

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DE SIERRAS PAMPEANAS, CÓRDOBA, ARGENTINA: ESTIMACIÓN PARA DISTINTOS ESCENARIOS

SEDIMENT YIELD IN A PAMPEAN RANGE BASIN (CORDOBA, ARGENTINA): ESTIMATIONS FOR DIFFERENT SCENARIOS

M. Jimena Andreazzini^{1,2}, Susana Degiovanni¹, Pablo Spalletti³ y Martín Irigoyen³

Resumen

La producción de sedimentos (G) en una cuenca, sintetiza la compleja interrelación entre aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos y de uso del territorio, y es una de las principales variables que definen la morfodinámica de los cursos colectores. Ante la complejidad de efectuar mediciones directas, G puede estimarse mediante técnicas de predicción, como la ecuación de Gavrilovic, que relaciona coeficientes de producción (W) y de retención (R) de sedimentos en una cuenca. Esta metodología fue aplicada en la cuenca del río Las Cañitas (Sierras Pampeanas, Córdoba) analizando la influencia de las variables de control y considerando hipotéticos cambios en el uso del suelo y condiciones climáticas. Las Sierras Pampeanas de Córdoba conforman bloques submeridianos y asimétricos, de basamento cristalino precámbrico-paleozoico inferior, cuyas alturas varían desde 2600 a 650 m.s.n.m., descendiendo hacia el Este y Sur. Particularmente, la cuenca de estudio se desarrolla sobre la vertiente oriental de la Sierra de Comechingones (Sierras Grandes) y sector pedemontano. Se definieron ocho ambientes geomorfológicos donde el relieve está fuertemente condicionado por las características litológicas y topográficas, los cuales fueron además caracterizados según las variables que intervienen en la metodología aplicada, tales como el tipo de cobertura vegetal y el uso del suelo, entre otros. El valor de producción de sedimentos obtenido fue de 21,43 tn/ha/año. El valor promedio de R fue 0,15 indicando que del total de la producción de sedimentos en la cuenca, el 15% pasa a transporte y el resto quedaría retenido dentro de la misma, en las distintas subcuencas. Los aspectos litológico-geomorfológicos mostraron gran influencia en los valores de G obtenidos, especialmente sobre el parámetro W. El parámetro R, dependiente de la morfometría, mostró menor variabilidad. Los incrementos en G asociados a escenarios post-incendios forestales mostraron que la cobertura vegetal es una variable de alta sensibilidad, y que su pérdida incide diferencialmente según el contexto litológico-geomorfológico afectado. Considerando los escenarios de incrementos en precipitación y temperatura proyectados para el centro-sur de Córdoba para los años 2020 y 2050, G aumentó aproximadamente un 9% y un 20%, respectivamente, en relación a las condiciones actuales.

Palabras clave: producción de sedimentos, Sierras Pampeanas, incendios forestales, cambio climático, río Las Cañitas

Abstract

In a drainage basin, the sediment yield (G) synthesizes the complex relationships between geological, geomorphological, climatic, biotic and land uses features, being one of key variables that define the dynamics of the main stream. Considering the complexity for direct measures, G can be estimated using prediction methods such as Gavrilovic's equation, which link production (W) and retention (R) sediment coefficients. This procedure was applied in Las Cañitas river basin (Comechingones Mountains). The influence of control variables was analyzed and hypothetical land uses and climatic conditions changes were taken into account. The Córdoba Pampean Mountains are formed by lower Precambrian- Paleozoic bedrock blocks with an asymmetrical, sub meridian arrangement and heights descending from 2600-650 m.a.s.l. towards the East and South. The studied basin is developed on the eastern slope of Comechingones Mountains and its piedmont area. Eight geomorphological environments characterized by a relief strongly controlled by lithological and topographic features were defined. Each unit was characterized considering the variables involved in Gavrilovic methodology such as vegetation cover and land use, among others. The obtained sediment yield value was 21.43 tons/ha/yr. The R average value was 0.15, indicating that 15% of the sediment yield is transported while the rest would be retained in the different sub-basins. Lithological-geomorphological features show great influence on the obtained G values, especially on W. The R parameter, dependent from basin morphometry, showed less variability. G values increments, associated with post-wildfire scenarios, showed that vegetation cover is a highly sensitive variable whose loss influences G in different ways according to the lithological-geomorphological setting. Considering the projected climatic scenarios (2020 and 2050) for the South-Central Córdoba region, with higher temperature and precipitation than present conditions, G increased approximately 9% and 20%, respectively.

Keywords: yield sediments, Pampean Ranges, wildfire, landuse, climatic change, Las Cañitas river

¹ Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 – Km 601, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. CP: X5804BYA. Tel: 0358-4676229. E-mail: mandreazzini@exa.unrc.edu.ar

² CONICET. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

³ Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA), Ezeiza.

Recibido: 28/08/2013

Aceptado: 25/03/2014

INTRODUCCIÓN

La producción de sedimentos sintetiza la compleja interrelación entre los aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos y de uso del territorio de una cuenca y a su vez es una de las variables principales que definen la morfodinámica de los cursos colectores. Su conocimiento adquiere alto valor, en tanto permite efectuar diagnósticos y pronósticos del funcionamiento de los sistemas fluviales, tanto en condiciones naturales como intervenidas; sin embargo, su cuantificación es compleja.

Para definir propuestas de manejo de cuencas fluviales, ya sean de ordenamiento territorial o intervenciones directas en los cursos, resulta imprescindible conocer no sólo el volumen sino el comportamiento del material sólido generado en una cuenca, que es transportado luego por el sistema fluvial.

La cantidad de sedimentos entregados por una cuenca hidrológica en la unidad de tiempo se define como *producción de sedimentos*. No todo el material movilizado por procesos erosivos en una cuenca alcanza la red de drenaje, por lo que se considera como producción de sedimentos al volumen que se transporta hacia los colectores principales. En cuencas montañosas dicha producción se puede asociar fundamentalmente a dos fuentes, una relacionada a la *erosión superficial* generalizada del sustrato, y otra a los *procesos de remoción en masa* en sitios puntuales. La cantidad de sedimentos generados en una determinada cuenca hídrica y, consecuentemente, el grado de erosión de la misma, pueden evaluarse en forma indirecta a través de relevamientos topo-batimétricos de los vasos de lagos y embalses o mediante la utilización de mediciones sistemáticas de caudales sólidos en los cursos de agua (COBINABE, 2010). Sin embargo, es un problema común de muchas cuencas la inexistencia de estaciones de aforos sólidos, de caracterizaciones granulométricas del material transportado en suspensión y por arrastre de fondo, y de datos de sedimentación en espejos de agua. Resulta necesario entonces utilizar técnicas de predicción para determinar órdenes de magnitud de la producción de sedimentos. En general, las formulaciones analizan la interacción de factores tales como clima, litología, cobertura vegetal, uso del suelo y topografía.

A pesar de la gran cantidad de metodologías existentes, la valoración cuantitativa precisa de la producción de sedimentos, es imposible de asegurar debido a la complejidad del proceso erosivo, a la cantidad de factores que influyen en el mismo y a la escala de los fenómenos actuantes. Sin embargo, a pesar de las dificultades, pueden ajustarse ciertas metodologías con una precisión aceptable, que permita cumplir los objetivos perseguidos (UNESCO, 2010).

Entre ellas, la metodología de Gavrilovic (1972, 1988) ha sido empleada en diferentes contextos

geológicos, climáticos y de uso del territorio, con resultados en general aceptables. En numerosas cuencas de montaña ha podido ser validada a partir del contraste de los resultados con mediciones de caudales sólidos en suspensión y la comparación de batimetrías en embalses. Originalmente, este método fue desarrollado para ser aplicado en cuencas de montaña en el Sur y Sudeste de Yugoslavia, y luego fue utilizado en Suiza, Italia (Bazzoffi, 1985), Croacia (Globevnik *et al.* 2003), Grecia (Emmanouloudis *et al.* 2003), entre otros. Más recientemente diferentes autores utilizan esta metodología en conjunto con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Panagos *et al.* 2014), o para contrastar los resultados alcanzados con otros modelos, tales como el PSIAC (Pacific Southwest Inter Agency Committee) (Vezzoli *et al.* 2013), obteniendo un buen nivel de aproximación. Tosic *et al.* (2012) emplea la ecuación de Gavrilovic para comparar producción de sedimentos en relación a cambios importantes en el uso del territorio, como los ocurridos en la situación post-guerra en Bosnia y Herzegovina. En otros estudios, como los realizados por Abadi & Ahmadi (2011) en la cuenca Kasilian (Irán), se observa que la metodología de Gavrilovic sobrestima los datos medidos, aunque los autores sugieren que es posible mejorar los resultados utilizando los Sistemas de Información Geográfica para discretizar los parámetros intervinientes. En Argentina se ha empleado satisfactoriamente en cuencas del Noroeste (Brea *et al.* 1999; Olmos *et al.* 2008; COBINABE, 2010; Brea y Spalletti, 2010) y en la Patagonia (Spalletti y Brea, 2006). Beltramone *et al.* (2005) presentan estimaciones realizadas por este método para cuencas serranas de Córdoba. Diversos trabajos han utilizado esta metodología en combinación con técnicas de SIG, demostrando un gran potencial para la estimación de la erosión de suelos en las cuencas (Globevnik *et al.* 2003; Amini *et al.* 2010; Olmos *et al.* 2008; COBINABE, 2010; Brea y Spalletti, 2010; Tangestani, 2006, entre otros).

Específicamente, para los cursos que drenan las Sierras Pampeanas de Córdoba, en especial su extremo sur, aún son pocos los trabajos que se refieren a la producción y/o transporte de sedimentos y sus principales características (textura, composición, etc.) entre los que pueden citarse Corral *et al.* (2009), Ulla (2008) y Degiovanni *et al.* (2010), entre otros. Considerando los aspectos morfodinámicos e intervenciones realizadas y previstas en la red de drenaje de esta región, el conocimiento de todas estas variables y sus proyecciones futuras, resulta de primordial importancia para mejorar la gestión de los recursos hídricos.

La mayoría de los cursos del sur de Córdoba nacen en la Sierra de Comechingones (Sierras Pampeanas) y se integran a la cuenca del Plata, ya sea natural o artificialmente (Degiovanni *et al.*, 2005, Blarasin *et al.*, 2005). Especialmente en la última centuria, en respuesta a cambios climáticos, de uso del territorio

e intervenciones ingenieriles, la red de drenaje en su conjunto se encuentra desajustada, dominando los procesos de incisión y erosión retrocedente, en las cuencas medias y bajas, con una alta tasa de transporte de sedimentos hacia las áreas de descarga, lo que promueve nuevas intervenciones (Blarasin *et al.*, 1993; Cantero *et al.*, 1998; Degiovanni, 2008; Degiovanni *et al.*, 2009; 2014).

En las cuencas altas se registran alteraciones vinculadas a sobrepastoreo, obras hidráulicas y, especialmente, incendios forestales. Esta problemática, muy común y recurrente en las sierras de Córdoba, tiene alto impacto en los caudales líquidos y sólidos de los cursos de agua. La mayoría de los años se registran numerosos focos de incendio (150-200), especialmente entre los meses de julio y noviembre, que involucran importantes áreas de bosques y pastizales naturales. En los años 2008, 2010 y 2013, se afectaron 61.541,65 has, 10.305 has (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2009 y 2011) y más de 50.000 has, respectivamente.

Por otra parte, considerando los cambios en las variables climáticas (precipitación y temperatura) proyectados para la región centro-Sur de Córdoba (AIACC, 2006) también es esperable que surjan modificaciones en la producción de sedimentos, por lo que resulta de interés evaluar también estos escenarios hipotéticos.

Así, el objetivo de este trabajo fue estimar la tasa de producción actual de sedimentos de una subcuenca representativa de la problemática descrita, analizar la influencia de las variables de control y efectuar estimaciones de producción considerando cambios en el uso del suelo y en las condiciones climáticas. Se seleccionó la subcuenca del río Las Cañitas, que integra el sistema del río Cuarto, uno de los más intervenidos de la región, especialmente en su cuenca media debido a que presenta extracción de áridos, rectificaciones y obras transversales, y en su cuenca baja por la existencia de canalizaciones.

Cuenca del río las cañitas: características generales

La cuenca de estudio se desarrolla sobre la vertiente oriental de la Sierra de Comechingones (Sierras Grandes) y sector pedemontano adyacente. Estas serranías forman parte de las Sierras Pampeanas de Córdoba, constituidas por bloques submeridianos de basamento cristalino precámbrico-paleozoico inferior, que conforman cordones montañosos de perfil transversal asimétrico. Su borde occidental es más abrupto y está representado por la escarpa de falla principal, mientras que el oriental constituye la pendiente estructural de menor pendiente. Sus alturas varían desde 2600 a 650 m.s.n.m., descendiendo hacia el Este y Sur.

La cuenca del río Las Cañitas forma parte de la cuenca alta del río Cuarto (provincia de Córdoba, Argentina), y drena una superficie de 267 Km² en el faldeo oriental de la Sierra de Comechingones (Fig. 1), entre los 1800 y los 650 m.s.n.m. Esta vertiente está fuertemente disectada por la red de drenaje, que preserva relictos de superficies de erosión en los sectores cumbrales ("pampas de altura"). En el área serrana dominan rocas metamórficas poco alteradas y, subordinadamente, rocas miloníticas y graníticas. En el pedemonte, valles serranos y pampas de altura, se presentan sedimentos cuaternarios aluviales, coluviales y eólicos.

Desde el punto de vista geomorfológico se reconocieron ocho ambientes principales (Fig. 1), los cuales son caracterizados considerando además aquellas variables que intervienen en la metodología aplicada, como la vegetación y el suelo, entre otras. Las *pampas de altura* (I-A) presentan bajas pendientes, afloramientos rocosos parcialmente cubiertos por loess, suelos de alto desarrollo, erosión hídrica localizada, canales de lecho rocoso poco profundos, escasos materiales aluviales y alta cobertura de pastizales. La *superficie metamórfica central* (I-B) exhibe un 40 a 60% de superficie rocosa, pendientes moderadas-altas, cursos muy incididos de lecho rocoso y aluvión subordinado, procesos gravitatorios e hídricos muy localizados asociados a depósitos coluviales, parcialmente edafizados y cubiertos de pastizales. El *ambiente granítico* (I-C) posee alto porcentaje de afloramientos de roca alterada (arenización) y erosión activa, cursos con mayor material aluvional, y cubierta de pastizales discontinua. El *sector serrano oriental y bloque pedemontano* (I-D y E) presenta menor pendiente y áreas de afloramientos, mayor agradación en valles, mayor cobertura arbórea-arbustiva y pastizales, mejor desarrollo edáfico, y cárcavas locales en ejes de valles. La *planicie de agradación pedemontana* (IIA, B, C) está incidida por los ríos principales, que desarrollaron cursos meandriformes hasta su semiconfinamiento en secuencias cohesivas. Los procesos de erosión hídrica son moderados a leves.

El clima de la región es de tipo Templado Subhúmedo, disminuyendo las precipitaciones medias anuales (PMA) y la temperatura media anual (TMA) desde la zona pedemontana (Estación Las Tapias, 728 m.s.n.m., con 910.9 mm y 14 °C, Fig. 1) hacia las pampas de altura (Estación La Cumbre, 1500 m.s.n.m., con 760.8 mm y 11.9 °C, Fig. 1). Las lluvias son estacionales, concentrándose el 80% en el periodo primavera-verano.

Respecto al uso del suelo, el sector serrano se destina a ganadería extensiva, con mayor sobrecarga de ganado vacuno en las pampas de altura. En el sector pedemontano predomina la agricultura.

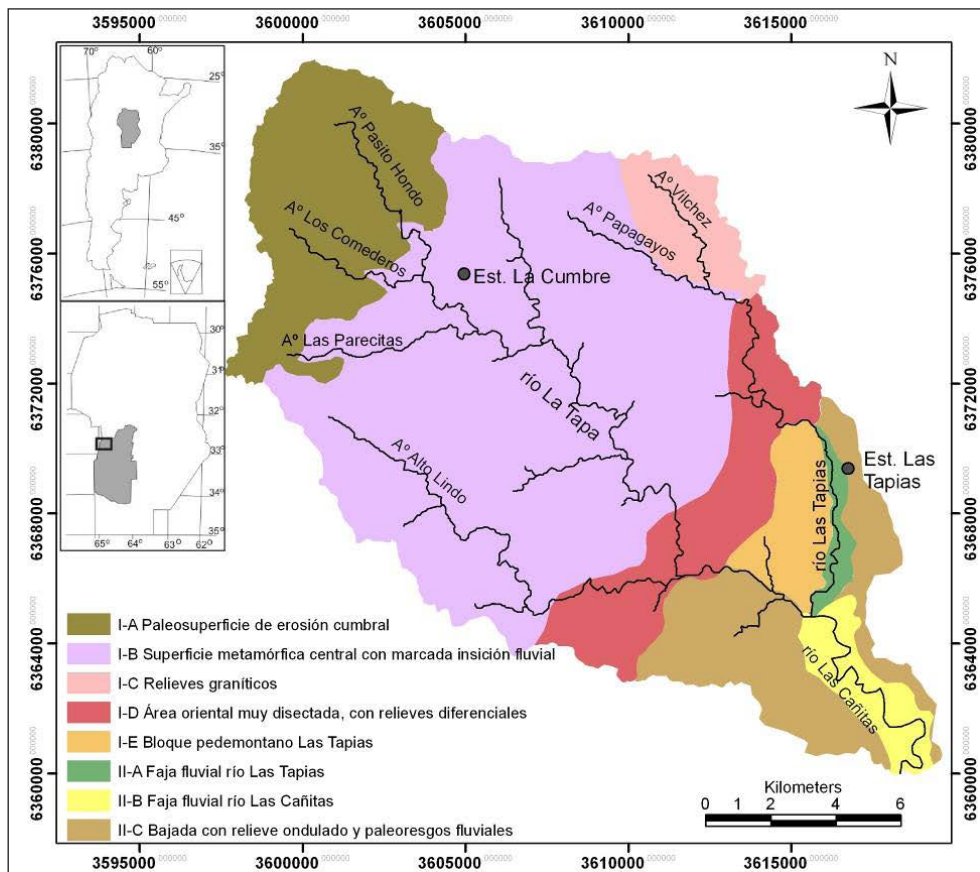


Figura1. Ubicación de la cuenca Las Cañitas y mapa geomorfológico. Se sitúan además las estaciones meteorológicas La Cumbre y Las Tapias.

METODOLOGÍA APLICADA

En este trabajo se aplicó el método de Gavrilovic (1972, 1988), que considera el volumen de sedimentos “G” (en m³/año) producido por erosión y transportado a la sección de cierre de una cuenca, como el producto de la producción media anual de sedimento por erosión superficial “W” y el coeficiente de retención de sedimentos “R”.

La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \text{ (m}^3\text{/año)} \quad (1)$$

Donde:

T = coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = [(t/10) + 0.1]^{1/2} \quad (2)$$

Siendo *t* la temperatura promedio anual (°C), *h* la precipitación media anual (mm/año) y *F* la superficie de la cuenca (km²). *Z* es el coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + 1)^{1/2} \quad (3)$$

Los valores de los coeficientes *X* (entre 0.1 y 1), *Y* (entre 0.2 y 2) y *φ* (entre 0.1 y 1) son propuestos por

el autor de la metodología y representan respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de resistencia a la erosión del suelo considerando sus características geolitológicas, y el estado erosivo de la cuenca. *I* es el gradiente de la pendiente superficial (en %).

Por su parte, el coeficiente *R* indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial. La ecuación para su cálculo según Zemljic (1971) es la siguiente:

$$R = [O \cdot D^{1/2} \cdot (L + Li)] / (L + 10) \cdot F \quad (4)$$

Donde *O* es el perímetro de la cuenca (km), *D* la diferencia de nivel media en la cuenca (cota media menos cota mínima, en km), *Li* la longitud total de los afluentes fluviales laterales (km), *L* la longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km) y *F* la superficie de la cuenca (km²).

Toda la información fue trabajada en ambiente SIG, obteniendo el valor de “G” en 47 subcuencas.

El valor del coeficiente *X* se asignó a partir de un mapa de cobertura vegetal y uso del suelo, elaborado desde una imagen Landsat 5 de fecha 31/12/08, y tomando como base el trabajo de Suárez (1993) e

imágenes Google Earth. Se realizó una clasificación supervisada por el método de máxima verosimilitud, obteniendo 9 clases.

Para definir la distribución espacial de los parámetros Y y ϕ , se utilizó la información litológica y geomorfológica, la de las características edáficas y la de los procesos activos observados en la cuenca, basadas en datos de campo, trabajos antecedentes e información cartográfica disponible.

El mapa de pendientes (en %) fue obtenido a partir de un modelo de elevación digital de la banda X del Shuttle Radar Topographic Mission (25 m de resolución), disponible gratuitamente en EOWEB-NG (2013).

La distribución de las lluvias y temperatura en función de la cota se obtuvo por regresión, utilizando los datos de las estaciones Las Tapias y La Cumbre (Fig. 1).

Desde el modelo de elevación digital y empleando herramientas SIG, se obtuvo la red de drenaje y un total de 47 subcuencas, en general de orden 3. A partir de ello se calcularon las áreas y perímetros de las subcuencas y la longitud de los cursos principales y tributarios.

Se calculó el valor de W para las distintas subcuencas, y finalmente se obtuvo el volumen de sedimento G ($m^3/año$) para cada una de ellas y para la cuenca completa.

Luego de obtenida la producción de sedimentos para las condiciones climáticas y de uso del suelo actual, se realizaron cálculos para compararla con la producción en escenarios hipotéticos de: 1) situación post-incendios forestales, y 2) incremento en la precipitación y temperatura media anual.

En el primer caso y teniendo en cuenta la heterogeneidad espacial de las variables que controlan los procesos erosivos, se consideró conveniente evaluar las modificaciones en la producción total de sedimentos, si el incendio afectara a diferentes unidades geomorfológicas. Se asumió un incendio hipotético de 550 has en los ambientes de relieves graníticos (I-C), la unidad metamórfica central (I-B), y las pampas de altura (I-A), siendo el área quemada igual dentro de cada ambiente. Fueron modificados únicamente los valores del coeficiente X del método de Gavrilovic en los tres casos analizados, y dentro de esas áreas no se incluyeron los afloramientos rocosos.

En el segundo caso se empleó información sobre escenarios de cambio climático proyectados para la región centro-sur de la provincia de Córdoba, disponibles en AIACC (2006). En dicho estudio se construyeron escenarios climáticos base a partir de datos del período 1961-1990 de las variables temperatura y precipitación, y escenarios de cambio climático para el 2020 y 2050. Estos autores utilizaron las salidas de tres Modelos Climáticos Globales (MCG): EH4TR98 del European Center for Medium Range Weather Forecast, GFDLTR90 del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory, y HAD3TR00 del

Centro Hadley; y escenarios de emisión A2 (mayor desarrollo económico) y B2 (mayor sustentabilidad ambiental). Para el presente trabajo se tomaron solamente los resultados obtenidos con el primer MCG (denominados escenarios E-A2 y E-B2), ya que fueron los que proyectaron los máximos incrementos en precipitación, y sólo se evaluaron cambios en la producción de sedimentos modificando las variables climáticas en la metodología de Gavrilovic.

Para el caso del escenario E-A2, la PMA de la serie Las Tapias-Los Chañares y de la Estación La Cumbre fue incrementada en un 6.57% y la TMA en 0.07 °C para 2020, mientras que para 2050, la PMA se incrementó en un 16.94% y la TMA en 0.64 °C.

En el escenario E-B2, la PMA de las series utilizadas fue incrementada en un 6.10% y la TMA en 0.19 °C para el escenario 2020. Para el 2050, la TMA se incrementó en un 13.14% y la TMA en 0.55 °C. Si bien el registro de la Estación La Cumbre es de corta duración, se lo utilizó ya que son datos medidos en la cuenca, de modo que los resultados obtenidos surgen de considerar estos datos como representativos de un período de mayor longitud (el evaluado como escenario de base).

RESULTADOS

Producción de sedimentos para las condiciones actuales

La Figura 2 presenta el mapa de clases de vegetación (incluyendo las áreas correspondientes a afloramientos rocosos y cauces fluviales) y la Figura 3 el mapa del coeficiente X para el área de estudio. Se asignaron los menores valores de X a las unidades Bosque (que es de tipo alto y abierto en este caso, con vegetación arbustiva y herbácea en la base), Pradera (pastizales con más de 70% de cobertura), Mallines (cobertura del 90% de herbáceas, dominando pastizales), y Estepa Arbustiva (cobertura herbácea con monte bajo). Valores intermedios se asignaron a la unidad Estepa Herbácea, que posee un 60-70 % de cobertura herbácea y 30-40 % de afloramientos rocosos, y a las Áreas Cultivadas, donde la cobertura dada por los cultivos genera menos protección que en los casos anteriores. Los valores mayores se indicaron para los sectores donde dominan los afloramientos rocosos (60% o más) y para los cauces fluviales, siendo en ambos casos la cobertura vegetal mínima o ausente.

Para el coeficiente Y (Fig. 4), se asignaron los valores más altos a los suelos arenoso-limosos con bajo desarrollo edáfico del sector extraserrano, y a los desarrollados en la faja fluvial del río Las Cañitas. A los suelos de las pampas de altura, si bien son loésicos, se les otorgó un valor menor dado su mayor contenido en arcillas y materia orgánica, su fuerte estructura y su mayor espesor. Valores intermedios se seleccionaron para los suelos de escaso desarrollo, sobre materiales heterogéneos, presentes en laderas de variada pendiente dentro del ambiente gra-

nítico y metamórfico. Finalmente, los más resistentes se asociaron a los suelos de los mallines (resistencia debido a la saturación), sedimentos aluviales de granulometría muy gruesa de los cauces y a los aflora-

mientos rocosos (con una mayor resistencia en las metamorfitas, dado que la roca se encuentra con muy bajo grado de alteración).

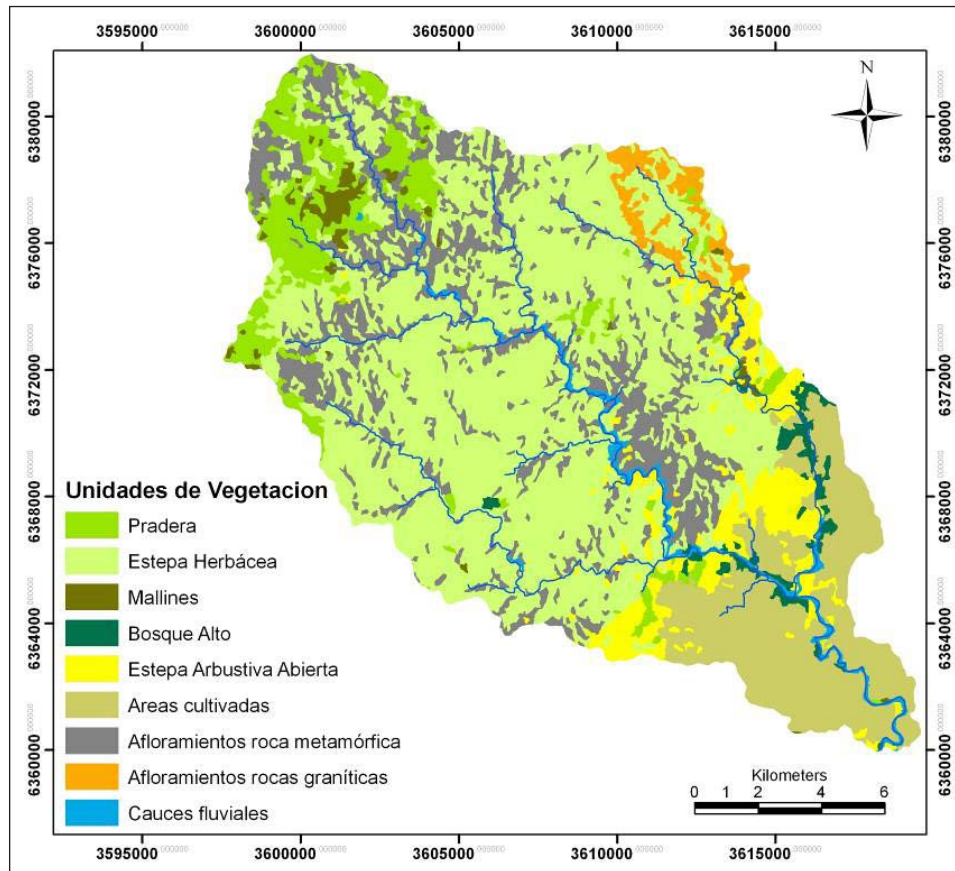


Figura 2. Mapa con las clases de vegetación definidas para la cuenca del río Las Cañitas.

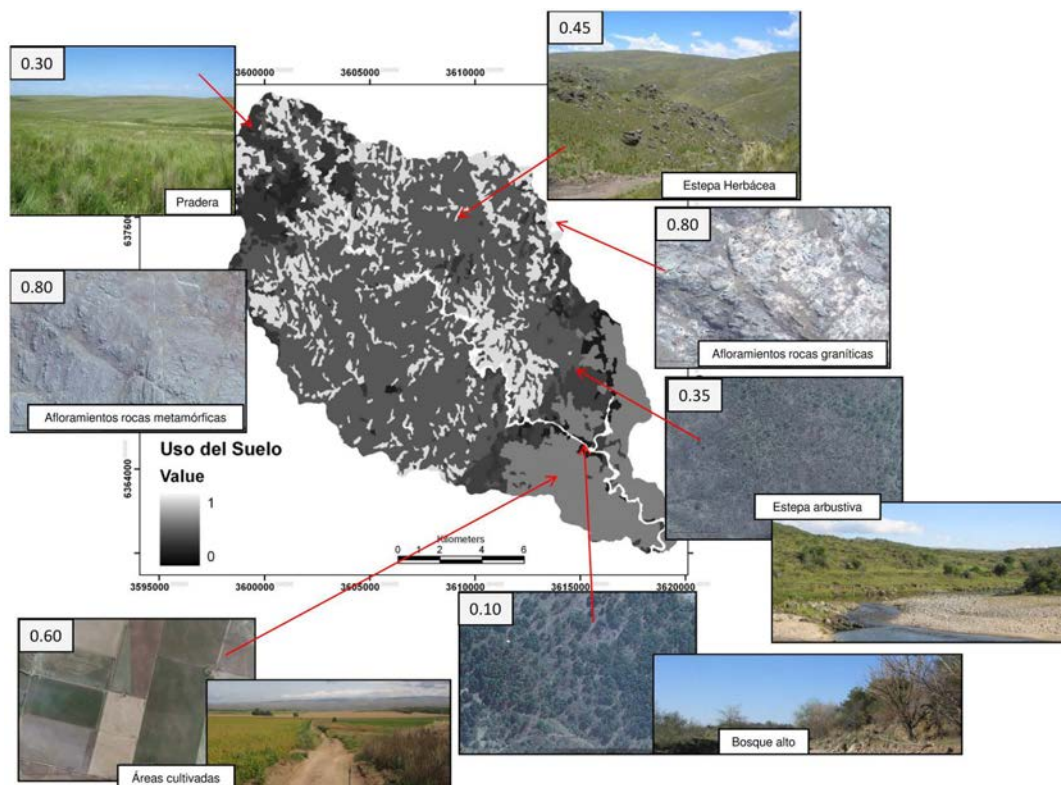


Figura 3. Mapa del coeficiente X de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

En el mapa para el coeficiente ϕ (Fig. 5) las unidades con menor presencia de rasgos erosivos son las vinculadas al ambiente metamórfico, donde los afloramientos se encuentran prácticamente inalterados, y en las laderas de los valles se observa mínima erosión, asociada a pequeñas cárcavas que en general se encuentran estabilizadas. Desde las laderas de mayor pendiente llegan al canal aportes por procesos gravitatorios muy localizados. Valores bajos también fueron asignados a los sectores de Bosque y Estepa Arbustiva, asociados al sector más oriental de la sierra, donde localmente se desarrollan cárcavas en los ejes y laderas de los valles con relleno sedimentario. En el sector extraserrano, también los procesos de erosión hídrica en surcos y cárcavas están muy localizados, especialmente en los bordes de terrazas fluviales, por lo que el coeficiente asignado fue intermedio a bajo. Entre las unidades con mayor evidencia de procesos de erosión se incluyeron algunos sectores en las pampas de altura, donde se han desarrollado cárcavas de cientos de metros de longitud, aunque en la actualidad se encuentran parcialmente vegetadas y estabilizadas, como puede

comprobarse comparando su extensión y desarrollo en fotografías aéreas del año 1970 e imágenes satelitales actuales. En el ambiente granítico, los rasgos erosivos son más importantes, y es posible observar el grado de alteración que presenta la roca expuesta, que lleva a la arenización de la misma. Se observan rasgos de erosión laminar y rills, además de cárcavas en los materiales sueltos que conforman las laderas.

Por otra parte, el mapa de pendientes para la cuenca se muestra en la Figura 6a. La pampa de altura, el sector serrano oriental y el extraserrano muestran los menores valores, mientras que el sector serrano central los más elevados, en especial la unidad metamórfica, con abruptas laderas asociadas al marcado proceso de incisión fluvial, controlado por estructuras de dirección NO-SE y ENE-OSO.

Por su parte, la Figura 6b muestra el modelo de elevación del terreno utilizado y las subcuencas y cursos fluviales principales, a partir de los cuales se calcularon los parámetros para determinar el coeficiente "R".

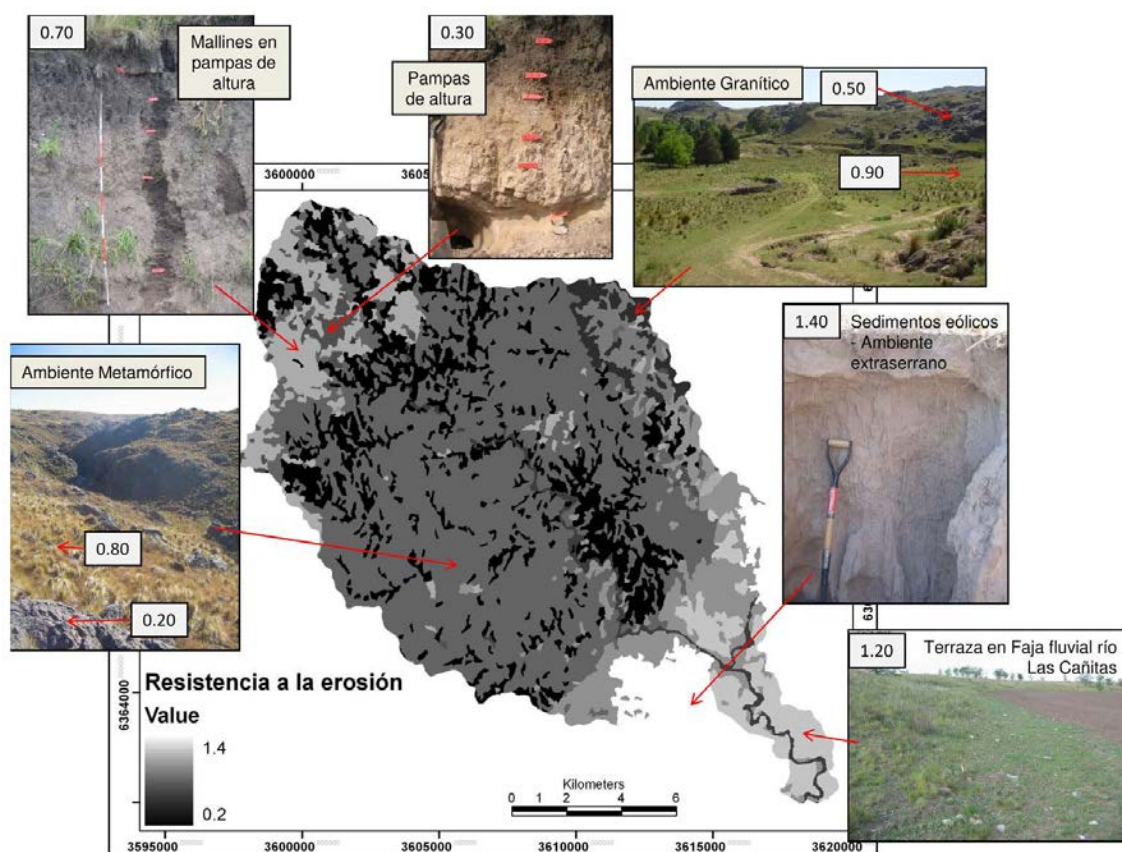


Figura 4. Mapa del coeficiente Y de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

El valor de producción de sedimentos obtenido, sumando la producción de las 47 subcuencas fue de 216220.41 m³/año, lo que da un total de 21.43 tn/ha/año. Según esta metodología, el valor promedio de R dio 0.15, indicando que del total de la producción de sedimentos en la cuenca, el 15% pasa a transporte y el resto quedaría retenido dentro de la misma, en las

distintas subcuencas. La Figura 7 y Tabla 1 muestran la distribución espacial de la producción de sedimentos en los diferentes ambientes geomorfológicos de la cuenca.

Como puede observarse hay una marcada variación de la producción de sedimentos, con valores máxi-

mos en el ambiente granítico, controlado fundamentalmente por los coeficientes γ y ϕ , que evidencian el mayor grado de meteorización de las rocas graníticas, la presencia de procesos erosivos activos

y una cubierta de pastizales más discontinua. Este ambiente con sólo el 4.7 % del área total aporta el 8.4 % de G , al igual que otras unidades que triplican el área.

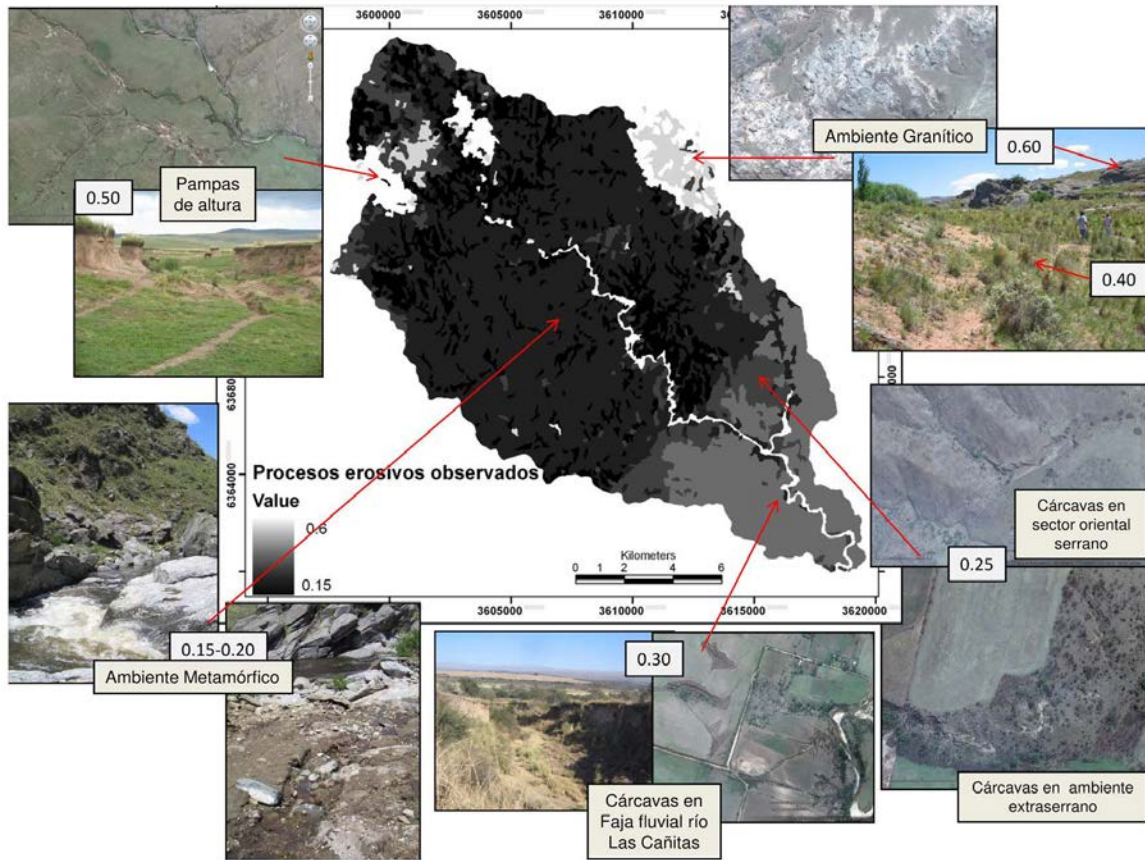


Figura 5. Mapa del coeficiente ϕ de la metodología de Gavrilovic para la cuenca Las Cañitas.

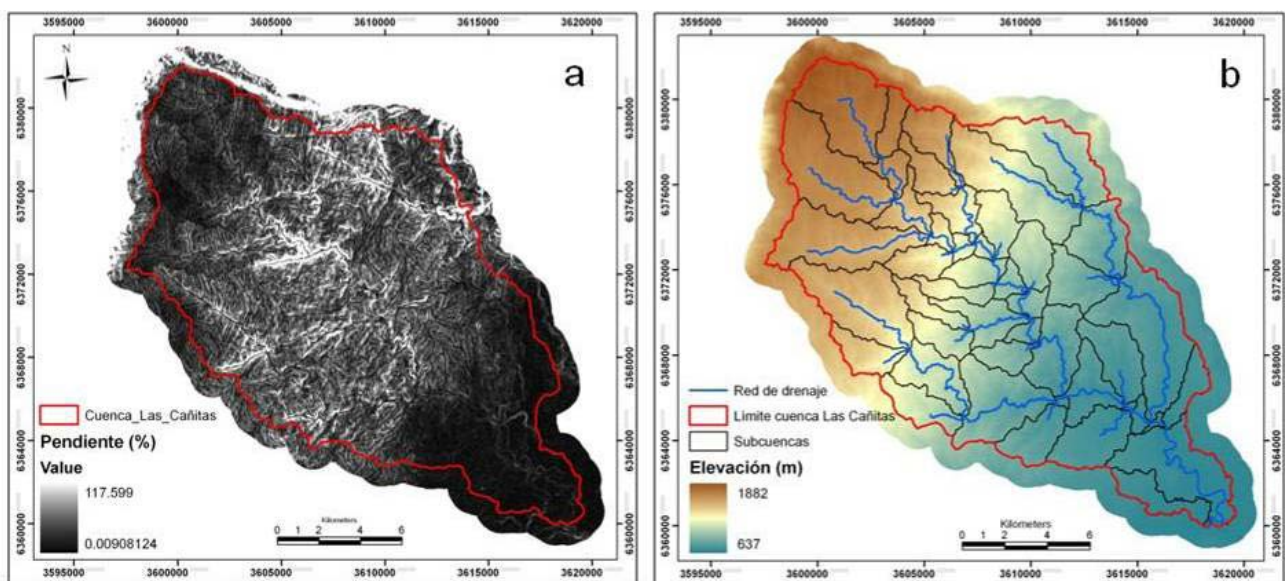


Figura 6. a- Mapa de pendientes y b- Modelo de elevación digital, red de drenaje principal y subcuencas definidas para la cuenca Las Cañitas.

Las unidades con menor producción son las del sector serrano oriental (I-D y E) y pampas de altura (I-A) dado sus menores pendientes, desarrollo edáfico y cobertura vegetal. Se destaca la baja producción de la unidad I-A, asociada a suelos con alto contenido en materia orgánica y arcillas (y saturados en los mallines), e importante cobertura de pastizales. La zona extraserrana muestra una producción intermedia, donde los mayores valores se asocian a suelos limosos-arenosos muy

finos, de moderado desarrollo y uso agrícola (II-C). Finalmente, la unidad I-B con una producción intermedia, aporta casi el 67% de G debido a su mayor superficie, y es la que define el aporte medio de la cuenca (21.4 tn/ha/año). En este caso la distribución interna de G es muy variable, y los más altos valores se asocian a las laderas de moderada a alta pendiente de los valles incididos, cubiertas de derrubios con suelos de alta infiltración y poco profundos.

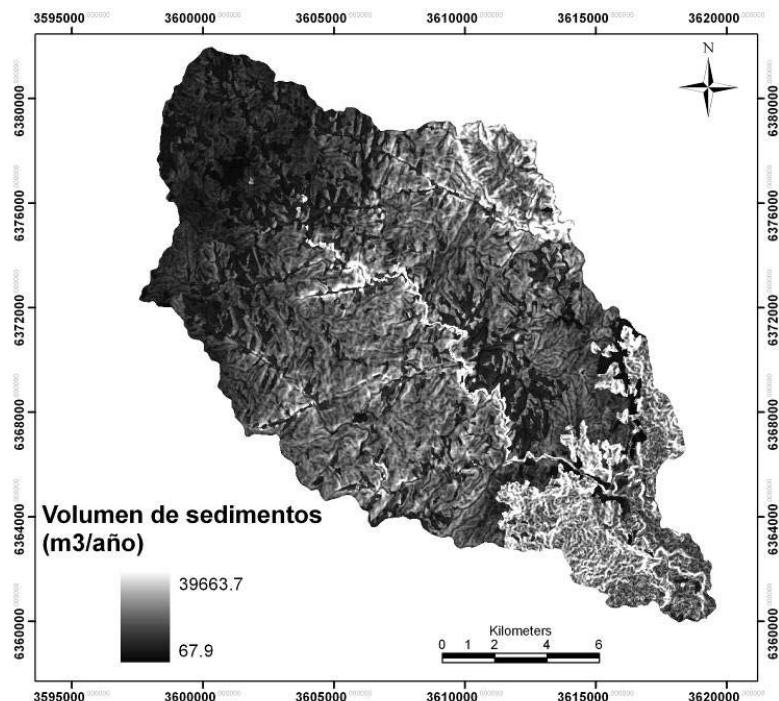


Figura 7. Mapa de la tasa anual promedio de producción de sedimentos por erosión superficial cuenca Las Cañitas (m³/año).

Tabla 1. Cuenca Las Cañitas. Producción de sedimentos en condiciones actuales (G) y post-incendio (G_i =promedio en cada unidad x total cuenca, G_{it} =total cuenca x promedio en cada unidad). Se incluye el valor promedio de R de cada unidad.

Unidad Geomorfológica	Área	R promedio	G tn/ha/año - %	G_i	G_{it}	% cambio G_i vs. G
Total cuenca	100	0.16	21.4-100	---	---	---
I-A	13.2	0.16	9.8-6	15	22	53.1
I-B	57.3	0.18	25-66.9	26	22.4	6
IC	4.7	0.2	38.9-8.4	66	22.8	69.9
I-D+I-E	13.3	0.1	14.3-8.8	19	22.2	32.9
II-A, ByC	11.7	0.1	18-9.8	---	---	---

PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS PARA ESCENARIOS HIPOTÉTICOS

Incendios forestales

En la Tabla 1 se presentan los valores de producción de sedimentos para una situación post-incendios forestales en la cuenca. Si bien no son significativos

los cambios en la producción total de la cuenca (G_{it}), al considerar incendios en diferentes unidades, surgen incrementos mayores, especialmente en I-A y I-C, demostrando la alta sensibilidad de estos ambientes a la pérdida de vegetación.

En el caso de la pampa de altura, con un 13% del área quemada, la producción se incrementa en más

del 50%. La pérdida de los pastizales de alta cobertura deja expuestos suelos desarrollados sobre materiales loessoides, los cuales a pesar de la baja pendiente que posee esta unidad, muestran alta sensibilidad a los procesos erosivos. Si bien estos suelos poseen buena estructura y alto contenido en materia orgánica, debe tenerse en cuenta que los incendios también pueden afectar las propiedades físicas del suelo (agregación-estructura), convirtiéndose en muchas oportunidades en suelos hidrofóbicos, con lo que se potencia la tasa de erosión. Para el caso de la unidad granítica, con un 44% de área afectada, el valor de G aumenta un 70%, demostrando que esta unidad posee un alto potencial de producción al

alterar la protección del suelo dada por la cobertura vegetal, ya que los otros coeficientes de la metodología poseen valores intermedios a altos.

Como ejemplo, en el año 2011 y 2013 ocurrieron incendios en la cuenca Las Cañitas (Fig. 8a), y el contenido de sólidos en suspensión de los arroyos se incrementó durante el periodo de lluvias siguiente (Fig. 8b). El caudal sólido medido en el río Las Tapa, a la salida del área serrana, para caudales del orden de 0,7-0,8 m³/seg varió de 26,9 a 92 gr/seg en situaciones normales y con posterioridad a los incendios del 2011, respectivamente. Para el caso del río Las Tapias, la concentración de sólidos en suspensión varió de 0-0,07 gr/L en condiciones normales a más de 5 gr/L para crecidas post-incendios 2013 (Fig. 8b).

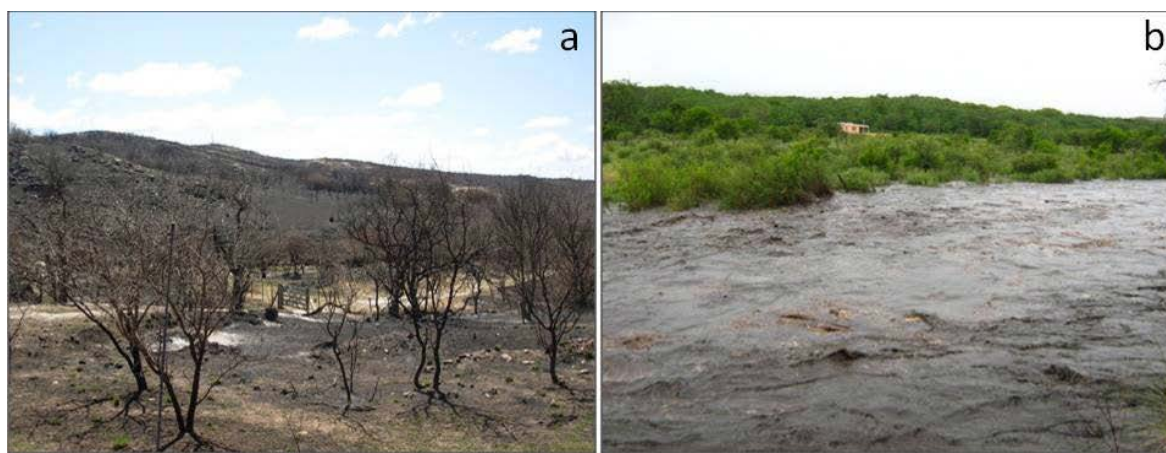


Figura 8. a) Vista de un sector de la subcuenca del río Las Tapias afectado por los incendios del 2013. b) Incremento de sólidos en suspensión en el río Las Tapias a la salida del sector serrano, en una crecida posterior a los incendios.

Cambio climático

Estos escenarios también mostraron incrementos en la producción de sedimentos (Tabla 2). Como puede observarse, la producción para el 2020 aumenta de manera similar en ambos escenarios, en algo más del 9% respecto a la condición actual. Aquí no se han marcado diferencias apreciables ya que la variación en la temperatura en el escenario A2 es muy pequeña. Para el 2050 los valores se incrementan aproximadamente en un 20% respecto a la producción total actual de la cuenca y se observan más diferencias entre escenarios, correspondiendo la mayor producción al E-A2.

Para comparar los cambios en la producción dentro de las distintas unidades geomorfológicas, a modo de ejemplo se muestran los porcentajes de cambio del escenario E-A2 para 2050 respecto a las condiciones actuales (Tabla 2), observándose que las mayores diferencias son para el sector serrano oriental y extraserrano. Tal como lo muestra la ecuación (1), al no modificar ninguno de los demás factores del método, las mayores producciones se asocian a las mayores precipitaciones y temperaturas, en este caso, en el sector oriental de la cuenca.

Tabla 2. Producción de sedimentos (tn/ha/año) cuenca Las Cañitas en los 4 escenarios climáticos proyectados.

Unidad Geomorfológica	G	E-A2 2020	E-A2 2050	E-B2 2020	E-B2 2050	% cambio E-A2 2050 respecto a G
I-A	9.8	10.4	11.7	10.5	11.5	19.4
I-B	25	27.3	30.6	27.4	29.8	22.4
IC	38.9	42.8	46.2	42.6	46.4	18.8
I-D+I-E	14.3	15.8	17.7	15.8	17.2	23.8
II-A, ByC	18	19.9	22.4	19.9	21.7	24.4
Total cuenca	21.4	23.4	26.2	23.4	25.5	
% cambio de la producción total	---	9.3	22.4	9.4	19.2	

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que los aspectos litológico-geomorfológicos tienen una marcada influencia en la producción de sedimentos en la cuen-

ca, especialmente sobre el parámetro W. El parámetro R, dependiente de la morfometría, mostró menor variabilidad. Además se observó que la distribución areal de las lluvias y temperaturas tiene menor incidencia para explicar variaciones en dicha producción.

Con relación a los escenarios evaluados, globalmente la producción de sedimentos se incrementa para los escenarios climáticos proyectados, aunque sería conveniente analizar también las variaciones de X y ϕ ante tales cambios, ya que las características de la cobertura vegetal y uso del suelo como así también la presencia de rasgos erosivos en la cuenca posiblemente, se verán afectados.

Por otra parte, los incrementos en la producción de sedimentos asociados a incendios forestales mostraron que en general la cobertura vegetal es una variable de alta sensibilidad, y que su pérdida incide diferencialmente según el contexto litológico-geomorfológico afectado.

Si bien los resultados obtenidos son preliminares, demuestran la importancia de discretizar el análisis de la producción de sedimentos en una cuenca determinada, para lograr una mayor representatividad de las variaciones de los parámetros que controlan la producción y el almacenamiento de sedimentos.

Finalmente, a pesar del carácter estimativo de la metodología empleada en el presente trabajo, los valores asignados a los diferentes coeficientes evaluados en la metodología de Gavrilovic surgen de un detallado tratamiento de la información disponible, apoyado en un importante relevamiento de campo, por lo cual se considera que los resultados obtenidos son consistentes y que este análisis podría ser extendido a otras cuencas de características similares en Sierras Pampeanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aalto, R., Dunne, T. & J.L. Guyot 2006. Geomorphic controls on Andean denudation rates. *The Journal of Geology* (114): 85-99. Abadi, I.Z. & H. Ahmadi, 2011. Comparison of EPM and geomorphology methods for erosion and sediment yield assessment in Kasilian Watershed, Mazandaran Province, Iran. *DESERT* 16: 103-109.

Amini, S., Rafiei, B., Khodabakhsh, S. & M. Heydari, 2010. Estimation of erosion and sediment yield of Ekbatan Dam drainage basin with EPM, using GIS. *Iranian Journal of Earth Sciences* (2): 173-180.

AIACC - Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change -. 2006. *Vulnerability and Adaptation to Climate Variability and Change: The Case of Farmers in Mexico and Argentina*. Final Report Project N° LA29. 173 p.

Beltramone, C., Barbeito, O., Ambrosino, S. & R. Ugarte. 2005. Determinación del área fuente y producción de sedimento anual para la cuenca superior

del río Cuarto. Pcia. de Córdoba. *Actas del XVI Congreso Geológico Argentino*. La Plata. 581-585.

Blarasin, M., Cantú, M., Degiovanni, S., Becker, A. & C. Eric, 1993. Estudio geoambiental de un área de llanura loésica sometida a alta presión de uso agrícola: el caso de General Deheza, Córdoba. *XII Congreso Geológico Argentino*, Mendoza. Tomo VI: 274-283.

Blarasin M., Degiovanni S., Cabrera A. & Villegas M. 2005. Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: Una perspectiva geoambiental. 1ª ed.- Universidad nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Argentina, 346 p.

Brea, D. & P. Spalletti. 2010. Generación y transporte de sedimentos en cuencas de ríos de montaña. Documento Técnico N° 22, 52-74. En Brea, J.D. & F. Balocchi (Eds.). *Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas*. Volumen 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.

Cantero, A., M. Cantú, J. Cisneros, J. Cantero, M. Blarasin, V. Becerra, J. González, A. Degiovanni, H. Gil, J. de Prada, S. Degiovanni, C. Cholaky, M. Villegas, A. Cabrera & C. Eric, 1998. Las tierras y aguas del Sur de Córdoba: propuestas para un manejo sustentable. Ed. UNRC. ISBN: 950-665-101-9.

COBINABE - Comisión Binacional para el desarrollo de la Alta Cuenca del Río Bermejo y el Río Grande de Tarija-. 2010. *Generación y Transporte de Sedimentos en la Cuenca Binacional del Río Bermejo*. Caracterización y análisis de los procesos intervinientes. 230 p.

Corral, M., Baldissoni, M., Farías, H., Rodríguez, A. & F. López. 2009. Balance sedimentológico simplificado para el río Cuarto, Córdoba. *Actas RIOS 2009: IV Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Salta, Argentina.

Degiovanni, S. 2008. Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del A° Achiras-del Gato, como base para su gestión sustentable. Tesis Doctoral, UNRC. Inédita. 597 pág.- Río Cuarto-Córdoba.

Degiovanni, S., N. Doffo & M. Villegas, 2009. Rejuvenecimiento de la red de drenaje del Sur de Córdoba como consecuencia del cambio climático durante la última centuria. En: *Geomorfología y Cambio Climático*- Capítulo 6. Sayago y Collantes (Eds.), IN-GEOMA (Universidad Nacional de Tucumán)- MAGNA Ediciones. 20 pág.

Degiovanni, S., Andreazzini, J., Villegas, M., Eric, C. & Doffo, N. 2010. Caracterización de la carga en suspensión de los arroyos del sur de Córdoba. Implicancias morfodinámicas y ambientales, 185-192. En Varni, M., Entraigas, I. & L. Vives (Eds.). *Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura*. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Azul, Buenos Aires, Argentina, 1301 p.

- Degiovanni, S., Echevarría, K., Andreazzini, J. & N. Doffo, 2014. Los sistemas fluviales del sur de Córdoba: alteraciones históricas, procesos de ajuste y consecuencias ambientales. Actas CD, XIX Congreso Geológico Argentino. Córdoba. 2 p.
- EOWEB- Earth Observation Center-. German Remote Sensing Data Center, Alemania, 01/09/2013. <http://eoweb.dlr.de:8080/>, e-mail: helpdesk-dfd@dlr.de
- Gavrilovic, S. 1972. Inzenjering o bujicnim tokovima i eroziji. 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, 18–20 May. John Wiley and Sons, Wallingford, Chichester, pp. 411–422.
- INA, 2007. Proyecto “Estudios de erosión, transporte y sedimentación en la cuenca alta del Río Pilcomayo”: determinación de la producción de sedimentos por erosión superficial en la cuenca alta del Río Pilcomayo. INA (Instituto Nacional del Agua, Argentina).
- Olmos, L.A., Spalletti, P., Farías, H.D. & M.T. Pilán 2008. Verificación de modelos de producción de sedimentos en cuencas del NO Argentino. Revista de Ingeniería del Agua, Vol. 15, N°2.
- Panagos, P., Karydas, C., Ballabio, C. e I. Gitas, 2014. Seasonal monitoring of soil erosion at regional scale: An application of the G2 model in Crete focusing on agricultural land uses. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 27 (2014) 147–155
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina. 2009. Estadística de incendios forestales 2008. 01/09/13, www.ambiente.gob.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202008/incend-2008-%20correg3/Documento%20completo.pdf
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina. 2011. Estadística de incendios forestales 2010, 01/09/13, www.ambiente.gov.ar/archivos/web/PNEF/file/Incendios%202010/Documento%20completo.PDF.
- Suarez, S.A. 1993. Mapeo fisionómico-estructural de la vegetación natural del Dpto. Río Cuarto. III Achiras y Las Cañitas. Informe final Beca de Iniciación Científica. Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Argentina.
- Tangestani, H. 2006. Comparison EPM and PSIAC Model in Erosion and Sediment Yield Assessment with GIS tools in Afzar Sub-Catchments, Fars Province, Iran, Elsevier Magazine, Vol. 27 (5): 585-597.
- Tosic, R., Dragicevic, S., Zlatic, M., Todosijevic, M. & S. Kostadinov, 2012. The impact of socio-demographic changes on land use and soil erosion (Case study: Ukrina river catchment). Географски разгledi (46):69-78.
- Ulla, J.P. 2008. Variación de parámetros sedimentológicos y su relación con la descarga e intervenciones de cauce en la cuenca media alta del río Chocancharava, Córdoba. Tesis de Licenciatura. Dpto. de Geología, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 159 p.
- UNESCO. 2010. Procesos de erosión - sedimentación en cauces y cuencas. Volumen 1. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe. Documento Técnico N° 22. Brea, J.D. & F. Balocchi (Eds.), 138 p.
- Vezzoli, G., Ghielmi, G., Mondaca, G., Resentini, A., Villarroel, E.K., Padoan, M. & P. Gentile 2013. Quantifying modern erosion rates and river-sediment contamination in the Bolivian Andes. Journal of South American Earth Sciences 45: 42-55.
- Zemljic M. 1971. Calcul du debit solide. Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosif. International Symposium Interpretevent, Villach, Austria.