Junquera, S., Vergara, I., Toural, R., Wolf, J. y Tutzer, R. 2017. Summer rainstorm associated with a debris flow in the Amarilla gully affecting the international Agua Negra Pass (30° 20' S), Argentina. *Environmental earth sciences* 76: 1-12.
- Lazzari, M. y Danese, M. 2012. A multitemporal kernel density estimation approach for new triggered landslides forecasting and susceptibility assessment. *Disaster Advances* 5(3): 100–108.
- Lux Cardona, B. 2016. Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas.
- Mamadjanova, G. y Leckebusch, G. C. 2022. Assessment of mudflow risk in Uzbekistan using CMIP5 models. *Weather and Climate Extremes* 35: 100-403.
- Minetti, J. L., Barbieri, P. M., Carletto, M. C., Poblete, A. G. y Sierra, E. M. 1986. El régimen de precipitación de la provincia de San Juan. Informe técnico, 8.
- Moore, I. D., Grayson, R. B. y Ladson, A. R. 1991. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes* 5(1): 3-30.
- Monserrat, A. L. C. 2022. Evaluación de estimaciones satelitales de precipitación nival en la cuenca superior del río San Juan, Argentina. *Revista Geográfica* 164: 83-98.
- Moreiras, S. M., Lenzano, M. G. y Riveros, N. 2008. Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconcagua, provincia de Mendoza-Argentina. *Multequina*, 17(2): 129-146.
- O'Callaghan, J. F. y Mark, D. M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing* 28(3): 323-344.
- Ocaña, R. E., Flores, D. G., Pittaluga, M. A. y 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.
- Othman, A., El-Saoud, W. A., Habeebullah, T., Shaaban, F., y Abotalib, A. Z. 2023. Risk assessment of flash flood and soil erosion impacts on electrical infrastructures in overcrowded mountainous urban areas under climate change. *Reliability Engineering & System Safety* 236: 109302.
- Padilla, S. E. F. y Casimiro, A. F. 2022. Distribución de puestos ganaderos e influencia en los procesos erosivos en la cuenca del río Chuscha (Cafayate, Salta-Argentina). *Lhawet*, 8(8).
- Penna, I. M.; Hermanns, R. L. y Folguera, A. 2008. Remoción en masa y colapso catastrófico de diques naturales generados en el frente orogénico andino (36°-38°s): los casos Navarrete y Río Barrancas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 63(2): 172-180.
- Perucca, L. P. 2016. Geomorfología de San Juan. En Martínez Carretero, E. y García, A. (eds.), *San Juan Ambiental*, 95-116. San Juan.
- Perucca, L. P. y Esper Angillieri, M. Y. 2009. Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: the flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan—November 12, 2005. *Natural hazards* 50: 305-320.
- Pittaluga, M. A. y 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. y Minetti, J. 1989. Los mesoclimas de San Juan, Primera y Segunda parte: San Juan, Argentina, Centro de Investigaciones de San Juan, Universidad Nacional de San Juan, Informe técnico N° 11. Boletín, 4.
- Pravalié, R., y Costache, R. 2014. The analysis of the susceptibility of the flash-floods' genesis in the area of the hydrographical basin of Bâsca Chiojdulei river/Analiza susceptibilitatii genezei viiturilor în aria bazinului hidrografic al râului Bâsca Chiojdulei. *Forum geografic* 13(1): 39. University of Craiova, Department of Geography.
- Riley, S. J., DeGloria, S. D. y Elliot, R. 1999. Index that quantifies topographic heterogeneity. *intermountain Journal of sciences* 5(1-4): 23-27.
- Schönfeldt, E., Winocur, D., Pánek, T. y Korup, O. 2022. Deep learning reveals one of Earth's largest landslide terrain in Patagonia. *Earth and Planetary Science Letters* 593: 117642.
- Schumm, S. A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin* 67(5): 597-646.
- Senciales González, J. M. 1999. *Redes Fluviales. Metodología De Análisis. Estudios Y Ensayos* 34. Universidad De Málaga. (España)
- Soria, T., Heredia, S., Mestre, A. y Rodríguez, C. 2013. Conodontes foianos de la Formación San Juan en la quebrada de Talacasto, Precordillera de San Juan. *Serie correlación geológica* 29(1), 93-106.
- Soto, M. V., Arriagada, J., Cabello, M., Molina, M., y 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 REDER* 6(2), 47-59.
- Strahler, A. N. 1952. Dynamic basis of geomorphology. *Geological society of america bulletin*, 63(9): 923-938.
- Subiela Blanco, G. B., Guinau Sellés, M. y Galve, J. P. 2019. Idoneidad del índice SL para la identificación semi-automática de movimientos en masa que afectan a la red de drenaje. *Boletín Geológico y Minero* 130 (3): 465-487.
- Suvires, G. 1996. Mapa Geomorfológico de la Provincia de San Juan. *Inventario de Recursos de la Región Andina de Argentina*, Junta de Andalucía-Gobiernos y Universidades de la Región Andina Argentina.
- Troiani, F., Piacentini, D., Della Seta, M. y Galve, J. P. 2017. Stream Length-gradient Hotspot and Cluster Analysis (SL-HCA) to fine-tune the detection and interpretation of knickzones on longitudinal profiles. *Catena* 156: 30-41.
- Vargas, M., Rothlis, M., Esper Angillieri, M. Y., Perucca, L. y Vargas, N. 2020. Análisis morfométrico y morfotectónico de dos cuencas fluviales intermontanas colineales y opuestas de la Precordillera, Andes Centrales de Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 72(1).
- Winocur, D. A., Benítez, A., y Barbero, I. 2021. Evidencias de neotectónica en el sector interno de la Faja Plegada y Corrida de Malargüe, valle del río Grande, Mendoza, Argentina. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 73(2).
- Zevenbergen, L. W., y Thorne, C. R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms* 12(1): 47-56.