



Influencia de la litología en la conectividad hidrosedimentológica y suministro de áridos en subcuencas representativas del río Cuarto/Chocancharava (Córdoba, Argentina)

M. Eugenia BENITO^{1,2}, M. Jimena ANDREAZZINI¹ y Susana B. DEGIOVANNI¹

¹Departamento de Geología-Facultad de Ciencias Exactas Físico-Químicas y Naturales-Universidad Nacional de Río Cuarto

²Conicet; Instituto de Ciencias de la Tierra, Biodiversidad y Ambiente (ICBIA)

E-mail: eugeniabenito2@gmail.com

Editor: Romina Sancí

Recibido: 29 de mayo de 2020
Aceptado: 5 de noviembre de 2020

RESUMEN

Para regular la extracción de áridos, en el tramo medio del río Cuarto (Cba), es necesario conocer la tasa de reposición de sedimentos areno-gravosos, que depende de la producción y transferencia de los mismos, desde las principales áreas fuente. Considerando que la litología es un importante factor de control en estos procesos y aprovechando el potencial de integración que brindan los estudios de conectividad, en este trabajo se aplica un índice semicuantitativo para determinar el grado de conexión en dos cuencas menores de diferentes litologías (graníticas y metamórficas). El índice utilizado ($IC = T + Dd + C - B$), basado en trabajo de campo de detalle, considera almacenamientos y vínculos entre ellos en toposecuencias (T), densidad de drenaje (Dd), número de conexiones (C) entre cauces y barreras (B). Esta metodología mostró resultados satisfactorios acordes con observaciones/monitoreo efectuados. En la cuenca granítica del arroyo Arenoso se obtuvo una conectividad moderadamente baja (IC: 0.35), con importantes conexiones sedimentológicas (alta producción de sedimentos y almacenamientos poco estables) y limitada capacidad de transporte (tramos efímeros). En la cuenca metamórfica del arroyo Moyano, la conectividad resultó baja (IC: 0.16) con limitado suministro de sedimentos (menor producción y mayor estabilidad de almacenamientos) pero importante conectividad hidrológica (régimen permanente). En eventos de crecida, la mayor Dd, C y menor cubierta vegetal en ambientes graníticos, favorecen el flujo de agua y transporte de sedimentos en la red de drenaje. Así, las subcuencas graníticas son los principales repositorios de materiales areno-gravosos hacia el tramo medio del río Cuarto.

Palabras clave: Control litológico, índice de conectividad, almacenamientos, vínculos, desconexiones.

ABSTRACT

Influence of lithology on hydrosedimentological connectivity and aggregate provision in representative sub-basins of the Cuarto/Chocancharava river (Córdoba, Argentina).

In order to regulate the extraction of aggregates in the middle reach of Cuarto river (Cba), it is necessary to know the sandy-gravelly sediment replenishment rate, which depends on production and transport of sediment, from the main source areas. Considering that lithology is an important control factor in these processes and taking advantage of the integration potential provided by connectivity studies, in this paper was applied a semi-quantitative index to determine the degree of connection in two smaller basins of different lithology (granitic and metamorphic). The index applied ($IC = T + Dd + C - B$), which is based on detailed field work, considers stora-

ges and linkages between themselves in toposequences (T), drainage density (Dd), number of connections (C) between channels, and barriers (B). This methodology showed satisfactory results according to field observations/monitoring carried out. In the granitic basin of the Arenoso stream, the connectivity was moderately low (IC: 0.35). The sedimentological connections were important (high sediment production and unstable storages), but river transport capacity is limited (ephemeral reaches). In the metamorphic basin of the Moyano stream, the connectivity was low (IC: 0.16). Here there is a limited sediment supply (lower sediment production and high storage stability), although the hydrologic connections are significant (permanent regime). In flood events, the higher Dd, C and lower vegetation cover in the granitic environments, favor the water flow and sediment transport in the drainage network. Therefore, the granitic basins are main repositories of gravelly sands materials towards the middle reach of Cuarto river.

Keywords: *lithological control, connectivity index, storages, linkages, disconnections.*

INTRODUCCIÓN

Planteo del problema y análisis de antecedentes

En el sur de la provincia de Córdoba, desde la última centuria se han observado marcadas alteraciones en el funcionamiento de los sistemas fluviales (Blarasin et al. 1994, Degiovanni et al. 2005 a y b, 2014, Fernández 2018, Santinelli et al. 2020), las cuales generan importantes problemas ambientales que requieren respuestas por parte de los organismos de gestión.

En particular, el río Cuarto/Chocancharava, en su cuenca media muestra desajustes asociados a la extracción de áridos del cauce y terrazas (Degiovanni et al. 2000, Villegas et al. 2000, Degiovanni et al. 2005 a y b, Echevarria et al. 2018). La actividad se concentra especialmente en proximidades de la ciudad de Río Cuarto, incluyendo el ejido urbano, en donde los volúmenes extraídos son muy significativos y en algunos períodos la tasa de extracción de áridos supera a la reposición (Corral et al. 2005, 2007, 2009). Esto provoca alteraciones morfológicas, morfodinámicas y sedimentológicas en el canal e incremento del peligro de erosión/inundación e impactos ambientales en los sectores intervenidos y aledaños (Degiovanni y Cantú 1994, Villegas et al. 2002, Blarasin et al. 2005, Degiovanni et al. 2005b).

En general, para regular la minería de áridos en cauce, es necesario conocer la tasa de reposición de sedimentos, la cual depende de la producción y transferencia desde las principales áreas fuente. Con este propósito varios autores realizaron trabajos en la cuenca del río Cuarto. Entre ellos, Beltramone et al. (2005), utilizando la metodología de Gavrilovic (1972, 1988), concluyen que la cuenca del río Cuarto produce en general un considerable volumen de sedimentos, siendo las subcuencas que drenan rocas ígneas, responsables de los sedimentos de fondo, mientras que aquellas con

rocas esquistosas aportan sedimentos en suspensión. Andreazzini et al. (2014), aplicando la misma metodología en ambiente SIG sobre una de las subcuencas del río Cuarto (río Las Cañitas), indican que existe una notable variabilidad espacial de los parámetros evaluados, vinculada fundamentalmente a diferencias litológicas-geomorfológicas y distribución de las precipitaciones en la cuenca de aporte. Por otra parte, Villegas et al. (2002, 2006) y Degiovanni et al. (2013) realizan estudios texturales y composicionales de la carga de fondo del río Cuarto, aplican modelos numéricos para estimar el transporte y efectúan mediciones directas con trampas de sedimentos. A partir de esto, concluyen que la tasa de reposición de áridos en el tramo medio del río Cuarto varía con las subcuencas de aporte. Aquellas que drenan rocas metamórficas aportan muy poco material areno-gravoso, sus cursos son de régimen permanente y registran los mayores valores de caudal líquido, mientras que las desarrolladas sobre rocas graníticas incorporan importantes volúmenes de estos materiales, poseen régimen temporario/efímero y los caudales pico son de menor magnitud.

Los trabajos citados precedentemente muestran, con distinto grado de detalle, el marcado control que ejerce la litología sobre la producción y suministro de sedimentos en el río Cuarto, y la compleja interrelación que existe entre los aspectos geológicos-geomorfológicos, hidrometeorológicos, bióticos y de uso del territorio de una cuenca. En este contexto, se considera pertinente profundizar en la evaluación del control ejercido por la litología en el funcionamiento del río Cuarto utilizando como herramienta metodológica el potencial de integración que brindan los estudios de conectividad (Wohl et al. 2017).

Conceptos de conectividad hidrosedimentológica en los sistemas fluviales

Heckmann et al. (2018) define la conectividad sedimentológica e hidrológica como el grado en que un sistema facili-

ta la transferencia de sedimentos y agua a través de sí mismo, y en relación con los componentes del paisaje. Cuando disminuye la eficiencia en la transferencia de sedimentos, a causa de diferentes factores, se produce una desconexión y se favorece la deposición, la cual puede tener un tiempo de residencia transitorio (almacenes) o permanente (sumideros, Fryirs 2013). Por lo tanto, el análisis de conectividad en una cuenca permite comprender la morfodinámica de los cursos fluviales y su vinculación con características geológico-geomorfológicas de la misma; es así que se pueden evaluar con mayor eficacia los modos de respuesta de un sistema fluvial ante modificaciones tanto naturales como inducidas en sus variables de control (Messenzehl et al. 2014).

En particular, la conectividad sedimentológica se refiere al grado de vinculación entre las fuentes de sedimentos y las áreas pendiente abajo, mientras que la conectividad hidrológica se asocia a los vínculos internos en la red de drenaje, es decir las relaciones que existen entre la escorrentía, los afluentes, los cauces principales y las fuentes de sedimentos (Croke et al. 2005).

El grado de conectividad en una cuenca se ve afectado por vínculos y bloqueos (Fryirs 2013, Messenzehl et al. 2014, Lexartza-Artza y Wainwright 2009, Brierley et al. 2006). Los vínculos corresponden a procesos que favorecen la transferencia de sedimento, por ende influyen positivamente en la conexión de una cuenca, produciendo un aumento en el grado de conectividad. Estos se clasifican, según Fryirs (2013), en tres tipos: laterales, aquellos que caracterizan las relaciones canal-interfluvio/ladera y canal-llanura de inundación; longitudinales, los que evalúan las relaciones aguas arriba-aguas abajo y tributarios-canal principal; y finalmente, los verticales, los cuales analizan las interacciones superficie-subsuperficie de agua y sedimentos de fondo de canal. En cuenca alta, las mayores pendientes y densidad de drenaje, entre otros, favorecen los vínculos laterales y longitudinales, mientras que en la baja, si bien este tipo de conexiones siguen presentes, se vuelven más eficientes los vínculos verticales (Fryirs 2013, Brierley et al. 2006).

Los vínculos pueden ser interrumpidos por bloqueos, que influyen negativamente en la conexión de una cuenca, disminuyendo su grado de conectividad. Se clasifican en: *buffer*, barreras y cubiertas o capas (*blankets*) (Fryirs 2013, Brierley et al. 2006). Los *buffers* son almacenamientos con importantes tiempos de residencia (ej. abanicos aluviales, terrazas fluviales altas, llanuras de inundación extensas), que impiden la transferencia de sedimentos de las laderas a la red de drenaje, interrumpiendo los vínculos laterales. Las barreras son interrupciones en el canal, es decir que desconectan

los enlaces longitudinales (ej. afloramientos o acumulaciones de sedimentos en el canal). Por último, las cubiertas/capas, protegen ciertos depósitos del retrabajo fluvial (ej. láminas de arena en llanuras de inundación, lecho acorazado/pavimentos) e interrumpen los enlaces verticales.

Para evaluar el grado de conectividad, analizando el flujo de sedimentos de una cuenca, Messenzehl et al. (2014) proponen una metodología de estudio basada en toposecuencias. Estas consisten en transectas, desde las divisorias de agua hasta los canales, que representan una zona de la cuenca con iguales características geomorfológicas (pendiente, altitud y distancias a la divisoria de drenaje), procesos geomorfológicos de transferencia de agua-sedimentos y ambientes de sedimentación. Esto permite diferenciar distintas unidades de almacenamiento sedimentario y determinar la existencia de vínculos o bloqueos entre éstos con la red de drenaje, proporcionando una valiosa herramienta para evaluar las relaciones de conectividad o las desconexiones.

Por otra parte, otros autores han desarrollado índices de conectividad (Borselli et al. 2008, Cavalli et al. 2013, entre otros), basados fundamentalmente en parámetros morfométricos (preferiblemente topográficos) obtenidos a partir de modelos digitales de elevación (MDE) de alta resolución (píxeles de 0.25-10 m). Cantreul et al. (2018) y Graf et al. (2019) proponen que para llevar a cabo un estudio de conectividad apropiado, se debe utilizar un tamaño mínimo de píxel de 1 m. Para tener un enfoque integral de la cuenca, Brierley et al. (2006) establecen que para la evaluación de la conectividad se debe realizar un análisis a diferentes escalas, efectuando una caracterización y mapeo de vínculos-bloqueos en cualquier nivel de jerarquía, teniendo en cuenta que la conectividad varía en el espacio y en el tiempo (Hooke 2003). No obstante las ventajas (económicas, tiempo) que implica la obtención de índices a partir de herramientas de teledetección de alta resolución, algunos autores como Borselli et al. (2008), plantean la necesidad de validar los resultados obtenidos, con otros basados en observaciones de campo.

Objetivos

Considerando que la conectividad hidrosedimentológica en una cuenca es un indicador sensible de la variabilidad espacial en la producción y transferencia de sedimentos en la misma, y que estos procesos están fuertemente controlados por la litología, el objetivo de este trabajo es estimar el grado de conectividad en dos subcuencas del río Cuarto, ubicadas en distintos contextos litológicos, aplicando un índice de conectividad.

CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMORFOLÓGICO Y CLIMA DEL ÁREA DE ESTUDIO

El río Cuarto drena rocas de basamento ígneo-metamórfico del faldeo oriental de la Sierra de Comechingones (Sierras Pampeanas de Córdoba). Los estudios se realizaron en dos cuencas menores que forman parte de la subcuenca del río Las Cañitas. Se seleccionaron las cuencas de los arroyos Arenoso (0.62 km² - 32°44'15.25"S - 64°48'46.02"O) y Moyano (2.17 km² - 32°45'20"S - 64°49'15"O) que drenan rocas ígneas y metamórficas, respectivamente (Fig. 1a).

Las rocas ígneas pertenecen al batolito granítico Cerro Áspero (Coniglio et al. 2001, Pinotti et al. 2014), mientras que las metamórficas corresponden a milonitas y ultramilonitas de la Faja de Cizalla Guacha Corral y a gneis-migmatíticos del Complejo Monte Guazú (Otamendi et al. 2000, Fagianó 2007, Rey Ripoll 2008, Cristofolini et al. 2016; Figs. 1a y 2). Estas últimas, debido a su moderado a alto grado de metamorfismo, presentan en general menor alteración que las graníticas (especialmente las facies de mayor tamaño de grano y grado de fracturamiento). Las milonitas muestran un notable grado de alteración, siendo localmente importantes los procesos de argilitización. Este grado de resistencia de las rocas a la meteorización/erosión es una importante variable de control en el relieve. Por consiguiente, en la cuenca arroyo Moyano (cota máx-med-min: 1270-1115-1010 m s.n.m. y pendiente máx-med-min: 55- 18- 0.5 %; Fig. 3b), las zonas de mayor altura (1270- 1170- 1030 m s.n.m.) y pendiente (55- 33- 22 %; Fig. 3b) están conformadas por gneis-migmatíticos, los cuales generan relieves crestiformes, mientras que los sectores más deprimidos (1130- 1107- 1010 m s.n.m.) y de menor pendiente (13- 8- 0.5 %; Fig. 3b), corresponden a fondos de valles labrados en rocas protomilonitas (Fig. 2b). En contraparte, la cuenca del arroyo Arenoso posee cotas menores (máx-med-min: 1142- 1082- 1027 m s.n.m.), pendientes que varían entre 46- 0.5 % con una media de 20 % (Fig. 3a) y no muestra variaciones de facies en la litología constituyente (Fig. 2a), por lo que no se destacan grandes desniveles en el relieve por erosión diferencial. Sin embargo, se pueden distinguir, en sectores de mayor altura (1142- 1090- 1070 m s.n.m.) y pendiente (46- 35- 27 %; Fig. 3a), formas de erosión típicas de este ambiente, como domos redondeados cubiertos por bolos y bloques. Las partes más bajas (altura máx-med-min: 1050- 1031- 1027 con pendientes máx-med-min 27- 14- 0.5 %; Fig. 3a) de estas superficies graníticas están representadas por valles fluviales con distinto grado de incisión. Según Pedraza et al. (1996) y Vidal Romaní y Twidale (1998), este arreglo de

formas configuran un relieve granítico evolucionado, como lo indican Andreazzini y Degiovanni (2014).

Los depósitos sedimentarios de relleno de valles y cubierta de laderas (Fig. 2), poseen predominantemente granulometría areno-gravosa a limo-arenosa, y corresponden mayoritariamente a materiales retransportados a través de flujos laminares y/o hiperconcentrados que incluyen altas proporciones de sedimentos eólicos primarios. En forma más localizada, se disponen depósitos coluviales de bloques, aluviales de mallín y fluviales (Andreazzini et al. 2013, 2017, 2020).

En ambas cuencas se reconocen estructuras frágiles de distinta magnitud, principalmente de rumbos NO-SE, NE- SO, N-S, fracturas radiales y anulares, asociadas al contacto entre el batolito Cerro Áspero y la roca hospedante, las cuales controlan la orientación y el diseño de la red de drenaje (Fig. 2).

La sierra de Comechingones y piedemonte oriental tienen un clima mesotermal subhúmedo (Giuliano y Blarasin 2014). En el sector serrano del área de estudio, los registros en la estación La Cumbre (2012-2019) muestran una precipitación media anual (Pma) de 767.7 mm (los años 2016 y 2017 no se consideraron debido a problemas con el pluviómetro), con un valor máximo de 919.7 mm en 2014, destacándose el mes de febrero de dicho año con un total de 381.7 mm (Fig. 1b). En el sector pedemontano, el registro de la serie Las Tapias-Los Chañares (1939-2019) muestra una Pma de 910.18 mm, con una marcada alternancia de períodos húmedos-secos y una tendencia ascendente de las precipitaciones a partir del año 1972 (Fig. 1c). Los registros de ambas estaciones indican que el 80 % de las lluvias se concentran en primavera-verano. De los registros cortos y discontinuos disponibles (2008-2011 y 2016-2017), pertenecientes a particulares (Puesto Vilchez), se establece que durante la estación lluviosa las máximas precipitaciones medias mensuales son de 181.5 mm en el mes de diciembre y 170 mm durante el mes de enero. De este registro se destaca la máxima precipitación diaria de 90 mm (08/03/2016), mientras que la mínima es de 3 mm (03/07/2016, Fig. 1d).

METODOLOGÍA

Índice de conectividad

Considerando lo planteado por varios autores (entre ellos, Cavalli et al. 2013, Cantreul et al. 2018, Graf et al. 2019) no siempre resulta factible la aplicación de los índices de conectividad disponibles en la literatura (Borselli et al. 2008, Cavalli et al. 2013, entre otros), debido a que, en muchos casos, no

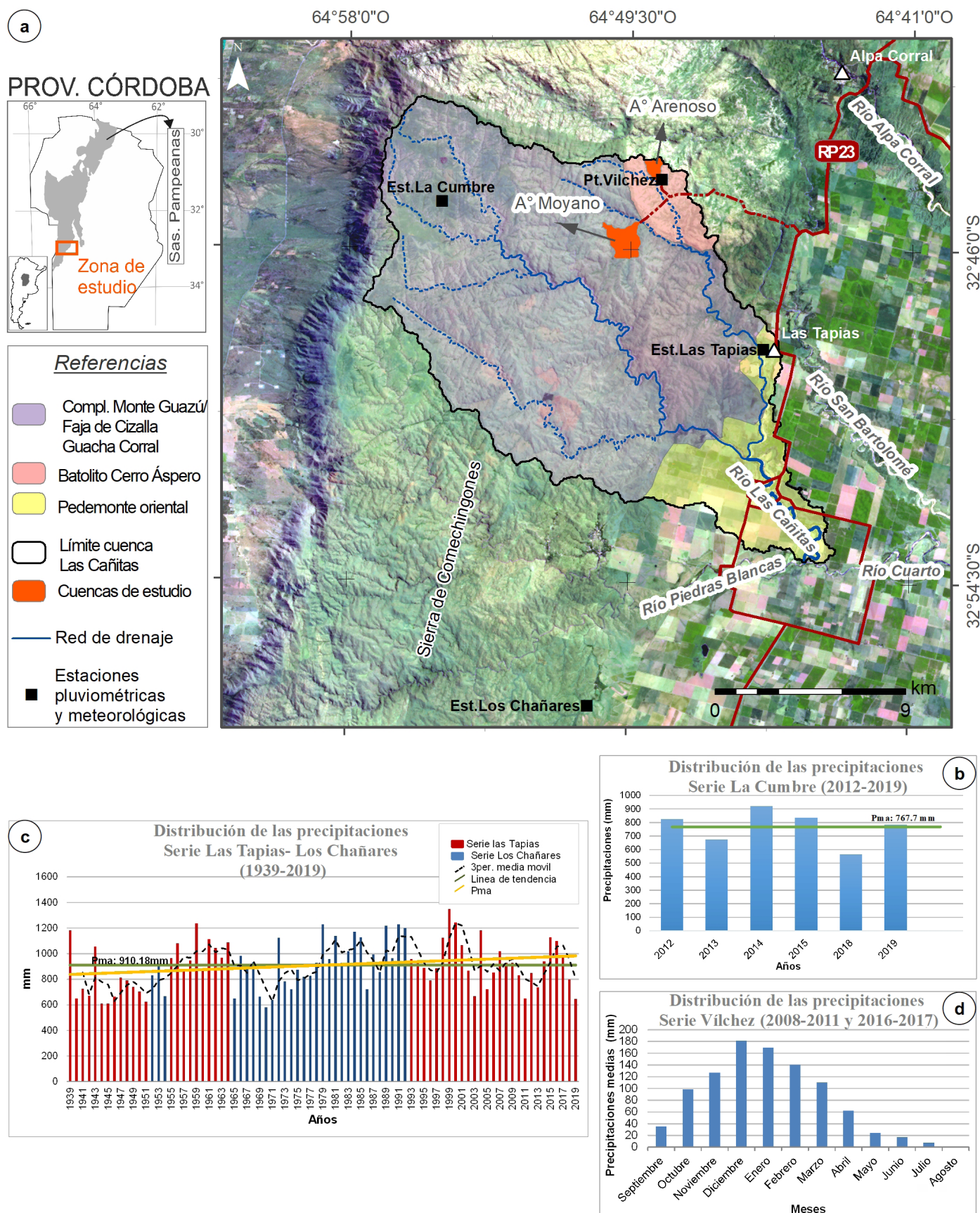


Figura 1: a) Ubicación del área de estudio en la cuenca Las Cañitas (sur Sa de Comechingones-Córdoba); b) Curva de distribución de precipitación media anual de la serie La Cumbre (2012-2019); c) Curva cronológica anual de precipitaciones de la serie Las Tapias-Los Chañares (1939-2019) actualizado de Andreazzini (2015); d) Curva de distribución de precipitación media mensual de la serie Vilchez (2008-2011 y 2016-2017).

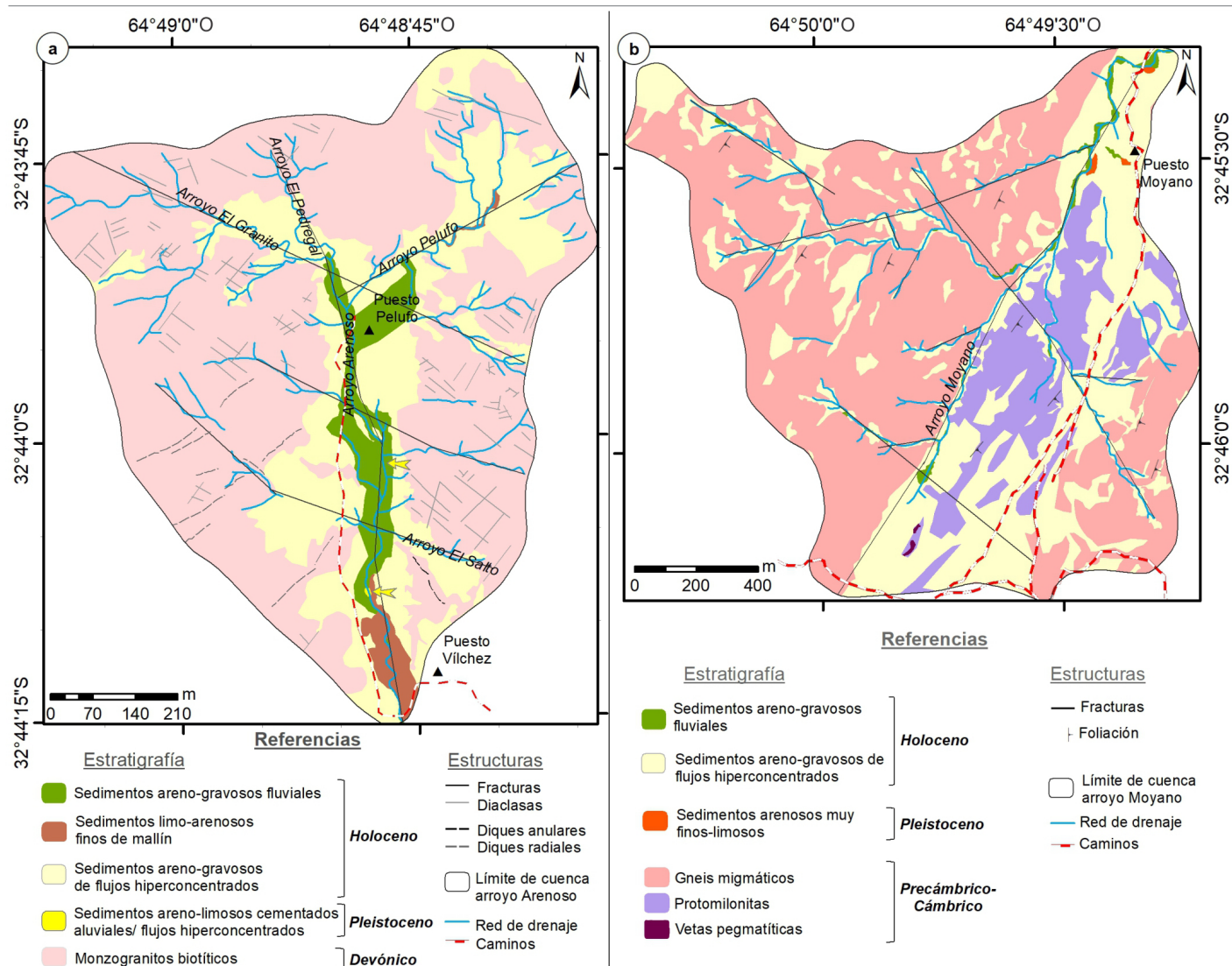


Figura 2: Mapas geológicos de las cuencas arroyo Arenoso (a) y Moyano (b)

se cuenta con modelos digitales de elevación de alta resolución. Es así, que en la búsqueda de alternativas para estudiar y estimar el grado de conectividad en la cuenca del río Cuarto, en el presente trabajo se aplica un índice de conectividad (IC) prospectivo definido por Andreazzini et al. (2018) y Andreazzini et al. (2021), en dos subcuencas representativas de litologías contrastantes. La selección de cuencas de pequeñas dimensiones responde a aspectos metodológicos, accesibilidad y cercanía, pero además en las mismas se están llevando a cabo estudios complementarios (estratigráficos-geocronológicos, geofísicos, entre otros; Andreazzini et al. 2020) que podrían ayudar en la comprensión de la conectividad a largo plazo. Es por esto que se consideran como cuencas piloto o de prueba, en esta etapa.

Este índice (IC) permite evaluar las variables y procesos que controlan la conectividad sedimentológica e hidrológica

en pequeñas cuencas hidrográficas que no se encuentran monitoreadas. Fue elaborado a partir de la integración del marco teórico establecido por autores precursores de esta temática (Fryirs et al. 2007, Miller et al. 2012, Fryirs 2013, Brierley et al. 2006, Messenzehl et al. 2014, entre otros), considera variables cualitativas y cuantitativas a nivel de cuenca (litología, morfodinámica, pendientes e hidrografía) y presenta un fuerte apoyo en datos de campo. Por esta razón es recomendable aplicarlo en cuencas de superficie reducida para evitar generalizaciones y subestimaciones en el mapeo.

El mapeo de las variables consideradas se efectuó a escala de detalle/semidetalle a partir mapas topográficos escala 1: 50.000 del Instituto Geográfico Nacional (1950), fotografías aéreas escala 1:20000 (1970), un modelo digital de elevación ALOS PALSAR (resolución de 12.5 m), imágenes de satélite de Google Earth y Bing e información relevada a campo.

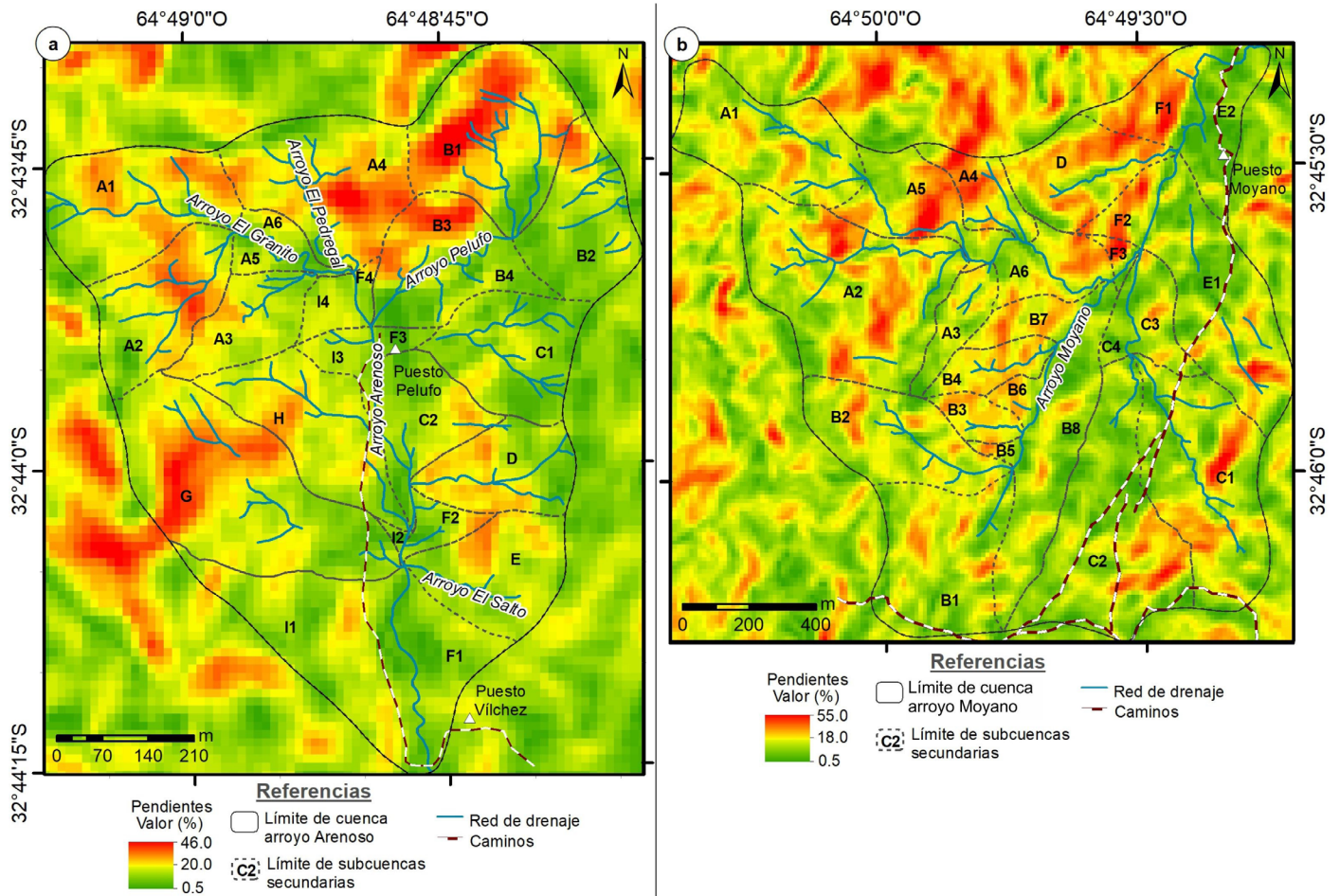


Figura 3: Mapa de pendientes (%), red de drenaje y subcuencas secundarias de las cuencas arroyo Arenoso (a) y Moyano (b)

El índice de conectividad (IC) se determinó para cada subcuenca secundaria, y responde a la siguiente ecuación:

$$IC = T + Dd + C - B \quad (1)$$

En donde,

T: Toposecuencias, estiman el grado de conexión lateral de cada cuenca. A partir de los modelos digitales de elevación y teniendo en cuenta las imágenes satelitales, los mapas de almacenamientos, topográficos y de pendientes, se realizaron manualmente diferentes perfiles topográficos (desde las divisorias de agua hasta los cauces) en ambiente SIG. Los mismos se agruparon en clases principales, se evaluaron las características mencionadas por Messenzehl et al. (2014) y a partir de esto se señalaron los vínculos laterales con símbolos de interruptores verdes (conexiones), mientras que los buffers con símbolos de interruptores rojos (desconexiones) (ejemplo en Cuadro 2). En función de la frecuencia y ubicación de estas conexiones o desconexiones, a cada tipo de toposecuencias se le asignó un valor entre 0 y 1, correspondiendo este último a las toposecuencias que presentan la mayor conexión lateral, mientras que en aquellas donde aparecen buffers, se establecieron valores menores a 1. Según Andreazzini et al.

(2018) y Andreazzini et al. (2021) la densidad de toposecuencias que se establece para cada cuenca de estudio debe ser representativa de las características del paisaje. El valor final para cada subcuenca surge del promedio ponderado, de la cantidad y tipo de toposecuencias presentes en la misma.

Dd: Densidad de drenaje, corresponde a la longitud total de los canales definidos por unidad de área y representa los vínculos longitudinales. Los valores obtenidos para cada subcuenca se ponderan entre 0 y 1, considerando 1 la máxima densidad de drenaje obtenida en ambas cuencas, para poder compararlas entre sí.

C: Conexiones, corresponde al número de conexiones/confluencias entre cursos de distinto orden en cada subcuenca y complementa a la anterior variable para el análisis de los vínculos longitudinales, ya que dos subcuencas pueden presentar la misma densidad de drenaje, pero diferente número de conexiones. Los valores obtenidos para cada subcuenca se ponderan entre 0 y 1, correspondiendo 1 al mayor número de conexiones obtenido en ambas cuencas.

B: Barreras, determina número y tipo de desconexiones en la red de drenaje, es por esto que en el índice se resta,

ya que disminuye el grado de conexión. A cada tipo de barrera reconocida en la cuenca se le asignó un rango de valor, dependiendo de las características (tamaño, posición y área afectada por las mismas), en donde 1 representa la máxima desconexión longitudinal. Luego, para cada subcuenca, se obtuvo un promedio ponderado de los valores que surgen de multiplicar la cantidad de cada tipo de barreras por el valor establecido para cada una.

Como resultado de la aplicación de la ecuación (1) se obtiene un valor de IC adimensional para cada subcuenca secundaria, cuyo máximo valor posible es 3. Es por esto que los valores del IC se normalizaron nuevamente entre 0 y 1 (IC_n). A partir del IC_n, se definieron cinco clases de conectividad: Alta (1-0.8), Moderadamente alta (0.8-0.6), Moderada (0.6-0.4), Moderadamente baja (0.4-0.2) y Baja (0.2-0), y se obtuvo el mapa de conectividad para las distintas subcuencas secundarias.

Finalmente, se determinó el índice normalizado de las subcuencas principales (IC_{n_T}), ponderando el IC_n de cada subcuenca secundaria, según su área. Posteriormente, el total de áreas conectadas de estas subcuencas principales se promediaron con el área de cada cuenca principal (cuencas arroyo Arenoso y arroyo Moyano).

Además, para complementar este índice se aplicó el análisis propuesto por Miller et al. (2012), el cual consiste en ponderar el área total con el área conectada aguas arriba de las principales confluencias. Este análisis se lleva a cabo en dirección aguas abajo para conocer las variaciones de la conectividad en las dos cuencas principales.

Cabe aclarar que en esta etapa del trabajo no se tuvieron en cuenta los vínculos verticales cuya evaluación demanda el seguimiento de secciones transversales de detalle.

Monitoreo de vínculos y análisis de precipitaciones

Para evaluar la transferencia de sedimentos tanto en el canal como en las laderas (vínculos longitudinales y laterales, respectivamente) se monitoreó: 1) el desplazamiento de clastos de roca (eje mayor entre 5 y 20 cm) previamente coloreados, fotografiados, georreferenciados con GPS en almacenamientos representativos, 2) el retroceso de cárcavas (erosión hídrica) mediante la colocación de estacas georreferenciadas, y 3) procesos de erosión en laderas y abanicos coluviales comparando secciones de control en diferentes estaciones del año.

Los datos obtenidos se correlacionaron con los registros pluviométricos asociados al periodo de monitoreo (2016-2017) de la zona de estudio (Puesto Vilchez).

Para complementar el monitoreo de procesos activos se

realizaron aforos instantáneos y se estimaron caudales de crecida, utilizando marcas de crecida para definir la sección de paso y el método de Manning (Chow 1959) para estimar velocidad.

RESULTADOS

Características de las cuencas de estudio

Aspectos hidrográficos-hidrológicos: En ambas cuencas la red de drenaje presenta un diseño angular a rectangular en los colectores principales y subdendrítica en los cursos de bajo orden.

El arroyo Arenoso es de orden 4 e incluye 9 subcuencas principales, que se subdividen en subcuencas secundarias (Fig. 3a). Las de mayores dimensiones y desarrollo de la red de drenaje son las cuencas A y B, drenadas por los arroyos El Granito y Pelufo, respectivamente. De las restantes, algunas no tienen colectores definidos y/o desarrollan cárcavas (C2, F e I), mientras que otras presentan colectores de orden 1 y 2 (C1, D, E, G y H). Los tributarios principales son efímeros y tienen lecho mixto (rocoso/areno-gravoso), aumentando el aluvión de fondo previo a su confluencia y origen del arroyo Arenoso. El tramo superior del colector principal es efímero, de diseño entrelazado, con lecho aluvial y márgenes rocosas. En el tramo medio, el canal ha incidido en basamento, su lecho es rocoso y exhibe knickpoints en el perfil longitudinal. Este segmento es de régimen permanente y hacia aguas abajo se vuelve efímero/estacionario. En el tramo inferior el canal es aluvial, de diseño meandriforme, se encuentra incidido en secuencias limo-arenosas de mallín y su régimen es permanente.

Por su parte, la cuenca del arroyo Moyano, de orden 4, se compone de 6 subcuencas principales, algunas de las cuales incluyen subcuencas secundarias (Fig. 3b). Las subcuencas A, B, C y D, presentan colectores de mayor orden (hasta 3), mientras que las restantes E y F no poseen colectores definidos o bien éstos son de orden 1 y 2. En general, esta cuenca presenta una red de drenaje permanente, los tributarios del sector occidental, que drenan una zona con máximas pendientes (Fig. 3b), poseen un canal de lecho rocoso con un diseño rectilíneo, y son relativamente angostos e incididos, mientras que los afluentes del sector oriental, los cuales drenan una zona de bajas pendientes (Fig. 3b), están poco incididos y presentan lecho mixto. El colector principal, controlado por la Faja de Cizalla Guacha Corral, presenta un canal aluvial, rectilíneo, angosto y poco profundo que se hace más sinuoso en su tramo inferior.

En ambos arroyos, los eventos de crecida tienen carác-

ter torrencial, y se estimaron durante el período de monitoreo caudales variables entre 4.5 y 8 m³/seg para el arroyo Arenoso y del orden de 15.5 m³/seg para el arroyo Moyano. En estiaje los caudales medidos fueron del orden de 0.005 y 0.036 m³/seg, respectivamente.

Tipos de almacenamientos: Los diferentes almacenamientos de sedimentos, identificados a partir de las caracte-

terísticas litológicas y geomorfológicas de ambas cuencas, fueron clasificados en nueve tipos (Cuadro 1, Figs. 4 y 5).

Análisis de las variables del Índice de conectividad (IC)

Tipos de toposecuencias: Debido a que ambas cuencas se asocian a dos ambientes litológicos y geomorfológicos

Cuadro 1. Tipos de almacenamientos en las cuencas arroyo Arenoso y Moyano

| Tipo | Arroyo Arenoso | Arroyo Moyano | Estabilidad | Tiempo de residencia |
|---|--|---|---|--|
| | Descripción | Descripción | | |
| 1-Taludes con bloques de regolito | Bloques (30 cm de eje mayor) que rodean afloramientos rocosos. Espesor: 0.30 m. Área: 48 ha. Baja cobertura vegetal. Cota: 1130-1070 m s.n.m.; Pendiente: 42-27 %. | Bloques con gravas arenosas y loess, interdigitados con afloramientos rocosos. Espesor: 0.50 m. Área: 130 ha. Importante cobertura vegetal. Cota: 1270-1030 m s.n.m.; Pendiente: 55-20 %. | Alta. Solo en la cuenca arroyo Arenoso se movilizan durante eventos extraordinarios. | Permanente |
| 2-Superficies arenizadas | Arenas gruesas y gravas, situados al pie de afloramientos. Espesor: 0.15 m. Área: 18 ha. Baja cobertura vegetal. Cota: 1130-1060 m s.n.m.; Pendiente: 24-18 % | Gravas y arenas gruesas. Asociadas a afloramientos. Espesor: 0.10 m. Área: 0.92 ha. Baja cobertura vegetal. Cota: 1120-1080 m s.n.m.; Pendiente: 20-13 %. | Baja. Fuente de sedimentos activos y susceptibles al transporte | Temporario |
| 3-Taludes con cubierta coluvial moderna | Gravas-arenosas gruesas de flujos hiperconcentrados. Espesor: 0.6-4 m. Área: 16 ha. Importante cobertura vegetal. Cota: 1070 a 1030 m s.n.m.; Pendiente: 18-11 %. | Arenas-gravosas de flujos hiperconcentrados modernos. Espesor: 2-0.3 m. Área: 76 ha. Importante cobertura vegetal. Cota: 1130 a 1010 m s.n.m.; Pendiente: 7-2 %. | Alta. Notorio desarrollo local de cárcavas. | Permanente |
| 4- Terrazas fluviales | Terrazas de agradación: conformadas por materiales arenas-gravosas con dos niveles diferentes. El superior es de gran extensión areal, altura 4 m y muy vegetado, mientras que el inferior es más reducido, altura 1-2 m y escasa cubierta vegetal. Terrazas erosivas: secuencias de flujos hiperconcentrados (2 m de alto). Poca a nula cubierta vegetal. Cota: 1050 y 1010 m s.n.m.; Pendiente: 11-7 %. | Terrazas de agradación: arenas gravosas. Espesor 1 m aprox. Área: 2 ha. Importante cubierta vegetal. Cota: 1050-1010 m s.n.m.; Pendiente: 6-1 %. | Medio a Alta. Los niveles de terraza más antiguos son estables y los niveles inferiores son inestables. | Terrazas de agradación: Permanente/ Temporario. Terrazas erosivas: Permanente |
| 5- Depósitos fluviales de cauce actual | Gravas media a muy fina. Área: 0.45 ha. No están vegetados. Cota: 1040-1010 m s.n.m.; Pendiente: 11-2 %. | Arenas gruesas, gravas y aglomerados. Área: 0.8 ha. No están vegetados. Cota: 1070-1010 m s.n.m.; Pendiente: 6-1%. | Baja. Fuentes de sedimentos activas, sujetas al transporte. | Temporario |
| 6-Depósitos aluviales y/o flujos hiperconcentrados antiguos | Arenas limosas con cemento carbonático. Son escasos y discontinuos afloramientos (Área: 6 m ²) en el fondo del canal, que cubren el basamento. | Arenas muy finas con cemento carbonático y arcillas de secuencias loessoides. Espesor: 1-2 m. Área: 0.19 ha. Con cubierta vegetal. Cota: 1040-1010 m s.n.m.; Pendiente: 2-4 %. | Medio a Alta, por la composición que presenta. Desarrollo de cárcavas. | Permanente |
| 7-Paleomallín | Limo-arenosos con materia orgánica y arcillas. Espesor: 3-4 m. Área: 0.81 ha. Desarrollo edáfico. Cota: 1030-1010 m s.n.m.; Pendiente 11-1 % | No posee | Alta, debido a la composición que presenta. | Permanente |
| 8-Mallín activo | Limo-arenosos finos. Área: 0.07 ha. Importante cobertura vegetal. Cota: 1060-1050 m s.n.m.; Pendiente: 4-1 % | Limo-arenosos finos. Área: 0.01-0.20 ha. Importante cobertura vegetal. Cota: 1270-1170 m s.n.m.; Pendiente: 25-20 % | Alta. Localmente erosión de márgenes. | Permanente |
| 9-Abanicos coluviales | Gravo-arenosa. Área: 0.08 ha (3.8-1.40 m de alto). No tienen cobertura vegetal. Cota: 1040-1010 m s.n.m.; Pendiente: 11-2 %. | No posee | Baja. Fuentes de sedimentos activas, sujetas al transporte. | Temporario |

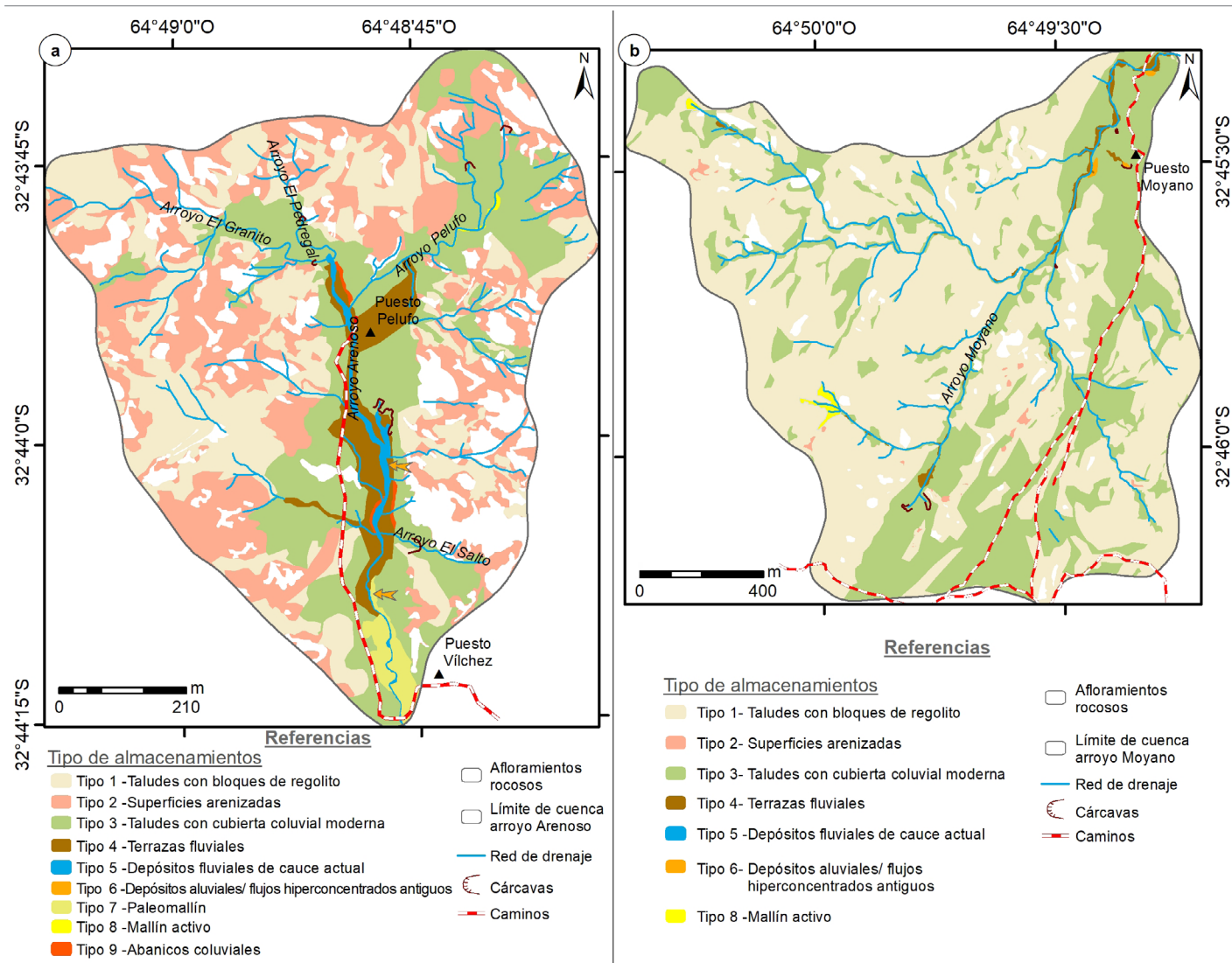


Figura 4: Mapas de almacenamientos de las cuencas arroyo Arenoso (a) y Moyano (b)

distintos, se reconocieron diferentes tipos de toposecuencias, las cuales fueron valoradas de acuerdo a su grado de conectividad (Cuadro 2, Figs. 5 y 6).

En la cuenca arroyo Arenoso, tal como se indicó, se estableció una densidad de 2 T/ha, considerada representativa de la notoria variabilidad de almacenamientos y procesos activos que se reconocieron durante el relevamiento de campo y monitoreo. Como resultado fueron analizadas 124 toposecuencias (Fig. 6a) observándose un predominio de las tipo A (42 %) y B (37 %), en las nacientes de los tributarios de orden 1 o 2. Las de tipo C (7.3 %, Fig. 5a) y D (7.3 %) se asocian al canal principal, mientras que las tipo F (4 %) se registran solamente en cuenca baja. Las del tipo E se asocian a procesos de cárcavamiento y en esta cuenca son las menos frecuentes (2.4 %).

En la cuenca del arroyo Moyano, debido a la poca heterogeneidad en los almacenamientos dominantes y especial-

mente, a la estabilidad de los mismos, se utilizó una densidad menor (0,3 T/ha). De las 66 toposecuencias analizadas, como se muestra en la Fig. 6b, dominan las de tipo G (53 %) y H (36.4 %, Fig. 5b) en las nacientes de los tributarios de orden 1 o 2. Las de tipo J (4.5 %) se registran solamente en cuenca baja, representando sectores de poca pendiente con superficies suavemente onduladas. Finalmente el tipo I (6.1 %) representa sectores de cárcavas.

Densidad y Conexiones de drenaje: La máxima densidad de drenaje obtenida por subcuenca secundaria en la cuenca arroyo Arenoso fue de 0.04 m⁻¹, mientras que en la cuenca arroyo Moyano de 0.011 m⁻¹. A partir de lo establecido en la metodología, para determinar el IC, se asignó el valor 1 a la mayor densidad de drenaje obtenida en ambas cuencas (0.04 m⁻¹).

En cuanto a las conexiones en la red de drenaje, se establecieron 77 en la cuenca arroyo Arenoso, siendo 8 el mayor

Cuadro 2. Tipos de toposecuencias en las cuencas arroyo Arenoso y Moyano

| Tipo y descripción | Representación esquemática |
|---|--|
| <p>Tipo A: Los almacenamientos 1 y 2, durante los eventos de precipitaciones, son transportados por la ladera (Figs. 10a y 10b) hasta los canales de bajo orden por caída y reptación de bloques o por arroyada difusa. Son frecuentes en los niveles topográficos más altos de todas las toposecuencias.</p> <p>Valor establecido: 1</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |
| <p>Tipo B: Los almacenamientos tipo 3 actúan como buffer debido a su desconexión con el canal principal. Durante las crecidas aportan sedimentos al canal por erosión de márgenes.</p> <p>Valor establecido: 0.4</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |
| <p>Tipo C: Estas toposecuencias presentan terrazas fluviales (tipo 4), que se conectan al canal principal por los almacenamientos tipo 9.</p> <p>Valor establecido: 0.8</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |
| <p>Tipo D: Los almacenamientos tipo 3 (buffer) se conectan, localmente, a través de abanicos coluviales (tipo 9) con el tipo 4. Las terrazas más altas actúan como buffer. Los niveles inferiores son erosionados lateralmente durante las crecidas. Las terrazas erosivas son resistentes, pero se generan desprendimientos de material, que se incorporan al canal.</p> <p>Valor establecido: 0.7</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |
| <p>Tipo E: Los almacenamientos tipo 3 (buffer) están afectados por cárcavas activas (Fig. 11a), que aportan sedimentos al canal principal.</p> <p>Valor establecido: 0.6</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |
| <p>Tipo F: Almacenamientos tipo 7 (buffer) generan una desconexión con el canal principal. Debido a la altura de las barrancas se producen desprendimientos de bloques al canal.</p> <p>Valor establecido: 0.2</p> | <p>Elevación (m s.n.m.)</p> <p>Distancia (m)</p> |

Cuenca arroyo Arenoso

Cuadro 2. (Cont.) Tipos de toposecuencias en las cuencas arroyo Arenoso y Moyano

| | | |
|----------------------|---|--|
| Cuenca arroyo Moyano | <p>Tipo G: Los almacenamientos tipo 2, están aislados y desconectados por los de tipo 1 y 3 (buffer, Fig. 10e). Esto es frecuente en los niveles topográficos más altos de todas las toposecuencias. Durante las crecidas, los arroyos de bajo orden tienen baja tasa de incisión y erosión de lecho de fondo (almacenamientos tipo 5).</p> <p>Valor establecido: 0.3</p> | |
| | <p>Tipo H: Durante las crecidas, los almacenamientos tipo 4 aportan sedimentos al canal por erosión de márgenes.</p> <p>Valor establecido: 0.2</p> | |
| | <p>Tipo I: Los almacenamientos tipo 3 (buffer) se encuentran afectados por cárcavas. Algunas de ellas son de menores dimensiones y están parcialmente activas, aportando sedimentos al canal principal. Sin embargo, la mayoría están inactivas (Fig. 11b), con afloramientos aislados de basamento y muy estables.</p> <p>Valor establecido: 0.4</p> | |
| | <p>Tipo J: Los almacenamientos tipo 6 son muy estables con desprendimientos de bloques sobre los de tipo 4 y 5. Estos últimos, tienen una importante cubierta vegetal, pero durante crecidas, aportan sedimento al canal por erosión de márgenes.</p> <p>Valor establecido: 0.6</p> | |

número de conexiones por subcuenca secundaria (Fig. 6a), mientras que en la cuenca arroyo Moyano se definieron 43 conexiones, siendo 7 el mayor número por subcuenca secundaria (Fig. 6b). En este caso, también se asignó 1, como valor para el cálculo del IC, al mayor número de conexiones en ambas cuencas (valor 8).

Se considera pertinente destacar que la cuenca arroyo Arenoso tiene una densidad de drenaje y número de conexiones importantes, sin embargo, debido a sus características litológicas, la mayoría de los cursos son efímeros, generando una red de drenaje menos integrada. En contraparte, la cuenca arroyo Moyano tiene una densidad de drenaje cuatro veces menor pero un importante número de conexiones y una red permanente, lo que muestra un alto grado de integración en la red de drenaje.

Barreras: A partir del análisis realizado se discriminaron 6 tipos de barreras en la cuenca arroyo Arenoso, de las cuales 4 fueron también identificadas en la cuenca arroyo Moyano (Fig. 6b y 7). Los tipos de barreras fueron ponderadas, como se describió en la metodología, de acuerdo al grado de desconexión que generan (Cuadro 3).

En la cuenca arroyo Arenoso se reconocieron en total 18 bloqueos en la red de drenaje, siendo los más recurrentes las barreras tipo VI (39 %, Fig. 7f) y V (33.3 %). El 28% de las mismas se concentran en la subcuenca secundaria B2 (Fig. 3a). El porcentaje restante se ubica en proximidades/salida de las distintas subcuencas secundarias (0- 3 barreras/subcuenca) o en el cauce principal del arroyo Arenoso (Fig. 6a), como es el caso del tipo III (Fig. 7c).

En la cuenca arroyo Moyano se reconocen en total 15 ba-



Figura 5: Vista representativa de tipos de almacenamientos y toposecuencias. a) toposecuencia tipo C de la cuenca arroyo Arenoso; b) toposecuencia tipo H de la cuenca arroyo Moyano.

reras, siendo el tipo IV (53.3 %, Fig. 7e) el más frecuente, seguido por el tipo VI (26.7 %, Fig. 7e). Estas se distribuyen de manera homogénea en toda la cuenca, presentando entre 0- 2 bloqueos por subcuena secundaria (Fig. 6b).

Cálculo del Índice de Conectividad

En los cuadros 4 y 5, y figura 8 se presentan los ICn (subcuencas secundarias) y ICn_T (subcuencas principales), de las cuencas de los arroyo Arenoso y Moyano, respectivamente.

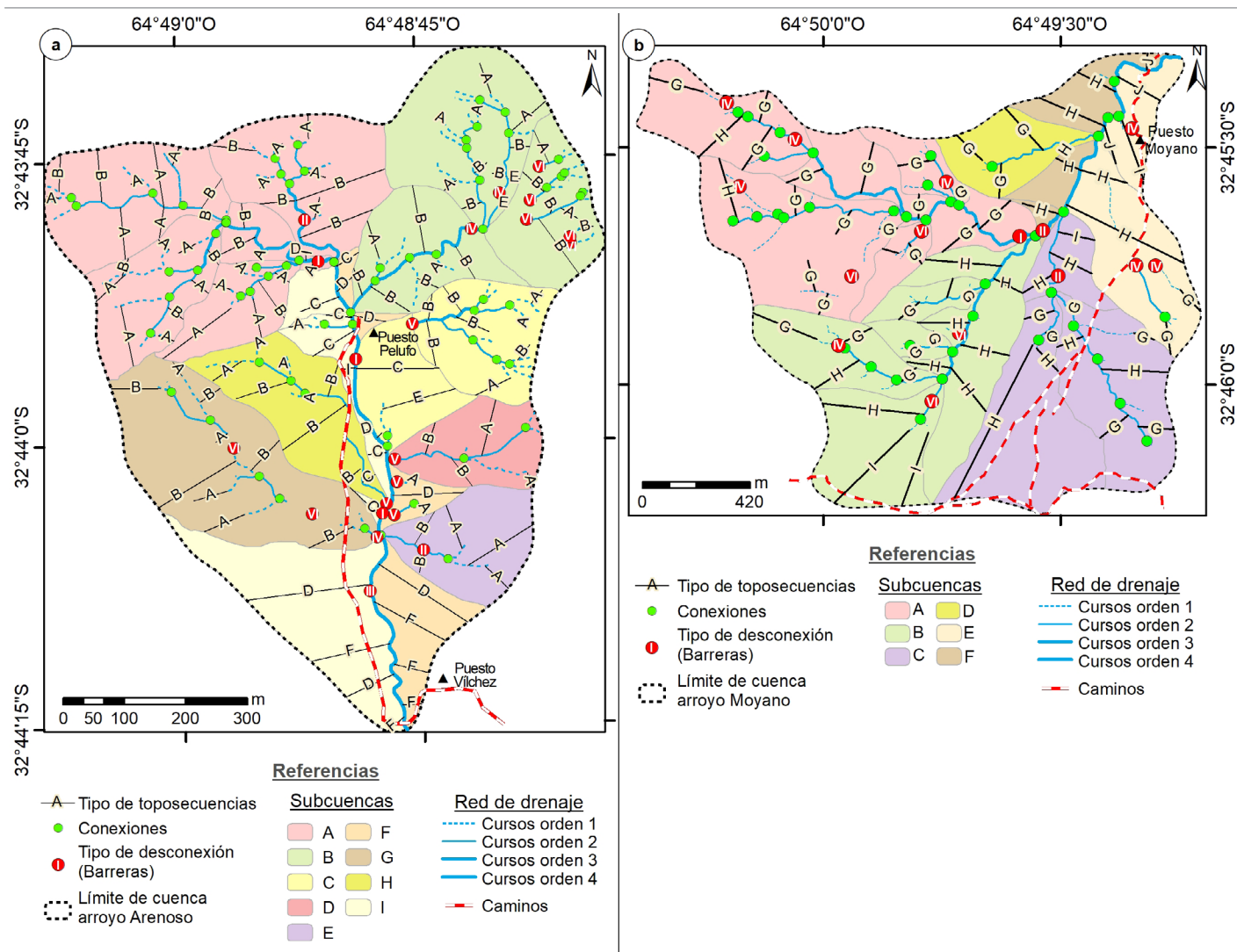


Figura 6: Mapas de distribución de variables utilizadas para el cálculo de conectividad (toposecuencias, barreras y conexiones) de las cuencas arroyo Arenoso (a) y Moyano (b)

A partir de la propuesta de Miller et al. (2012), en la cuenca arroyo Arenoso se establecieron siete confluencias de análisis (Figs. 8a y 9a), cuatro de ellas ubicadas en las subcuencas principales A y B (a'-a'' y b'-b'', respectivamente), y las restantes en el cauce principal (1, 2 y 3). Por su parte, en la cuenca arroyo Moyano se consideraron seis confluencias en las subcuencas principales A, B y C (a'-a'', b'-b'', c'-c'', respectivamente) y tres en el canal principal (1, 2 y 3, Figs. 8b y 9b).

Los resultados obtenidos sugieren que en la cuenca alta del arroyo Arenoso existe un mayor grado de conexión (Fig. 8a), representado por las subcuencas A (57 % de su área está conectada) y B (40 % conectada), debido a una mayor densidad de drenaje y predominio de toposecuencias con mayor grado de conexión (Cuadro 4), lo cual genera un aporte importante de sedimentos al canal principal (almacenamientos tipo 1 y 2). Esto se observó durante el monitoreo realizado; a

modo de ejemplo, en la figura 10a se presentan los clastos que fueron desplazados en toposecuencias tipo A, durante los meses más lluviosos del período seleccionado, reconociendo en la figura 10b un desplazamiento de 40 cm de un clasto. Aguas abajo, en la confluencia de análisis 2, sobre el canal principal (Figs. 8a y 9a), se produce un decrecimiento del orden del 14 % de la conectividad, debido a que las subcuencas C, D, E, G, H, F2-4 y I2-4, están afectadas por distintas barreras, poseen menores densidades de drenaje y conexiones, y dominan toposecuencias de menor valor. En este sector de la cuenca, los principales aportes de sedimentos se relacionan a los procesos de erosión de márgenes (almacenamientos tipo 4 y 9) y localmente, a erosión hídrica en cárcavas (toposecuencias tipo E), como surge del monitoreo realizado. En la figura 11a se muestra el retroceso de una cárcava (1.55 m) desde noviembre/2016 a mayo/2017, período en que se registraron varios eventos de precipitaciones del orden de 30

Cuadro 3. Tipos de barreras en las cuencas arroyo Arenoso y Moyano

| Tipo | Arroyo Arenoso | | Arroyo Moyano | |
|---|---|---------|---|---------|
| | Descripción | Rango | Descripción | Rango |
| I-Acumulación de bloques en el canal | Frecuente en los tributarios de bajo orden. Por procesos gravitatorios, caen bloques desde los afloramientos y llegan al canal, generando una obstrucción mínima del transporte de sedimentos y agua, que se reactiva durante crecidas (Fig. 7b) | 0- 0.3 | Ídem arroyo Arenoso (Fig. 7a). Pueden aparecer en conjunto con las de Tipo II | 0- 0.3 |
| II-Afloramientos de roca en los cauces | Obstaculiza el transporte de sedimentos en el canal, generando agradación aguas arriba y erosión aguas abajo (knickpoint). Produce cambios en el diseño en planta del canal (Fig. 7b). | | Ídem arroyo Arenoso (Fig.7a) | 0- 0.3 |
| III-Mallín inactivo | Debido a su resistencia (tipo 6), se produce un estrechamiento del canal. Aguas arriba se genera pérdida de velocidad y competencia, y acumulación de sedimentos. Esto afecta la dinámica y morfología de gran parte del tramo final del canal principal (Fig. 7c). | 0.4-0.6 | No posee | |
| IV-Mallín activo | Obstaculizan el transporte de sedimentos. Aguas arriba, disminuye el ancho del canal y del aluvión de fondo. Aguas abajo, sedimenta provocando un canal ancho y de lecho aluvial (Fig. 7d) | | En cabeceras o en cursos de bajo orden son pequeños y en cuenca baja son mayores. Obstaculizan el transporte de sedimentos (Fig. 7e). | 0.4-0.5 |
| V-Terrazas y abanicos aluviales inactivos | Desconectan los tributarios y el canal principal; debido a la diferencia entre la incisión del canal principal y la falta de ajuste de los canales secundarios (efímeros; Fig. 7f). | 0.7-1 | No posee | |
| VI-Paleocanales en vías de integración | Completos o parcialmente rellenos de sedimento y muy vegetados, con procesos de carcavamiento discontinuos (Fig. 7f). | | Ídem arroyo Arenoso (Fig. 7e). | 0.5-0.8 |

a 50 mm/día. También en la figura 10c se reconocen procesos de erosión y transporte de sedimentos en abanicos coluviales situados en las márgenes del colector principal, tanto en esta figura como en la 10d se registró el transporte de algunos clastos pintados que componen la carga de fondo (desplazamiento aproximado de 65 m aguas abajo). En la salida de la cuenca arroyo Arenoso (confluencia de análisis 3, Figs. 8a y 9a), la conectividad disminuye un 3 %, debido a que las subcuencas F1 e I1 están conformadas por almacenamientos muy resistentes (tipos 4 y 7), con baja conectividad lateral (erosión de márgenes reducida) y densidad de drenaje nula, provocando un 85.6 % y 80 % de desconexión, respectivamente. A partir de este análisis, surge que el grado de conectividad a la salida de la cuenca arroyo Arenoso es moderadamente bajo (el IC de toda la cuenca es 0.35), indicando que el 35.1 % de la cuenca está conectada (Fig. 9a).

Por otra parte, la cuenca arroyo Moyano muestra una baja variabilidad en el IC (Fig. 8b). Sin embargo, se puede discernir que las subcuencas que drenan gneis-migmatíticos (A1, A2, A4, B3, B4 y C1) son las de mayor grado de conexión, debido a que tienen una red de drenaje integrada y permanente con ausencia de barreras significativas. No obstante, los vínculos laterales son muy pobres, como pudo constatare a partir del

monitoreo realizado, en donde los clastos seleccionados sobre toposecuencia tipo G no fueron desplazados (Fig. 10e), demostrando un bajo aporte de sedimentos desde almacenamientos tipo 1 y 3 al canal. Estos sólo se vinculan al canal en épocas de crecidas, debido a procesos de erosión de márgenes y/o gravitatorios en laderas de mayor pendiente y bajo grado de cobertura vegetal. Aquellas subcuencas que drenan secuencias de flujos hiperconcentrados (A3, A5, A6, B1, B2, B5, B6, B7, B8, C2, C4, C3 y F3) poseen baja conectividad (Fig. 8b), debido a una reducida densidad de drenaje (notoria desconexión longitudinal) y mínima conexión lateral. Esta última está asociada a procesos de erosión de márgenes muy localizados durante eventos de crecida y a procesos de carcavamiento parcialmente activos (toposecuencias tipo I). Durante el periodo de monitoreo, sólo algunas cárcavas presentaron un reducido movimiento de material (caídas, deslizamientos), mientras que la mayoría no registraron desplazamientos alguno (Fig. 11b). De este modo, en la confluencia de análisis 1 (Fig. 9b), la conectividad de la cuenca resulta ser de 17.4 %. En el tramo final del arroyo Moyano (confluencias de análisis 2 y 3, Fig. 9b) la conectividad se mantiene en un valor similar, reduciéndose levemente (1.30 %), debido al tipo de toposecuencias dominantes (tipo I y J) en las subcuencas D, E, F2 y



Figura 7: Vista representativa de tipos de barreras en las cuencas arroyo Arenoso y Moyano. a y b) Tipo I y II, afloramiento de roca y acumulación de bochas, bloques en los canales; c) Tipo III, mallín inactivo; d) e) Tipo IV, mallín activo (canal línea discontinua celeste); f) Tipo V y VI, abanicos aluviales inactivos (línea continua amarilla) y paleocanales en vías de integración (línea discontinua celeste).

F1. El aporte de sedimentos al canal se produce a partir de la erosión lateral de barras tipo lag y niveles de terrazas, por lo que el grado de conectividad a la salida de la cuenca arroyo Moyano es bajo (el IC de toda la cuenca es 0.16), indicando que el 16 % de la cuenca está conectada (Fig. 9b).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El IC aplicado (Andreazzini et al. 2018, Andreazzini et al. 2021), permitió determinar que existe una importante diferencia en la conectividad de las cuencas evaluadas, del orden

Cuadro 4. Valores asignados a las variables del IC, para subcuencas principales y secundarias de la cuenca arroyo Arenoso.

| Cuenca arroyo Arenoso | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|----------|------------------------|-------|
| Subcuencas | | Características morfométricas | | | Topo-secuencias | Densidad de drenaje | Conexiones | Barreras | Índice de Conectividad | |
| Principales | Secundarias | Área (m ²) | Altura max-med-min (m s.n.m.) | Pendiente max-med-min (%) | Promedio | Ddn | Cn | Promedio | ICn | ICn_T |
| A | A1 | 45110.7 | 1142-1116-1084 | 35-21-9 | 0.76 | 0.29 | 0.75 | 0 | 0.60 | 0.56 |
| | A2 | 33959.3 | 1138-1116-1085 | 40-22-2 | 0.80 | 0.41 | 0.75 | 0 | 0.65 | |
| | A3 | 21500.2 | 1122-1092-1073 | 29-19-10 | 0.90 | 0.42 | 0.75 | 0 | 0.69 | |
| | A4 | 47683.9 | 1131-1098-1067 | 43-24-2 | 0.73 | 0.27 | 0.75 | 0.30 | 0.48 | |
| | A5/A6 | 11378.2 | 1087-1077-1069 | 26-14-4 | 0.65 | 0.51 | 0.13 | 0.40 | 0.29 | |
| B | B1 | 52071.5 | 1134-1103-1079 | 46-24-2 | 0.71 | 0.38 | 1.00 | 0.80 | 0.43 | 0.43 |
| | B2 | 32735.2 | 1110-1092-1079 | 30-13-3 | 0.60 | 0.32 | 0.75 | 0.80 | 0.29 | |
| | B3/B4 | 35798.6 | 1100-1077-1062 | 42-11-4 | 0.57 | 1.00 | 0.63 | 0.80 | 0.47 | |
| C | C1 | 37363.2 | 1091-1080-1065 | 25-11-3 | 0.63 | 0.41 | 0.75 | 1.00 | 0.26 | 0.29 |
| | C2 | 24144.0 | 1082-1060-1047 | 32-18-4 | 0.70 | 0.08 | 0.25 | 0 | 0.34 | |
| D | D | 27191.3 | 1091-1077-1050 | 33-17-3 | 0.70 | 0.36 | 0.25 | 0.70 | 0.20 | 0.20 |
| E | E | 31820.0 | 1083-1063-1043 | 31-17-5 | 0.76 | 0.16 | 0.25 | 0.30 | 0.29 | 0.29 |
| F | F1 | 22348.4 | 1056-1042-1027 | 22-12-2 | 0.33 | 0.00 | 0 | 0 | 0.11 | 0.14 |
| | F2 | 6964.2 | 1072-1053-1042 | 33-18-9 | 0.90 | 0.27 | 0.13 | 0.70 | 0.20 | |
| | F3 | 1903.4 | 1069-1063-1062 | 12-8-4 | 0.70 | 0.00 | 0 | 0 | 0.23 | |
| | F4 | 2340.7 | 1070-1064-1062 | 30-14-4 | 0.75 | 0.00 | 0 | 0 | 0.25 | |
| G | G | 76456.7 | 1134-1082-1041 | 45-21-4 | 0.67 | 0.18 | 0.63 | 0.77 | 0.23 | 0.23 |
| H | H | 39325.6 | 1112-1069-1046 | 35-19-0.5 | 0.71 | 0.32 | 0.38 | 0.70 | 0.23 | 0.23 |
| I | I1 | 53159.7 | 1091-1051-1028 | 30-14-2 | 0.45 | 0 | 0 | 0 | 0.15 | 0.21 |
| | I2 | 1025.3 | 1049-1046-1043 | 16-12-5 | 0.80 | 0 | 0 | 0 | 0.27 | |
| | I3 | 11449.3 | 1081-1062-1046 | 21-13-3 | 0.82 | 0.19 | 0.25 | 0 | 0.42 | |
| | I4 | 6634.5 | 1082-1071-1064 | 21-17-11 | 0.80 | 0 | 0 | 0 | 0.27 | |

Ddn: Densidad de drenaje normalizada, Cn: Conexiones normalizada, ICn: Índice de conectividad normalizado para las subcuencas secundarias, ICn_T: Índice de conectividad normalizado para las subcuencas principales

de 50 %, y que esta se vincula principalmente al control que ejerce la litología sobre las principales variables que intervienen en la conectividad hidrosedimentológica en una cuenca. Para una condición climática dada, las diferentes litologías controlan el suministro de sedimentos (tasa de meteorización y erosión), tal como fuera indicado por Villegas et al. (2006) y Degiovanni et al. (2013). Sin embargo, este análisis permite dar cuenta que esta variable también condiciona los tipos, extensión y potencia de almacenamientos en una cuenca y tienen una fuerte incidencia en los procesos morfodinámicos y características hidrográficas e hidrológicas de la misma.

La potencialidad del IC para discriminar y estimar estas variables se considera satisfactoria, ya que el índice se basa no solamente en el análisis de variables morfométricas e hidrográficas obtenidas de modelos digitales de elevación, imágenes satelitales y fotografías aéreas, sino que la valoración de los aspectos morfosedimentológicos y morfodinámicos surgió del relevamiento y monitoreo de campo. Tal como lo

señalan Messenzehl et al. (2014), los estudios de conectividad basados en el mapeo geomorfológico de campo son útiles y necesarios para mejorar la comprensión del transporte de sedimentos, ya que validan o complementan el modelado de estos procesos complejos y los resultados obtenidos por los índices basados en recursos raster (Borselli et al. 2008, Cavalli et al. 2013, entre otros). Estos autores también manifiestan que los índices determinados a partir de información topográfica suelen sobreestimar el grado de conectividad de una cuenca, porque no consideran/evalúan algunas variables significativas, como por ejemplo la presencia de *buffers* asociados a la cubierta vegetal. En el mismo sentido, los estudios de conectividad realizados por Wohl et al. (2017), Cavalli et al. (2013), entre otros, se focalizan en la influencia de la topografía, donde la pendiente es la principal variable de control, pero no analizan aspectos directamente relacionados con la litología, como tipo, extensión y localización de los almacenamientos.

Cuadro 5. Valores asignados a las variables del IC, para subcuencas principales y secundarias de la cuenca arroyo Moyano.

| Cuenca arroyo Moyano | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|---------------------|------------|----------|------------------------|-------|
| Subcuencas | | Características morfométricas | | | Topo-secuencias | Densidad de drenaje | Conexiones | Barreras | Índice de Conectividad | |
| Principales | Secundarias | Área (m ²) | Altura máx-med-min (m s.n.m.) | Pendiente máx-med-min (%) | Promedio | Ddn | Cn | Promedio | ICn | ICn_T |
| A | A1 | 150244.6 | 1270-1226-1179 | 35-18-2 | 0.28 | 0.14 | 0.63 | 0.40 | 0.64 | 0.20 |
| | A2 | 259596.8 | 1228-1174-1110 | 44-20-4 | 0.28 | 0.15 | 0.88 | 0.60 | 0.71 | |
| | A3 | 42334.7 | 1149-1127-1099 | 27-15-2 | 0.30 | 0.11 | 0.13 | 0.50 | 0.03 | |
| | A4 | 47954.9 | 1173-1114-1082 | 42-24-2 | 0.30 | 0.28 | 0.50 | 0.40 | 0.68 | |
| | A5 y A6 | 151407.7 | 1198-1120-1048 | 54-22-4 | 0.30 | 0.18 | 0.13 | 0.10 | 0.51 | |
| B | B1 | 160733.8 | 1149-1124-1089 | 35-16-3 | 0.33 | 0.04 | 0.25 | 0.50 | 0.12 | 0.09 |
| | B2 | 129386.0 | 1192-1146-1092 | 35-18-1 | 0.28 | 0.14 | 0.50 | 0.40 | 0.52 | |
| | B3 | 28117.6 | 1144-1115-1087 | 32-23-7 | 0.30 | 0.19 | 0.25 | 0 | 0.74 | |
| | B4 | 41169.3 | 1148-1116-1074 | 32-22-0.5 | 0.27 | 0.23 | 0.13 | 0 | 0.62 | |
| | B5/B8 | 201052.1 | 1140-1095-1045 | 35-22-5 | 0.20 | 0.10 | 0.25 | 0.50 | 0.05 | |
| C | C1 | 208111.3 | 1157-1102-1059 | 44-18-1 | 0.27 | 0.13 | 0.63 | 0 | 1.03 | 0.24 |
| | C2 | 228635.0 | 1154-1112-1065 | 41-14-3 | 0.25 | 0.03 | 0.25 | 0 | 0.53 | |
| | C3/C4 | 61744.3 | 1082-1055-1039 | 32-15-1 | 0.27 | 0.15 | 0.13 | 0.10 | 0.44 | |
| D | D | 100070.6 | 1114-1079-1026 | 40-23-4 | 0.28 | 0.12 | 0.25 | 0 | 0.65 | 0.22 |
| E | E1 | 69096.3 | 1041-1024-1011 | 24-9-1 | 0.53 | 0.02 | 0.13 | 0.40 | 0.28 | 0.04 |
| | E2 | 177414.5 | 1119-1066-1024 | 43-15-3 | 0.25 | 0.09 | 0.13 | 0.40 | 0.06 | |
| F | F1 | 65845.4 | 1096-1048-1013 | 44-25-2 | 0.33 | 0.03 | 0.25 | 0 | 0.61 | 0.15 |
| | F2 | 32844.3 | 1085-1051-1023 | 42-26-5 | 0.20 | 0 | 0 | 0 | 0.20 | |
| | F3 | 10747.9 | 1084-1048-1040 | 45-24-5 | 0.20 | 0 | 0 | 0.10 | 0.10 | |

Ddn: Densidad de drenaje normalizada, Cn: Conexiones normalizada, ICn: Índice de conectividad normalizado para las subcuencas secundarias, ICn_T: Índice de conectividad normalizado para las subcuencas principales

Al respecto, en las cuencas analizadas surge claramente que, si bien los aspectos morfométricos determinan que la conectividad resulta mayor en las áreas de cabeceras, debido al mayor gradiente y densidad de drenaje (favorece vínculos/transferencias), que en cuenca baja, donde estos valores disminuyen, son las variaciones litológicas entre ambas cuencas las que explican las mayores diferencias de conectividad. En efecto, el grado de conectividad de cada cuenca resultó fuertemente condicionado por el tipo de almacenamientos de sedimentos, toposecuencias dominantes y características del sistema fluvial, variables altamente dependientes de la litología y capturadas por el IC aplicado.

En relación a la consideración/valoración de las barreras, se constata lo expresado por Fryirs (2013) cuando señala que el grado de conectividad de una cuenca depende de la ubicación de las barreras, asignándole mayor desconexión a aquellas localizadas en el colector principal. En este estudio se pudo corroborar que además es importante tener en cuenta el tipo de barrera y el área afectada por la misma, ya que esto contribuye al grado de desconexión, observándose en ese sentido particularidades dependientes de la litología.

Así, para posiciones similares en la red de drenaje, el tipo de barreras difiere en cada cuenca, siendo muy variables y de mayor grado en el ambiente granítico que en el metamórfico, aspecto que también se pudo discriminar con el IC aplicado.

Del mismo modo, del monitoreo efectuado surge que si bien la eficacia de los buffers depende de su ubicación en las laderas (Messenzehl et al. 2014), ésta varía considerablemente según la cobertura vegetal, la cual está controlada por la litología y las variaciones climáticas estacionales. En general, en la cuenca arroyo Moyano el desarrollo de vegetación es mayor que en la cuenca arroyo Arenoso (los buffers tienen mayor poder de bloqueo) y, en ambas, el grado de cobertura incrementa hacia el final del periodo lluvioso (noviembre-abril). Andreazzini et al. (2014) establecen que la cobertura vegetal en la región de estudio es una variable de alta sensibilidad y además de los aspectos mencionados, está influenciada por actividades humanas, como sobrepastoreo e incendios forestales inducidos (muy frecuentes en las Sierras de Córdoba), por lo cual los análisis de conectividad muestran una importante variación estacional, tal como lo expresa Fryirs (2013).

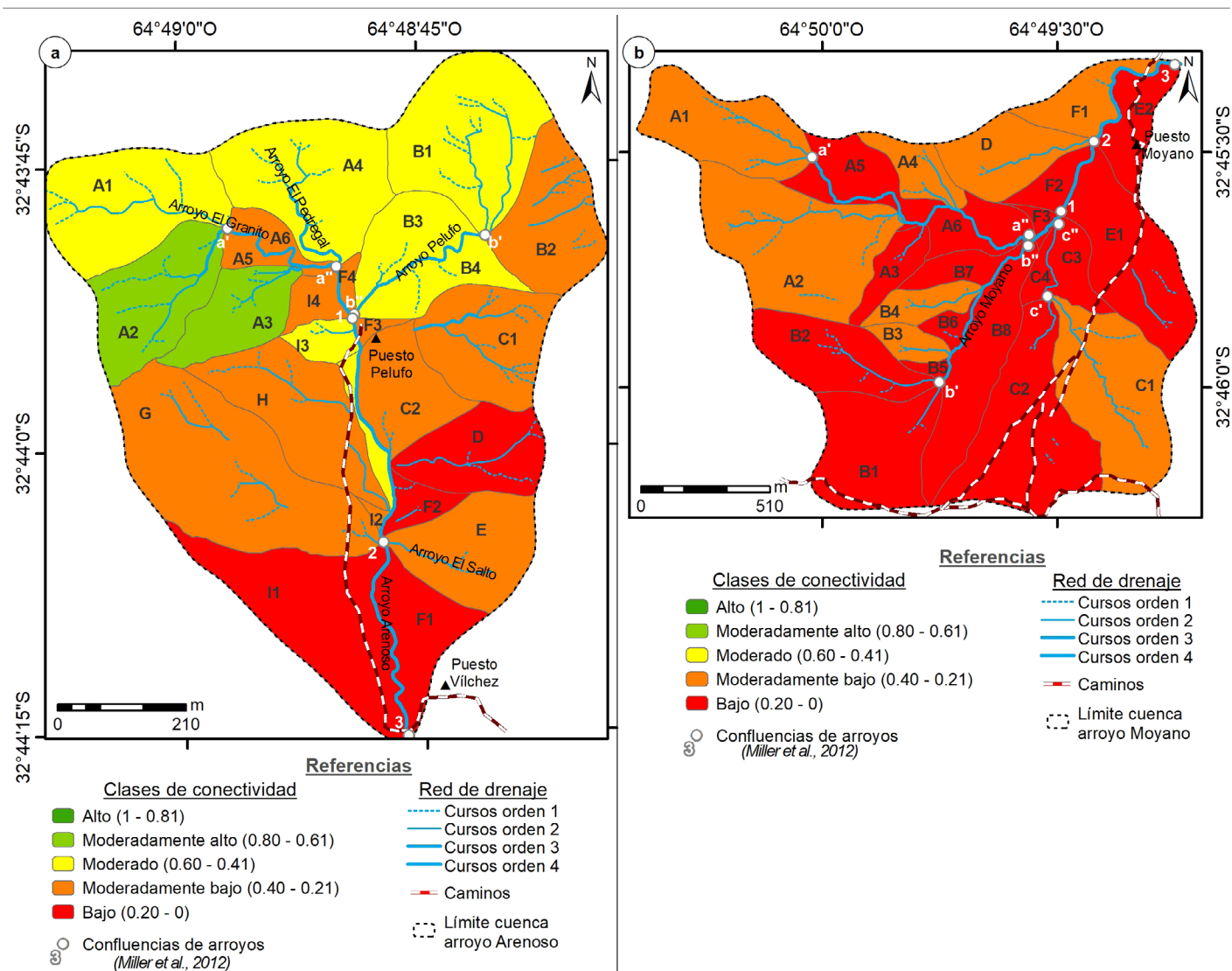


Figura 8: Mapas de clases de conectividad de las subcuencas secundarias, de las cuencas arroyo Arenoso (a) y Moyano (b)

Los resultados aquí obtenidos están en concordancia con aquellos alcanzados por estudios sedimentológicos, hidro-morfológicos, entre otros, realizados por varios autores (Beltramone et al. 2005; Villegas et al. 2006; Degiovanni et al. 2013, Andreazzini et al. 2014) para la cuenca del río Cuarto y pueden sintetizarse en los siguientes:

- La litología resulta una variable de alta incidencia en la conectividad hidrosedimentológica de una cuenca de drenaje, controlando en primer término factores de producción, almacenamiento y transferencia de sedimentos y, secundariamente, la distribución del agua en la misma.

- Considerando las cuencas evaluadas, los almacenamientos resultaron más relevantes y menos estables en el ambiente granítico, en segundo término, asociados a las protomilonitas, y muy reducidos en las metamorfitas de alto grado. Así, las toposecuencias de mayor conexión se asocian a

litologías graníticas y las menos conectadas a metamórficas.

- La red hidrográfica tiene mayor densidad y número de confluencias en la cuenca arroyo Arenoso, pero las propiedades geomecánicas de estas rocas, la alta producción de sedimentos y presencia de almacenamientos favorecen la infiltración y definen un régimen predominantemente efímero. A la inversa, en la cuenca arroyo Moyano, donde los reservorios disminuyen y domina el escurrimiento superficial, resulta mayor la conectividad hidrológica.

Así, la conectividad hidrosedimentológica de la cuenca del arroyo Arenoso, puede considerarse como de transporte limitado (el importante suministro de sedimentos es mayor que la capacidad de transporte), mientras que la del arroyo Moyano, es de suministro limitado (la capacidad de transporte es mayor que el suministro de sedimentos).

- Extrapolando estos resultados a la cuenca del río Cuarto

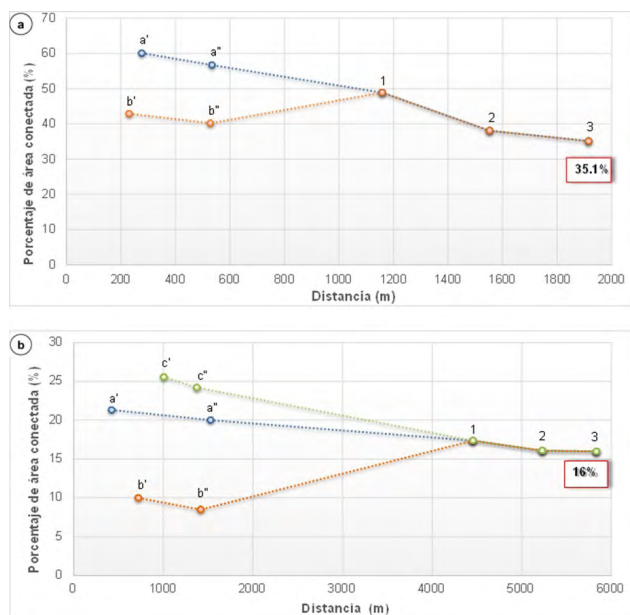


Figura 9: Variación aguas abajo del área conectada en las dos cuencas de estudio. Las confluencias analizadas pueden verse en la figura 8. a) Cuenca del arroyo Arenoso, donde la línea a'-3 corresponde al sistema arroyos El Granito- Arenoso y b'-3 al sistema arroyos Pelufo- Arenoso; b) Cuenca del arroyo Moyano, donde la línea a'-3 corresponde a la subcuenca A, b'-3 a la subcuenca B y c'-3 a la subcuenca C

resulta que las subcuencas que drenan litología granítica son las responsables de la mayor tasa de reposición de áridos al tramo medio, operando solamente en eventos de crecida.

A partir de esto, se considera que los resultados obtenidos a partir del IC, podrían extrapolarse a otros casos de estudio de similares contextos litológicos y climáticos, especialmente en ambientes montañosos. El IC prospectivo, si bien demanda un significativo tiempo de mapeo, constituye una herramienta capaz de definir la transferencia/movimiento de sedimentos en cuencas (preferencialmente de pequeñas dimensiones) donde no están disponibles modelos de elevación digital de alta resolución, ya que permite discriminar satisfactoriamente las variables morfosedimentológicas, morfodinámicas e hidrográficas/hidrológicas que controlan la conectividad en una cuenca.

En etapas posteriores, las variables del IC serán adaptadas a un ambiente SIG, utilizando recursos raster, para poder aplicarlo en cuencas de mayores dimensiones. Los resultados que surjan serán validados/constatados con los obtenidos por el IC presentado en este trabajo.



Figura 10: Ejemplos de monitoreo de clastos pintados y abanicos coluviales. En la cuenca arroyo Arenoso: a) Desplazamiento de clastos en el talud (toposecuencia tipo A) para dos fechas del monitoreo; b) Vista en detalle, de la figura 10a, de uno de los clastos desplazados; c) Erosión de abanicos coluviales (señalados con flechas rojas) y monitoreo de clastos en el canal principal (señalados con flechas amarillas) para dos fechas del monitoreo; d) Monitoreo de clastos en el canal principal (señalados con flechas amarillas). Los clastos sin desplazamiento son señalados con flechas naranjas. En la cuenca arroyo Moyano: d) Clasto sin desplazamiento en el talud (toposecuencias tipo G) para dos fechas del monitoreo.

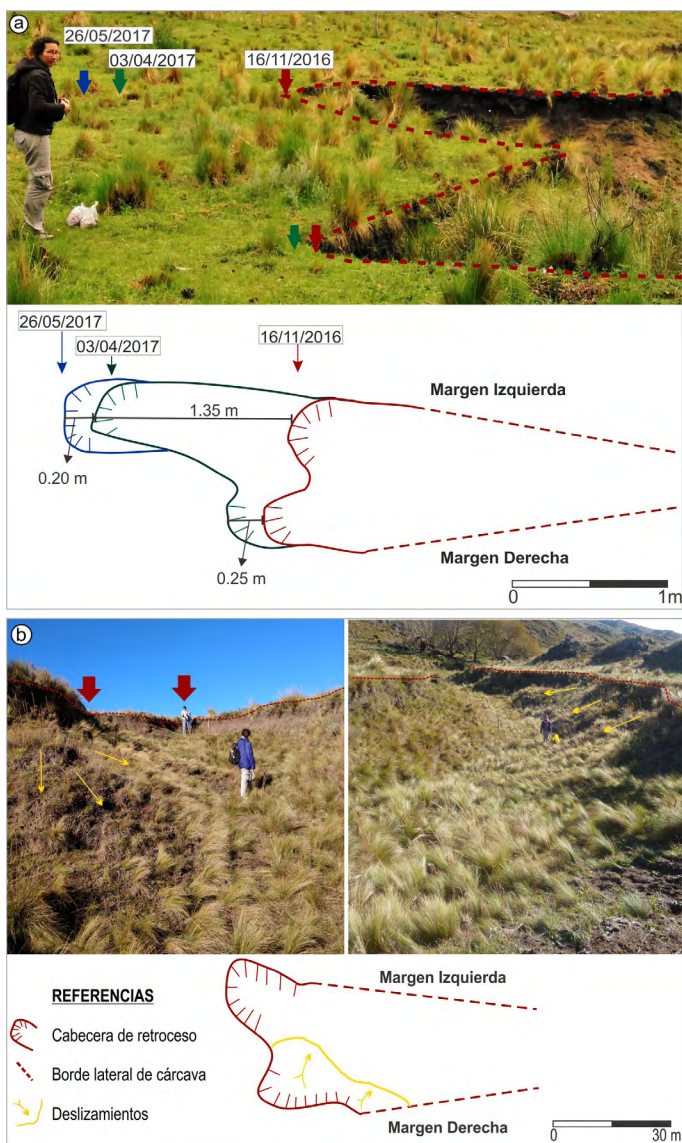


Figura 11: Ejemplos de monitoreo de cárcavas. a) Cárcava activa (toposecuencia tipo E) en la cuenca arroyo Arenoso, y diagrama en planta del retroceso para el periodo de monitoreo; b) Cárcava inactiva (toposecuencia tipo I) en la cuenca arroyo Moyano, muy vegetada, sin registro de retroceso para el periodo de monitoreo. Se muestra además un diagrama en planta de la misma. La fotografía de la izquierda muestra la cabecera de la cárcava y la de la derecha una vista aguas abajo de la misma.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras desean expresar su agradecimiento a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT, PICT 1552/2016) que financiaron esta investigación. También a los revisores de este trabajo, por sus sugerencias y comentarios para la mejora del mismo.

REFERENCIAS

Andreazzini, M.J., Benito, M.E. y Degiovanni, S.B. 2018. Comparación

del grado de conectividad en dos cuencas de diferente litología, sierra de Comechingones, Córdoba. 8° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. Acta: 145-147, Puerto Madryn.

Andreazzini, M.J., Degiovanni, S.B., Benito, M.E. y Echevarria, K.V. 2021.

Development and application of a sediment connectivity index to small fluvial catchments: A case study in Arenoso stream, Córdoba, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 80, 301.

Andreazzini, M.J., Degiovanni, S.B., Cantú, M., Grumelli, M. y Schiavo, H. 2013.

Análisis e interpretación paleoambiental de secuencias del cuaternario superior en pampas de altura del sector centro-sur de la sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 2: 65-84.

Andreazzini, M.J., Degiovanni, S.B., Felizzia, J., Doffo, D.C. y Tripaldi, A. 2017.

Caracterización Geomorfológica-Sedimentológica de mallines en un sector del batolito Cerro Áspero, Sierra de Comechingones, Córdoba. 20° Congreso Geológico Argentino, Simposio 7:1-3, San Miguel de Tucumán.

Andreazzini, M.J., Degiovanni, S.B., Prieto, R.P., Tripaldi, A., Luque, M.E. 2020.

Mallines en la Sierra de Comechingones, Sierras Pampeanas, Argentina. Caracterización geológico-geomorfológica y reconstrucción paleoambiental durante el Holoceno. *Andean Geology* 47: 77-109.

Andreazzini, J., Degiovanni, S., Spalletti, P. e Irigoyen, M. 2014.

Producción de sedimentos en una cuenca de Sierras Pampeanas, Córdoba, Argentina: Estimación para distintos escenarios. *Aqua-LAC Revista del Programa Hidrológico Internacional para América Latina y el Caribe de la UNESCO* 6 (1): 38-49.

Beltramone, C., Barbeito, O., Ambrosino, S. y Ugarte, R. 2005.

Determinación del área fuente y producción de sedimento anual para la cuenca superior del río Cuarto. 16° Congreso Geológico Argentino, Acta: 581-585, Córdoba.

Blarasin, M., Degiovanni, S., Cantú, M., Eric, C., Cabrera, A., Villegas, M., Doffo, N., Becker, A., Cisneros, J., Gonzalez, J. y Cholaky, C. 1994.

Diagnóstico global del funcionamiento hídrico de las cuencas que afectan las trazas de la ruta Nac. 7, entre Laboulaye y Villa Mercedes, y la ruta Nacional N° 8, entre Canals y Villa Mercedes. Convenio U.N.R.C. y Empresa Caminos del Oeste S.A (Inédito), Córdoba.

Blarasin, M., Degiovanni, S., Cabrera, A. y Villegas, M. 2005.

Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental. Universidad Nacional de Río Cuarto, 1° edición: 240 p, Córdoba.

Borselli, L., Cassi, P. y Torri, D. 2008.

Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. *Catena* 75(3): 268-277.

Brierley GJ, Fryirs K. y Jain V. 2006.

Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area* 38(2):165-174.

Cantreul, V., Bielders, C., Calsamiglia, A. y Degré, A. 2018.

How pixel size affects a sediment connectivity index in central Belgium. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 88-893.

- Cavalli, M., Trevisani, S., Comiti, F. y L. Marchi. 2013. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small alpine catchments. *Geomorphology* 188:31-41.
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York
- Coniglio, J., Perez Xavier, R., Pinotti, L., D'Eramo, F., Petrelli, H. y Ducart, D. 2001. Evolución de fluidos hidrotermales y la formación de vetas Cuarzo-Wolframita del distrito minero Cerro Áspero, Córdoba. 7° Congreso Argentino de Geología Económica, Actas 1: 87-93, Salta
- Corral, M., Baldissoni, M., Farias, H., Rodríguez, A. y López, F. 2009. Balance sedimentológico simplificado para el río Cuarto, Córdoba. 4° Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta.
- Corral, M., Baldissoni, M., García, C. M., Díaz, A., Gonzalez, J., Rodríguez A. y Farias, H.D. 2007. Modelo de onda difusiva para procesos erosivos a largo plazo. 3° Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba
- Corral, M., Hillman, G., Pagot, M., Moya, G., Baldissoni, M., Rodríguez, A., López, F., Hiruela, J., Martínez, R., Díaz, A., González, J., Bazán, G. y H. Muratore. 2005. Influencia de la extracción de áridos en los Ríos II y IV de Córdoba. 2° Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Neuquén.
- Cristofolini, E., Otamendi, J., Martino, R., Tibaldi, A., Armas, P. y Barzola, M. 2016. Faja de Cizalla Las Lajas: petrografía, estructura interna e implicancias tectónicas, extremo sur de La Sierra De Comechingones, provincias de Córdoba y San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 74 (3): 295-314.
- Croke, J., Mockler, S., Fogarty, P. y I. Takken. 2005. Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity. *Geomorphology* 68: 257-268
- Degiovanni, S. y Cantú, M. 1997. Neotectonic activity in the La Cruz-Gigena depresión, Córdoba, Argentina. 4° International Conference on Geomorphology, Tomo I, Bologna.
- Degiovanni, S.B., Echevarria, K., Andreazzini, M.J. y Doffo, N.C. 2014. Los sistemas fluviales del sur de Córdoba: alteraciones históricas, procesos de ajuste y consecuencias ambientales. 19° Congreso Geológico Argentino, Actas S13: 2 p, Córdoba.
- Degiovanni S., Origlia D., Grosso F., Doffo N. y Santángelo A. 2005a. Erosión de márgenes: análisis de los factores que regulan la evolución de un meandro en la cuenca media del río Cuarto. En Blarasin M., S. Degiovanni, A. Cabrera y M. Villegas (eds) *Aguas superficiales subterráneas en el Sur de Córdoba*, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto.
- Degiovanni, S., Villegas, M., y Doffo, N. 2005b. Monitoreo del comportamiento del río Cuarto en un tramo del curso medio sometido a fuerte presión antrópica. En Blarasin M., Degiovanni, S.B., Cabrera, A. y Villegas, M. *Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba*: 105-116, Río Cuarto.
- Degiovanni, S., Villegas M. y Doffo N. 2000. Rectificación de meandros: evolución del perfil longitudinal de un tramo del río Chocancharava, provincia de Córdoba. En Farias, H.D., Pílan, M.T., Borsellino. M.J., Pece, F.J., Mattar, M.T. y Storniolo, A.R. *Uso y Preservación de los Recursos Hídricos en los Umbrales del siglo 21°*, Edición en CD ROM: 363-364, Córdoba.
- Degiovanni, S., Villegas, M. y Ulla, J.P. 2013. Análisis de la carga de fondo y dinámica de transporte en el río Cuarto (Córdoba), como base para una minería de áridos sustentable. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 70 (2): 238-348.
- Echevarria, K.V., Degiovanni, S.B., Andreazzini, M.J. y Doffo, N.C. 2018. Geomorfología antropogénica en la planicie fluvial del río Cuarto. Área urbana y periurbana de la ciudad de Río Cuarto, Córdoba. 6° Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Relatorio: 388-389, Puerto Madryn.
- Fagiano, M.R. 2007. Geología y petrología del basamento cristalino de Las Albahacas, Sur de la Sierra de Comechingones, Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 375 p., Río Cuarto
- Fernandez, M. 2018. Alteraciones antrópicas en los bañados del Saladillo, Córdoba. El caso de la avulsión del canal Río Cuarto. 7° Congreso de Geomorfología y Cuaternario, Actas: 139-140, Puerto Madryn.
- Fryirs, K.A. 2013. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: a fresh look at the sediment delivery problema. *Earth Surf. Process. Landforms* 38: 30-46
- Fryirs, K.A., Brierley, G.J., Preston, N.J. y J. Spencer. 2007. Catchment-scale (dis) connectivity in sediment flux in the upper Hunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology* 84: 297-316.
- Gavrilovic, S. 1972. Inzenjering o bujicnim tokovima ieroziji. Izgradnja, specijalno izdanje, 261-264. Beograd, Serbia and Montenegro.
- Gavrilovic, Z. 1988. The use of an empirical method (erosion potential method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. In: *International conference of river regime*: 411-422.
- Giuliano Albo, M.J., Blarasin, M.T. 2014. Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la Sierra de Comechingones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 378-392
- Graf, L., Moreno-de-las-Heras, M., Ruiz, M., Calsamiglia, A., Garcia-Comendador, J., Fortesa, J., LopezTarazon, J.A. y Estrany, J. 2018. Accuracy assessment of digital terrain model dataset sources for hydrogeomorphological modelling in small Mediterranean catchments. *Remote Sensing* 10.
- Heckmann, T., Cavalli, M., Cerdan, O., Foerster, S., Javaux, M., Lode, E., Smetanova, A., Vericat, D., Brardinoni, F. 2018. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth Science Reviews* 187: 77-180.
- Hooke, J. 2003. Coarse sediment connectivity in channel river systems: a conceptual framework and methodology. *Geomorphology* 56: 79- 94.

- Lexartza-Artza, I. y Wainwright, J. 2009. Hydrological connectivity: Linking concepts with practical implications. *Catena* 79: 146-152.
- Messenzehl, K., Hoffmann, T. y Dikau, R. 2014. Storage coupling and sediment connectivity in a high-alpine cascading system (Val Mütschans, Swiss National Park). 8° International Conference Geomorphology, Tome 1: 655, Paris.
- Miller, J.R., Lord, M.L., Villarreal, L.F., Germanoski, D. y Chambers, J.C. 2012. Structural organization of process zones in upland watersheds of central Nevada and its influence on basin connectivity, dynamics, and wet meadow complexes. *Geomorphology* 139: 384-402.
- Otamendi, J., Fagiano, M. y Nullo, F. 2000. Geología y evolución metamórfica del Complejo Monte Guazú, sur de la sierra de Comechingones, provincia de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 56 (3): 265-279.
- Pedraza, J., Carrasco González, R.M., Díez Herrero, J. y Francisco, J. 1996. *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*, Editorial Rueda 1: 414
- Pinotti, L.P., Coniglio, J.E., J. D'eraimo, F.J., Demartis, M., Otamendi, J.E., Fagiano, M. y Zambroni, N.E. 2014. El Magmatismo Devónico: Geología del Batolito Cerro Áspero. 19° Congreso Geológico Argentino: Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba, Actas: 255-276, Córdoba.
- Rey Ripoll, M. 2008. Perfil geológico-estructural de la faja de cizalla Guacha Corral, Sierra de Comechingones, en los 32°45'S. Evaluación del potencial metalogenético. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 68 p., Río Cuarto.
- Santinelli, M., Doffo, N., Degiovanni, S., Echevarria, K. y Andreatzinni, J. 2020. Cambios morfohidrológicos en los sistemas lagunares de los Bañados Del Saladillo, Córdoba (Argentina), inducidos por intervenciones antrópicas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77(1).
- Vidal Romaní, J.R., Twidale, C.R. 1998. *Formas y paisajes graníticos*. Universidad de Coruña, Tomo 1: 418p. Coruña (España).
- Villegas, M., Degiovanni S., Caviglia L. y Palma Y. 2002. Monitoreo de sistemas fluviales: evaluación de la presión de la minería de áridos sobre el río Cuarto utilizando Geoindicadores. 19° Congreso Nacional del Agua, Actas: 10, Córdoba.
- Villegas, M., Degiovanni S. y Ulla J.P. 2006. Tipificación del comportamiento del sector sur de la cuenca del río Cuarto a través del análisis de variables morfológicas y sedimentológicas. III Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología, Tomo I: 221-231, Córdoba.
- Villegas, M., Villalba G. y Degiovanni S. 2000. Parámetros texturales como geindicadores de la respuesta de sistemas fluviales ante intervenciones antrópicas. 2° Taller sobre Sedimentología y Medio Ambiente. Actas 1: 6162, Buenos Aires
- Wohl, E., Rathburn, S., Chignell, S., Garrett, K., Laurel, D., Livers, B., Patton, A., Records, R., Richards, M., Schook, D.M., Sutfin, N.A. y Wegener, P. 2017. Mapping longitudinal stream connectivity in the North St. Vrain Creek watershed of Colorado. *Geomorphology* 277, 171-181.