

Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano

• Guillermo José Mendez* • Carlos Alberto Depettris • Jorge Víctor Pilar •
• Oscar Orfeo • Alejandro Ricardo Ruberto •
Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Mendez, G. J., Depettris, C. A., Pilar, J. V., Orfeo, O., & Ruberto, A. R. (septiembre-octubre, 2014). Transferencia de sedimentos de una microcuenca a la red de drenaje urbano. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(5), 21-37.

Los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son exiguos. Esto se debe a la complejidad del fenómeno y, especialmente, a su variabilidad. En este artículo se abordan tres aspectos: (1) la tasa anual de sedimento que genera una microcuenca durante tres años; (2) qué precipitaciones provocan mayores valores, y (3) cómo afectan las condiciones hidrológicas antecedentes de la cuenca en la carga de lavado de la escorrentía. Se monitoreó un microcuenca de la ciudad de Resistencia, Chaco, Argentina, de 4.76 ha y uso residencial, desde septiembre de 2009 hasta marzo de 2010. Se calibró un modelo hidrológico bajo el programa SWMM 5.0 y se trazaron curvas claves de sedimentos. Con esto y con las precipitaciones diarias de los años 2007/08; 2008/09 y 2009/10 se pudo obtener la carga anual de sedimentos transportados por la escorrentía urbana durante el periodo de análisis. Las cargas anuales de sedimentos transportadas oscilaron entre 0.8 y 1.40 t/ha. Los mayores valores se registraron en el periodo de septiembre a diciembre de cada año, en el que se transporta el 60% del total anual. Se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y, por tanto, mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables. Los resultados obtenidos fueron coherentes con las mediciones, por tanto es factible cuantificar el aporte de sedimentos de cuencas urbanas al drenaje pluvial.

Palabras clave: sedimentos, drenaje urbano, cuencas de llanura.

Introducción

La calidad del agua en áreas urbanas, en particular de los efluentes pluviales, es un tema

Abstract

Mendez, G. J., Depettris, C. A., Pilar, J. V., Orfeo, O., & Ruberto, A. R. (September-October, 2014). *Sediment Transfer from a Microbasin to an Urban Drainage Network*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(5), 21-37.

Little data exists on sediment generation and transport rates in urban areas. This is due to the complexity of the phenomenon and, in particular, its variability. Three factors are investigated in this article: (1) annual sediment rate generated in a micro-basin over three years, (2) determination of the precipitations resulting in the highest values and (3) how prior hydrological conditions in the basin affect the sediment load in runoff. A basin in the city of Resistencia, in Chaco, Argentina, was monitored (4.76 ha with residential use) from September 2009 to March 2010. A hydrological model was calibrated with the SWMM program 5.0 and the primary sediment curves were drawn. With this and daily precipitation data for the years 2007/2008, 2008/2009 and 2009/2010 the annual sediment load transported by urban runoff was obtained for the analysis period. These ranged from 0.8 to 1.40 t/ha. The highest values documented occurred from September to December of each year, during which 60% of the load was transported. It is concluded that there is a strong incidence of volume runoff of sediment loads, where the most impermeable areas generate large flows and, therefore, higher sediment loads than permeable areas. The results obtained were consistent with the measurements and, therefore, quantification of sediments in pluvial drainage in urban basins is feasible.

Keywords: Sediments, urban drainage, plain basins.

Recibido: 19/12/11
Aprobado: 23/01/14

que ha ganado importancia en los últimos años. Esto se debe a dos motivos: a) las ciudades albergan el 50% de la población mundial y para mediados del siglo XXI se estima que alcanzará

el 70% (Niemcynowicz, 1996, *apud* Maksimovic, 2001); b) las actividades humanas generan gran cantidad de polución, que se deposita en la superficie de calles, veredas y techos de los edificios, y es lavada por la escorrentía urbana. Es por esto que el efluente pluvial presenta altas concentraciones de contaminantes.

En consecuencia, una porción cada vez mayor de la población está expuesta de manera periódica a aguas que generan un impacto visual negativo, degradación del cuerpo receptor, efectos acumulativos tóxicos sobre plantas y animales, y crecimiento de microorganismos indeseables.

En la República Argentina, como caso paradigmático, puede citarse el desarrollo del conurbano de la ciudad de Buenos Aires sobre la cuenca Matanza-Riachuelo. A lo largo de su historia se ha generado ocupación de áreas naturalmente inundables, crecimiento no controlado de superficies impermeables y falta de espacio para el manejo eficiente de las aguas pluviales. Los problemas de hoy se reflejan en múltiples aspectos, como afectación en la salud de la población, inundaciones frecuentes y pérdida del medio ambiente rico y diversificado, entre otros. Con la transformación de un ambiente rural a uno urbano, este tipo de problema se agrava cada vez más (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina, 2009). En la cuenca y en sus alrededores, donde se asientan casi cinco millones de personas, los problemas hídricos actuales pueden ser clasificados, por simplicidad, en aquellos asociados con la calidad del agua escurrida y con la cantidad del agua tanto superficial como subterránea.

Para alcanzar un desarrollo sustentable, los roles del drenaje urbano en el ámbito mundial han cambiado y ahora, además de proporcionar una protección frente a las inundaciones, debe permitir el control de contaminantes y otorgar al efluente pluvial características que contribuyan a un ambiente urbano ameno.

Los contaminantes presentes en las escorrentía urbana son los siguientes: sedimentos, sustancias que demandan oxígeno,

nutrientes (nitrato y fósforo), metales pesados, pesticidas, grasas y aceites, bacterias y virus, ácidos y bases, sustancias húmicas precursoras de trihalometanos, gases malolientes, cloruros y sodios, etc. (Jiménez-Gallardo, 1999).

Unos de los contaminantes más importantes son los sedimentos. Éstos, transportados por el drenaje urbano, generan depósitos que obstruyen los conductos del sistema mayor; aumentan la turbidez del agua; cambian el lecho del cuerpo receptor, reduciendo su capacidad de flujo y afectando la vida acuática de éste. Además, la fracción más fina de los sedimentos es susceptible de transportar contaminantes adsorbidos, como metales pesados, amonio, fertilizantes, pesticidas y policlorobifenilos (PCBs), entre otros (Porto, 2001). Es decir, que los problemas generados por los sedimentos no sólo atañen la calidad del agua sino que conllevan pérdidas de suelo y afectación del sistema de conductos del drenaje, por lo que el abordaje de su problemática exige un enfoque mixto, en donde intervienen, entre otras disciplinas, la sedimentología e hidrología.

Dada la complejidad del proceso de erosión urbana es difícil identificar las fuentes de generación de sedimentos. En efecto, el ambiente urbano crea una gran y compleja mezcla de sedimentos que pueden ser provenientes de las cercanías, o bien ser importados de áreas próximas o, inclusive, lejanas. Además, los materiales de construcciones civiles son fuentes importantes de sedimentos urbanos; estudios demostraron que altas concentraciones de calcio en lagos son debidas a este tipo de sedimento (Poletto, 2008). La escorrentía genera fuerzas que pueden provocar el arrastre de sedimentos acumulados en calles y zonas con suelo desprotegido y los transportan a los conductos del sistema menor del drenaje urbano.

Los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son exigüos. Este hecho no se debe sólo a la complejidad del fenómeno en sí, sino en especial a su variabilidad (Ramos, 1995). Usualmente

la carga de sedimentos está relacionada con el volumen de escorrentía que depende de forma directa de la impermeabilidad. Estudios realizados en los Estados Unidos, en zonas urbanas de 1 016 mm anuales de precipitación, indican que las cuencas comerciales presentan una carga de sedimento anual 2.28 veces superior a una cuenca residencial, esto se debe a que en ese país las zonas comerciales presentan áreas impermeables mayores a las residenciales (EPA, 1983).

La ciudad de Resistencia está ubicada en el nordeste argentino, es la capital de la provincia del Chaco y cuenta con una pobla-

ción de 386 391 habitantes (INDEC, 2010). En conjunto con las ciudades de Puerto Vilelas, Barranqueras y Fontana conforma lo que se denomina Área Metropolitana del Gran Resistencia (AMGR). El AMGR está emplazado en la megaplanicie de inundación del río Paraná, aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay (figura 1).

El ejido del AMGR se encuentra en el interfluvio del río Negro por el norte y el riacho Arazá por el sur, ambos afluentes de margen derecha del río Paraná (figura 2).

El AMGR está emplazado en una zona influenciada por derrames y paleoderrames

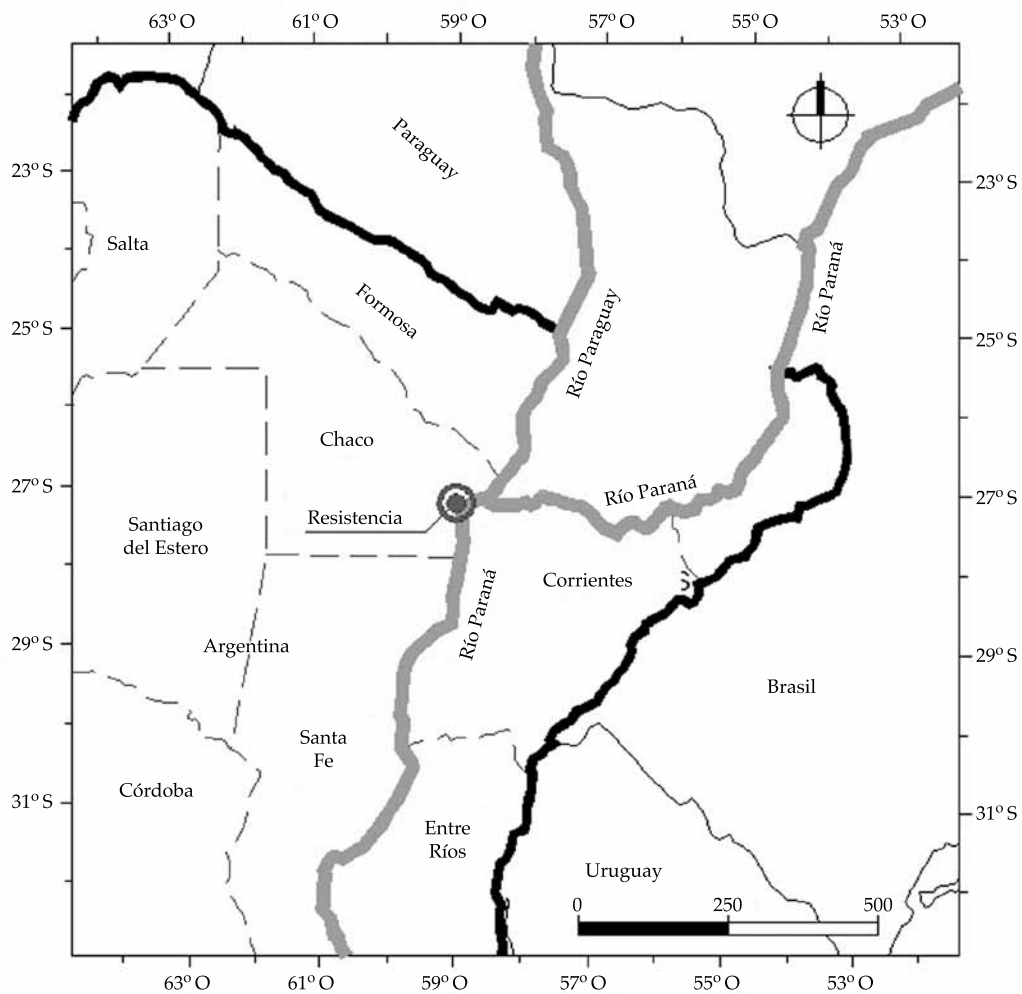


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Resistencia en el nordeste de la República Argentina.

del río Paraná, lo cual determina la presencia de abundantes sedimentos fluviales tanto en superficie como en subsuelo. Los sedimentos superficiales (hasta 2 m) están compuestos básicamente por una alternancia de limos y arcillas parcialmente edafizadas, con arenas subordinadas y niveles de elevada plasticidad. Por debajo y hasta unos 5 m de profundidad se encuentran arenas limosas y limos arenosos, desagregados, saturados de humedad y muy fluidos (Mendez, 2013). En general, dichos materiales sedimentarios son reconocidos como depósitos aluviales, mencionándose también en los alrededores la presencia de limos y limos arenosos de origen eólico (Segemar, 1997). Desde el punto de vista edáfico, se reconoce el desarrollo de argiúdoles sobre los depósitos aluviales, y de suelos natracuálf en la zona dominada por depósitos eólicos (INTA, 1990).

Otra característica de los suelos que influye en la forma en que este aporta a la escorrentía urbana es la dispersión. La dispersión es un proceso por el cual un suelo deflocula espontáneamente cuando está expuesto al agua que

tenga poco o nada de velocidad hidráulica. Se piensa que la dispersión es causada por lo general por la repulsión electrostática entre las partículas de la arcilla, resultando en la formación de una suspensión coloidal estable del suelo (Garay-Porteros & Alva-Hurtado, 1999). Orfeo (1997) encontró una importante tendencia a la desagregación en presencia de agua, lo cual revela un factor potencial de riesgo de movilización de partículas y baja capacidad de sustentación que debe ser tenido en cuenta.

En este artículo se abordan tres aspectos importantes: (1) la tasa anual de sedimento que genera una microcuenca del sector sur de la ciudad de Resistencia durante los tres años que duró el presente estudio; (2) qué precipitaciones son las que generan mayores valores de carga de sedimento, y (3) cómo afectan las condiciones hidrológicas antecedentes de la cuenca en la carga de lavado del efluente pluvial.

Un mejor entendimiento de estos aspectos será un subsidio importante que ayudará a conocer la calidad de la escorrentía urbana y

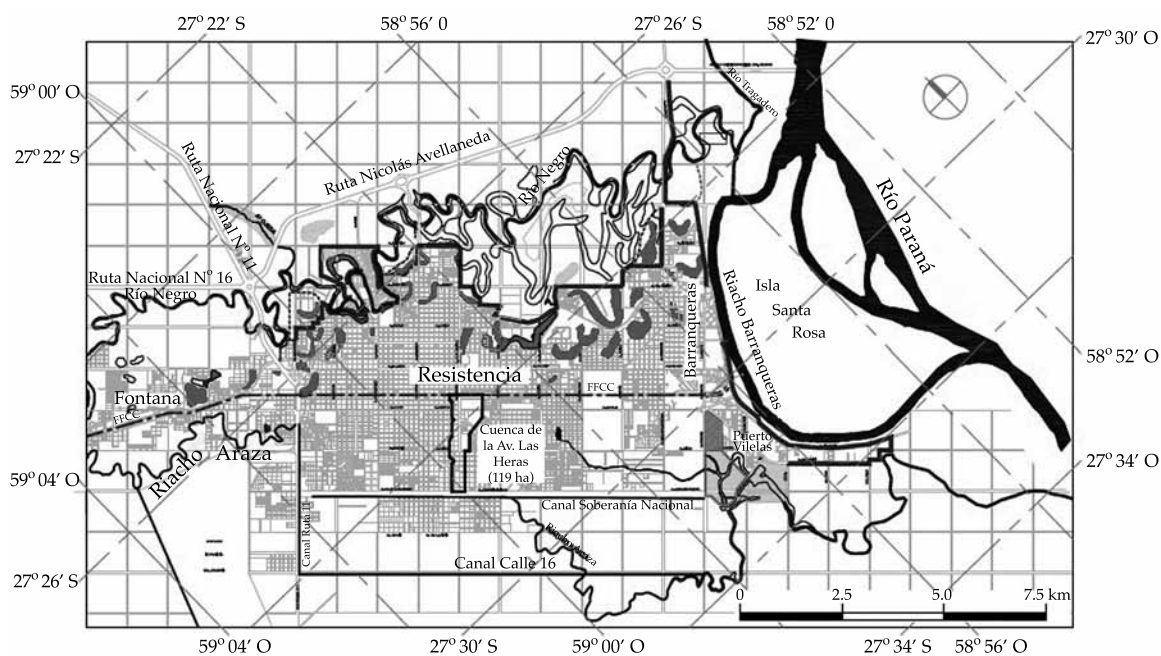


Figura 2. Ubicación de la cuenca de Avenida Las Heras.

propiciará un mejor diseño de sistemas de drenaje en áreas de llanura.

Este estudio fue realizado por el grupo de investigación del Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), con la colaboración de investigadores del Centro de Ecología del Litoral (Cecoal), del Conicet, en el marco del proyecto de "Hidrología Urbana del Nordeste Argentino", financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de la República Argentina.

Área de estudio

Se adoptó como área de estudio la microcuenca que descarga a los sumideros ubicados en la calle San Lorenzo de la ciudad de Resistencia, Chaco, aguas arriba de su intersección con la Avenida Castelli (figuras 2 y 3). La elección de

la misma respondió a una serie de factores (Depettris, Depettris, Kutnich, & Ruberto, 2009): a) presenta facilidad de acceso y supervisión; b) constituye un área de aporte cerrada; c) permite mediciones de flujo en calzada; d) presenta reducido estacionamiento de vehículos sobre la zona de medición, y e) las bocas de tormenta son representativas de las usadas en la región y están ubicadas en tramos rectos.

Esta microcuenca presenta un uso de tipo residencial y pertenece a la cuenca de la Avenida Las Heras. Esta última tiene una superficie total de 119 ha, presenta pendiente muy baja (menor al 0.1%) y descarga mediante conductos cerrados y abiertos al canal de Avenida Soberanía Nacional (figura 2), emisario receptor y conductor de todas las descargas de dicho sector de la ciudad (CFI-AFIN, 1995).

Los sumideros a los que aporta la cuenca de estudio están ubicados sobre las márgenes derecha e izquierda de la calle San Lorenzo. Considerando al eje de dicha calle como



Figura 3. Microcuenca de los sumideros de la calle San Lorenzo y Avenida Castelli. Referencias: 1) suelo descubierto; 2) torre en construcción; 3) sitios de muestreo (aguas arriba de las bocas de tormenta).

divisoria de aguas, puede asumirse que a esos sumideros descargan dos cuencas diferenciadas. La cuenca de la margen izquierda, en la que se construyeron tres edificios en torre durante la etapa de recolección de datos de campo (figura 3), presenta menor porcentaje de superficie impermeable que la opuesta (cuadro 1; Depettris et al., 2009).

Materiales y métodos

Periodo de análisis

El periodo de análisis correspondió a los años hidrológicos 2007/08, 2008/09 y 2009/10. En la región, los años hidrológicos se inician en el mes de septiembre y finalizan en el mes de agosto del año calendario siguiente (Bruniard, 1981). La ciudad de Resistencia presenta una precipitación anual media de 1 350 mm (APA-AFIN, 2001), en tanto que la precipitación máxima diaria anual media es de 116.8 mm (Mendez, Ruberto, & Pilar, 2009). Los dos primeros años de análisis coincidieron con un periodo seco, con precipitaciones anuales por debajo de la media (cuadro 2), en tanto que en el último año esta situación se revirtió a partir de noviembre de 2010, cuando precipitaron 351 mm en siete días, evento que se estima tiene

un tiempo de recurrencia de 20 años (Mendez, Ruberto, Pilar, & Depettris, 2011).

Determinación de caudales líquidos

La determinación de los caudales líquidos se realizó mediante un modelo de transformación lluvia-escorrentía, utilizando el programa SWMM (*Stormwater Management Model*), versión 5.0, de la EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos.

El SWMM se puede utilizar para un único evento de precipitación o para realizar una simulación continua en un periodo extendido. El programa permite simular tanto la cantidad como la calidad del agua evacuada, en especial en drenaje urbano (Huber & Dickinson, 1988).

Se realizó una modelación continua durante los tres años hidrológicos del periodo de análisis. Se utilizaron datos de precipitación registrados cada 15 minutos y de evaporación diaria. Los datos de precipitación del año 2009/10 son los registrados por el pluviógrafo de la Administración Provincial del Agua (Chaco-Argentina), instalado en cercanías de la laguna "Los Lirios", ubicada a unos 2 km al este de la microcuenca estudiada. La estación "Los Lirios" presenta registros incompletos durante los años 2007/08 y 2008/09, por lo que se utilizaron los datos del pluviógrafo del

Cuadro 1. Distribución de áreas de la microcuenca de estudio.

Concepto	Margen derecha		Margen izquierda		Total	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Área permeable	0.293	14	0.464	17	0.757	16
Área impermeable	1.7290	86	2.2780	83	4.007	84
Área total	2.02	100	2.74	100	4.764	100

Cuadro 2. Precipitaciones anuales y máximas diarias anuales del periodo de análisis y sus correspondientes tiempos de recurrencia de excedencia.

Año	Panual (mm)	Tiempo de recurrencia (años)	Pmáx (mm)	Fecha	Tiempo de recurrencia (años)
2007/2008	870	0.9	82.5	27/12/2007	1.2
2008/2009	935	0.9	86.5	05/02/2009	1.3
2009/2010	1 347.3	2.3	155	19/01/2010	6.6

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Colonia Benítez, ubicado a 15 km al norte de la microcuenca. Los datos de evaporación fueron los registrados en el tanque de la Estación Meteorológica de Capacitación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), ubicada a 300 m de la microcuenca.

Se dividió al área de estudio en 18 subcuencas que aportan a las respectivas calles, consideradas como conductos de sección irregular (figura 4). Como se analizaron por separado las cuencas de margen izquierda y las de margen derecha, se consideró a la calle San Lorenzo como si fuese dos conductos seccionados a partir de su eje central.

Para la calibración de los parámetros se utilizaron cinco aforos, correspondientes a las preci-

pitaciones de los días 14/10/2009, 06/11/2009, 20/11/2009, 08/02/2010 y 22/02/2010, detalladas por Mendez, Depettris, Orfeo, Ruberto, & Pilar (2010). Para realizar los aforos de caudales se utilizaron las escalas hidrométricas materializadas sobre la calzada a los efectos de este estudio (Depettris *et al.*, 2009). La conversión del ancho mojado en la sección de control a caudales se realizó a través de la fórmula de Manning, adoptando 0.013 como valor de rugosidad para el hormigón (Chow, 1983).

Tanto el aforo de caudales como la recolección de muestras, descrita más adelante, se realizaron en las márgenes izquierda y derecha de la calle San Lorenzo (figura 5). Esta disquisición permitió estudiar el comportamiento de ambas áreas de aporte en forma separada y realizar un análisis comparativo.

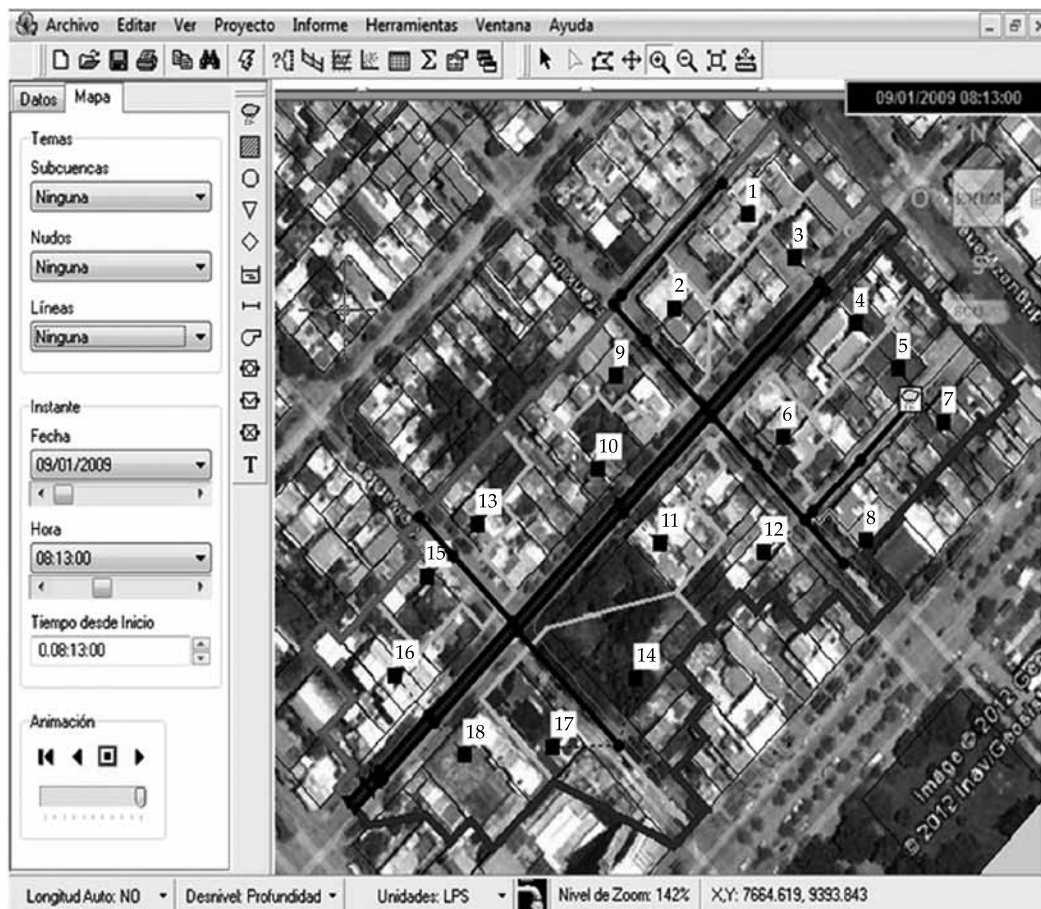


Figura 4. Modelo utilizado para analizar la microcuenca de la calle San Lorenzo.

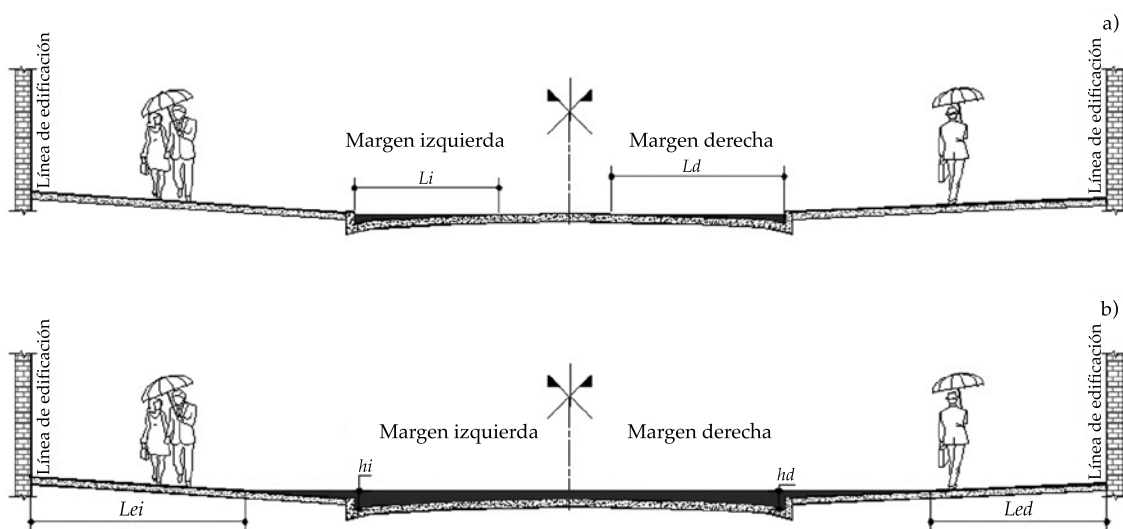


Figura 5. Mediciones realizadas en la calle San Lorenzo: a) cuando la escorrentía está contenida en las cunetas, b) cuando la escorrentía desborda las cunetas.

Se logró un ajuste adecuado del modelo para caudales extremos, tal es el caso de la precipitación del 20/11/2009. El ajuste de ese evento (figura 6) se realizó considerando ambas cuencas trabajando en conjunto, teniendo en cuenta que durante el mismo se registraron tirantes de agua que superaron el parteaguas de la calle San Lorenzo.

Para caudales bajos, el modelo arrojó valores menores que los aforados, tal es el caso de la precipitación del 08/02/2010 (figuras 7 y 8). Es importante indicar que la metodología utilizada para la medición de los caudales líquidos es imprecisa para caudales menores a 10 l/s, en especial por la variabilidad que presenta el ancho de escurrimiento en una sección con muy bajos tirantes y flujo marcadamente subcrítico.

Determinación de la carga de sedimentos

La carga de sedimentos transportada en cada precipitación se obtuvo mediante dos curvas de regresión: una correspondiente a la cuenca de margen izquierda y la otra a la de margen derecho. Las variables predictoras utilizadas

fueron el caudal líquido del escurrimiento y la precipitación antecedente de 42 días al evento.

La utilización de estas variables se justifica en que la remoción de contaminantes en una cuenca urbana depende del volumen de escorrentía directa, o sea, de la precipitación efectiva. Por ello, la cantidad de contaminantes posibles de ser transportados en una lluvia depende de los escurrimientos generados de manera precedente. Dada la dificultad en obtener la precipitación efectiva y considerando que las variables predictivas deben ser fácilmente medibles, se optó por utilizar la precipitación total antecedente, que está directamente relacionada con la primera.

Además, para la microcuenca de estudio, se encontró una buena correlación entre la precipitación antecedente de 42 días con el CME de los eventos medidos (figura 9).

La concentración media del evento puede ser obtenida utilizando la ecuación (1) (Novotny, 1992):

$$CME = \frac{\sum Qi \cdot Ci}{\sum Qi} \quad (1)$$

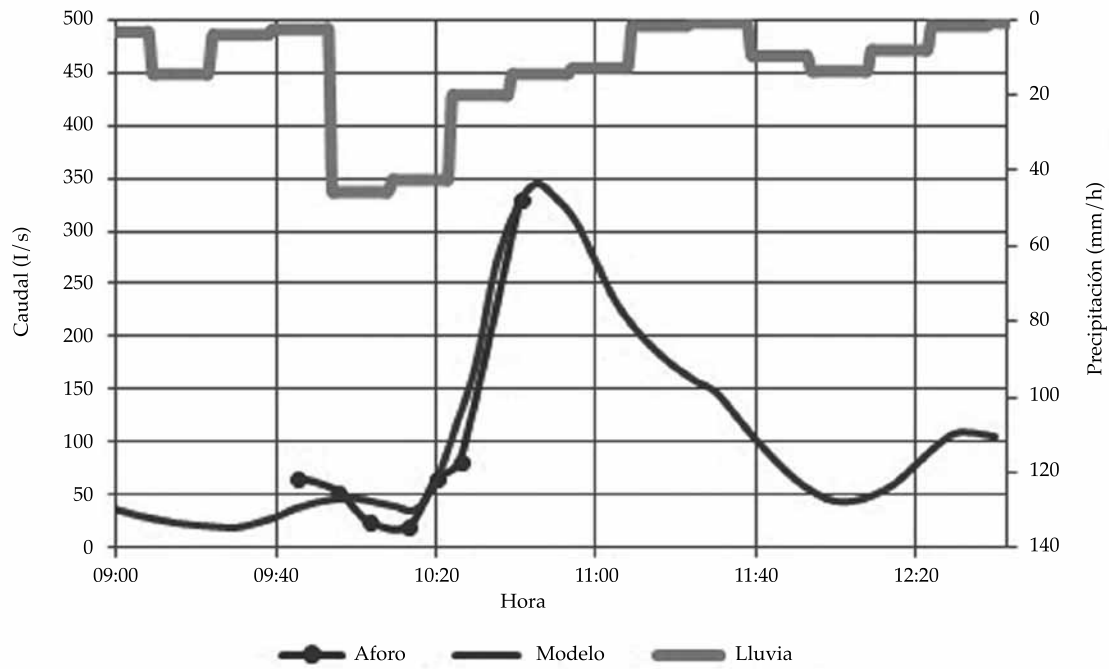


Figura 6. Hietograma e hidrogramas del evento del 20/11/2009.

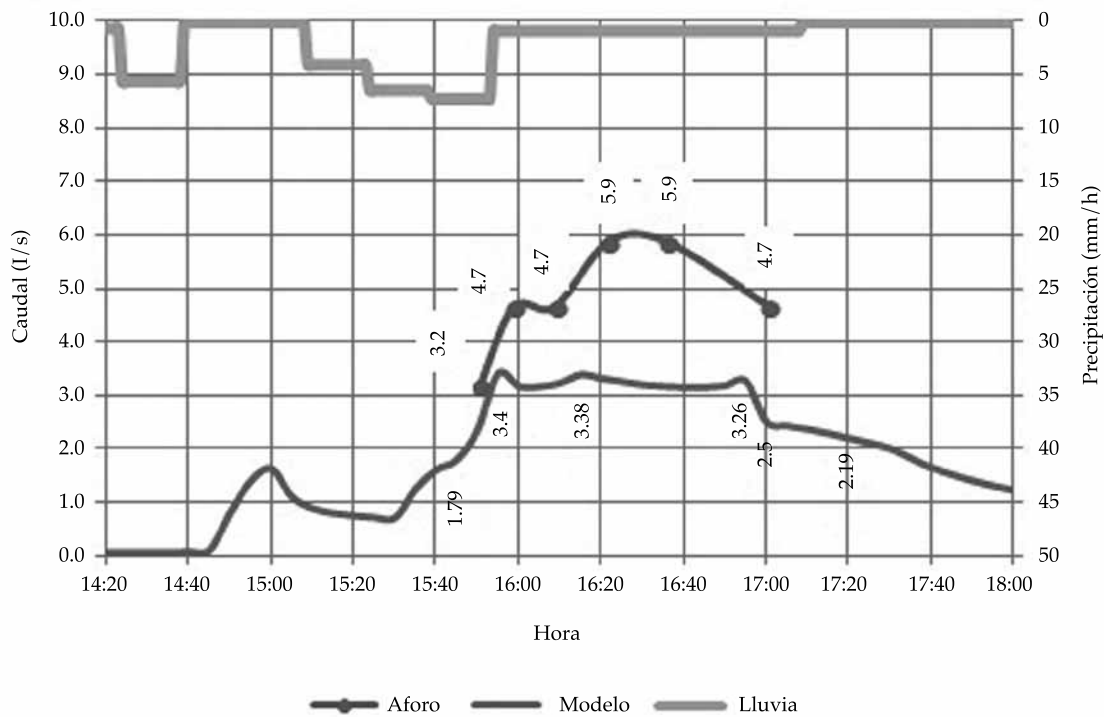


Figura 7. Hietogramas e hidrogramas de la cuenca del margen derecho del evento del 08/02/2010.

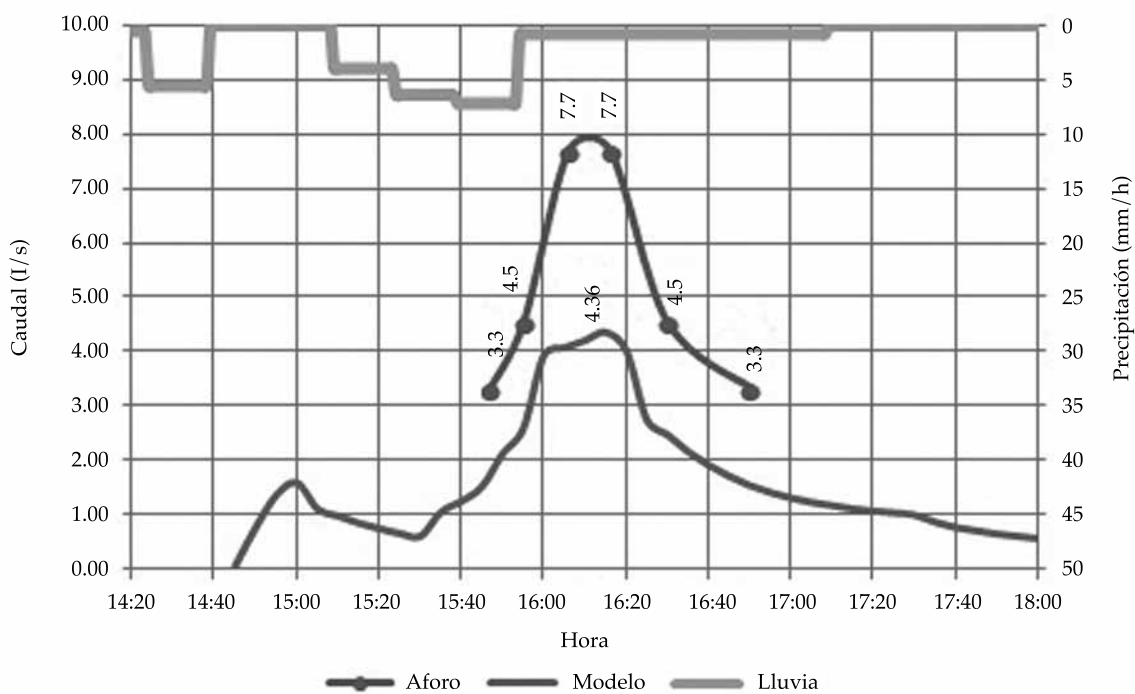


Figura 8. Hietogramas e hidrogramas de la cuenca del margen izquierdo del evento del 08/02/2010.

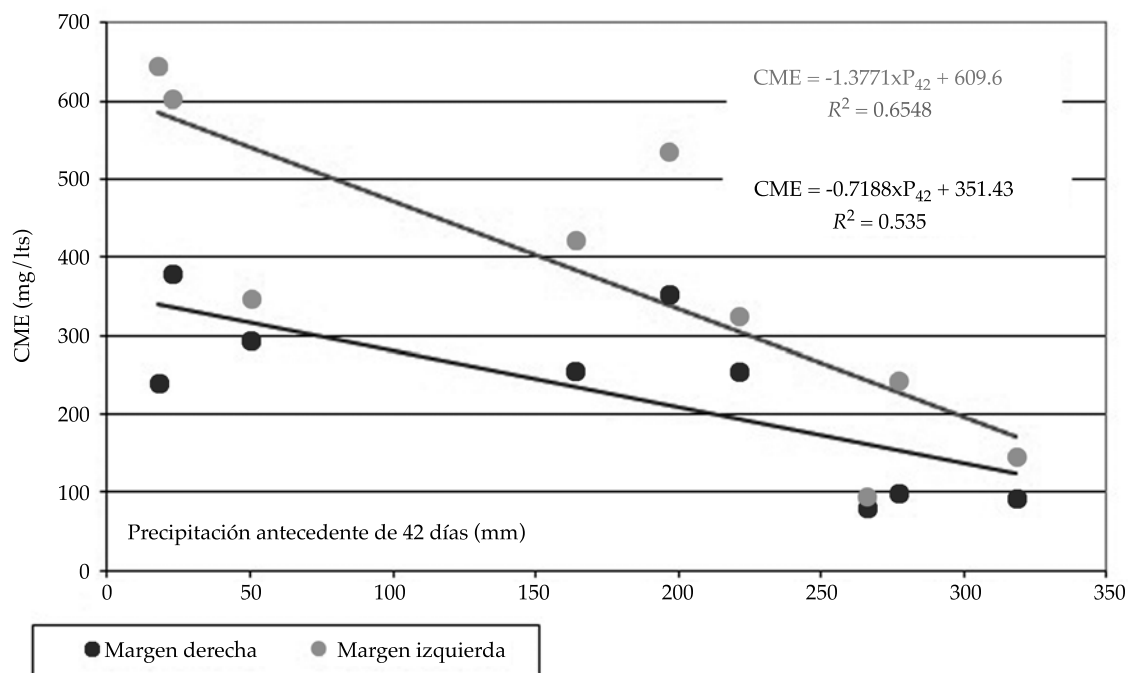


Figura 9. Variación del CME con respecto a la precipitación antecedente de los últimos 42 días.

siendo:

CME: concentración media del evento.

Q_i : caudal líquido.

C_i : concentración de sólidos suspendidos.

Se consideró que la relación lineal entre el caudal líquido y el sólido representa de modo razonable la correlación de valores, lo que coincide con lo presentado por Vanoni, 1975 (*apud* Huber y Dickinson, 1988).

El ajuste de las curvas de regresión se realizó a partir de 89 muestras del agua de escorrentía en la calzada, que fueron analizadas en laboratorio para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos.

La recolección de muestras se realizó de forma manual mediante el captador DH3, que fue desarrollado en específico para el monitoreo de las aguas pluviales urbanas por el Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica

de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. Se colocó el muestrador con las válvulas abiertas, a fin de que ni éste ni su operador interfiriesen el flujo. Llegado el momento, se cerraron instantáneamente las válvulas y se volcó el contenido en recipientes plásticos (figura 10).

Las muestras obtenidas en campo fueron procesadas en laboratorio para determinar la concentración total de sedimentos en suspensión. Para ello se filtraron 50 ml de cada muestra mediante discos deshidratados y pre-pesados de acetato de celulosa de 0.45 μm de porosidad, empleando bomba de vacío. Después del filtrado, los discos fueron llevados a estufa termostática a 105 °C durante una hora y después se trasladaron a desecador hasta peso constante. Finalmente, los filtros fueron pesados en balanza analítica de precisión ($\pm 1 \times 10^{-4}$ g). Por diferencia de peso se obtuvo la cantidad de material retenido y el cálculo de concentración fue referido a 1 litro.



Figura 10. Recolección de muestras mediante captador DH3.

La descarga sólida se obtuvo relacionando el caudal líquido y la concentración de sólidos suspendidos (Mendez *et al.*, 2010). Se trazaron las curvas de regresión para las cuencas de margen izquierdo y derecho (ecuaciones (2) y (3), respectivamente):

$$Q_s = 2.62 + 0.325 \cdot Q - 0.0163 \cdot P_{A42d} \quad (2)$$

$$Q_s = 1.53 + 0.277 \cdot Q - 0.00758 \cdot P_{A42d} \quad (3)$$

en las que:

Q_s : carga de sedimento (g/l).

Q : caudal líquido (l/s).

P_{A42d} : precipitación antecedente de 42 días (mm).

El ajuste mostrado por las ecuaciones (2) y (3) fue aceptable (R^2 igual a 95.5% y 99.1%, respectivamente) y el valor de "p" de las distintas variables explicativas indica que

éstas son significativas para un intervalo de confianza del 95%, según los datos disponibles.

En las figuras 11 y 12 se ilustran en línea continua las curvas de regresión trazadas para distinta precipitaciones antecedentes de 42 días, para las cuencas de margen derecha e izquierda, respectivamente, en tanto que los puntos indican los valores obtenidos de los eventos medidos.

Se consideran válidas las ecuaciones planteadas para valores de caudal líquido mayores a 1 l/s; para caudales menores, la carga de sedimentos es prácticamente despreciable.

Resultados

Tasa anual de sedimentos

Con los datos de precipitaciones y de evaporación se obtuvieron los caudales líquidos generados por la microcuenca para los años 2007/08, 2008/09 y 2009/10. Posteriormente se determinó, a partir de las curvas de regresión

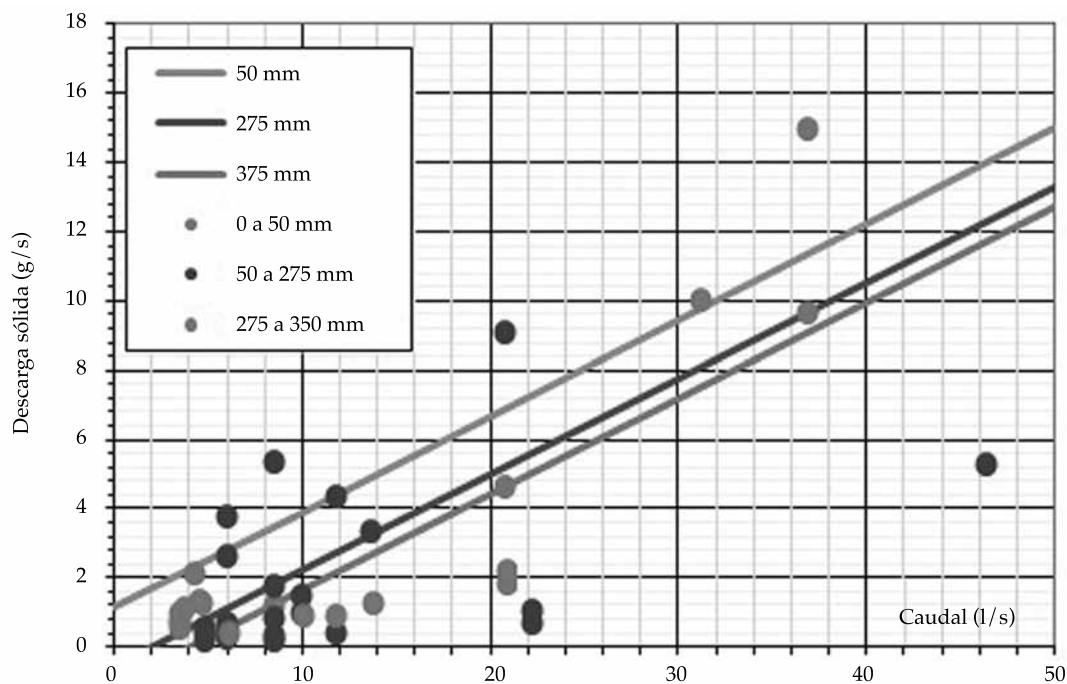


Figura 11. Curvas de regresión de margen derecha.

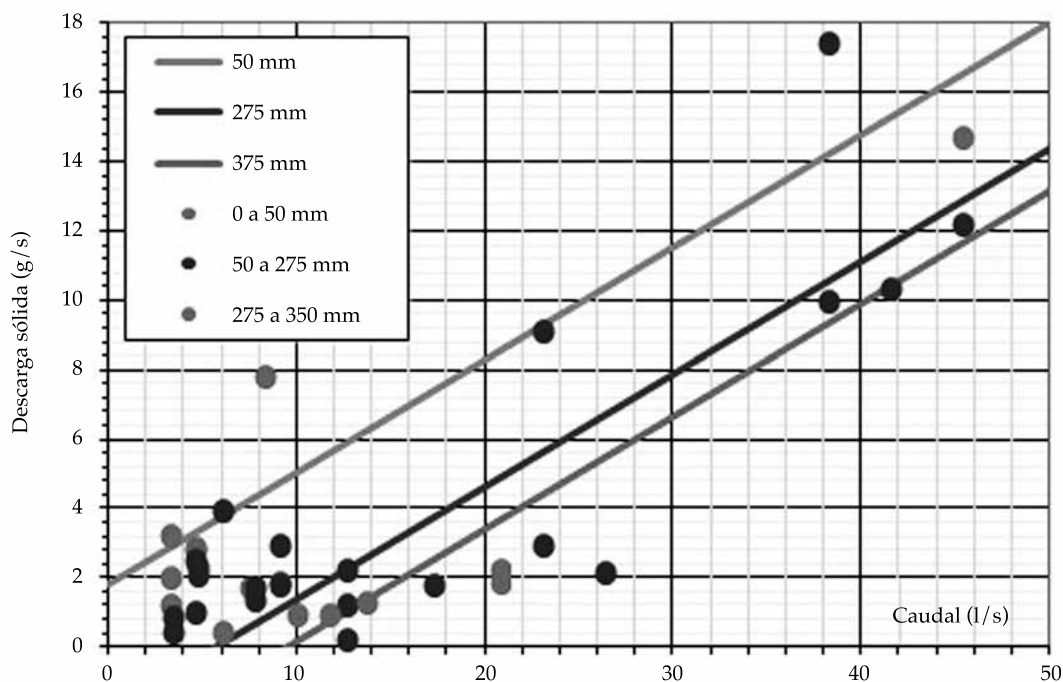


Figura 12. Curvas de regresión de margen izquierda.

(ecuaciones (2) y (3)), la carga de sedimentos (caudal sólido) transportados por la escorrentía urbana para todo el horizonte de análisis (figuras 13, 14 y 15).

Los resultados de la modelación indican que las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen izquierdo han sido superiores a las del margen derecho. Sin embargo, las tasas de sedimentos anuales, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, indican valores levemente superiores de la cuenca del margen derecho respecto del izquierdo para los tres años de análisis (cuadro 3). Por esto se concluye que existe una fuerte incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas anuales de sedimentos, donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y, por tanto, mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Condiciones antecedentes

De la observación de las figuras 13, 14 y 15 es posible constatar que las mayores cargas de sedimento se registran en el periodo de septiembre a diciembre de cada año. En efecto, en estos meses se inicia el periodo húmedo, por lo que se presentan dos condicionantes que propician la generación y el transporte de sedimentos: el escurrimiento de caudales líquidos altos y precipitaciones antecedentes escasas. En la figura 16 se indica la precipitación acumulada por cuatrimestre en el periodo de análisis.

Por lo expuesto, en los meses de septiembre a diciembre se produce el lavado de la cuenca, generando el 60% del sedimento transportado en el año (cuadro 4).

Conclusiones y recomendaciones

Se han obtenidos resultados de la carga sólida de sedimentos a lo largo de los años

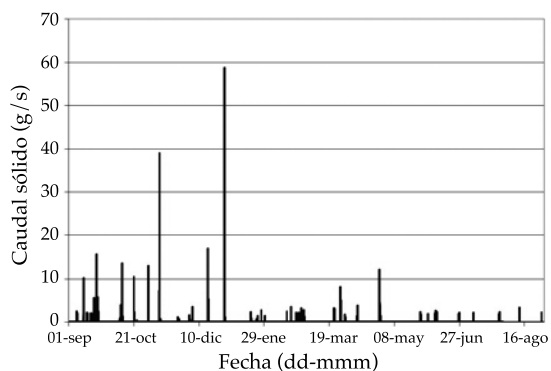


Figura 13a. Caudales sólidos, margen derecha, 2007/08.

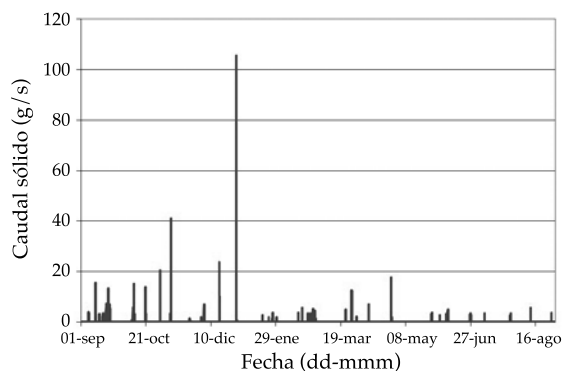


Figura 13b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2007/08.

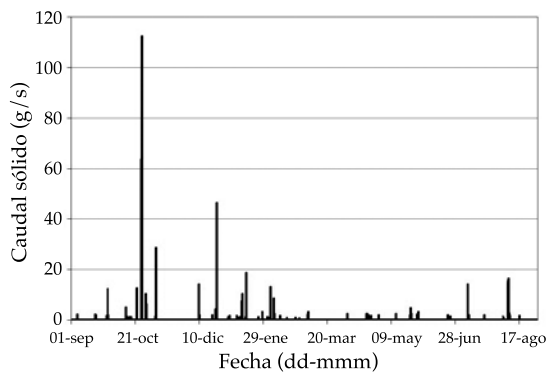


Figura 14a. Caudales sólidos, margen derecha, 2008/09.

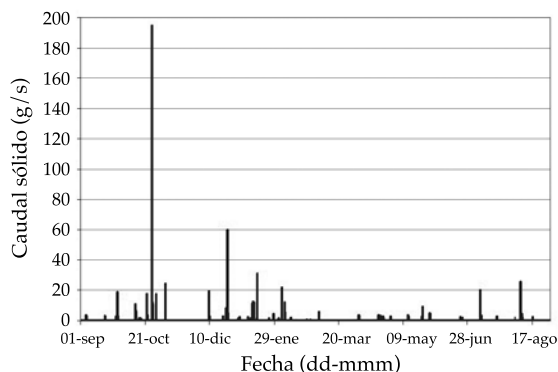


Figura 14b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2008/09.

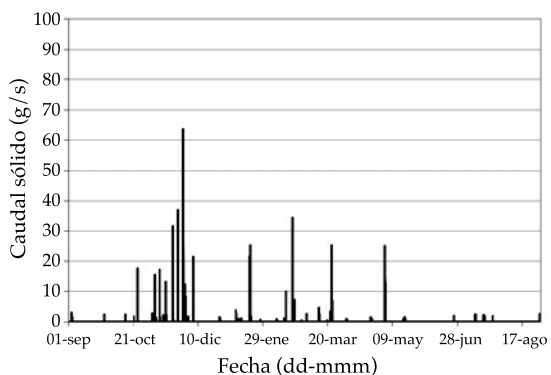


Figura 15a. Caudales sólidos, margen derecha, 2009/10.

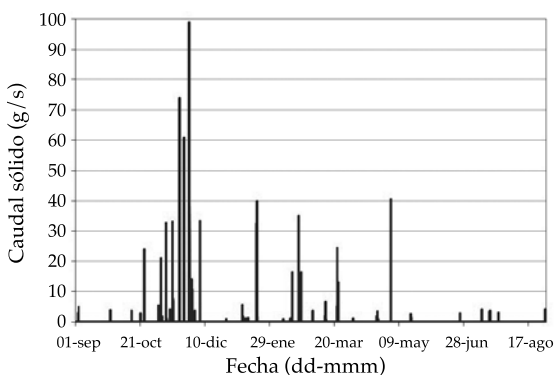


Figura 15b. Caudales sólidos, margen izquierda, 2009/10.

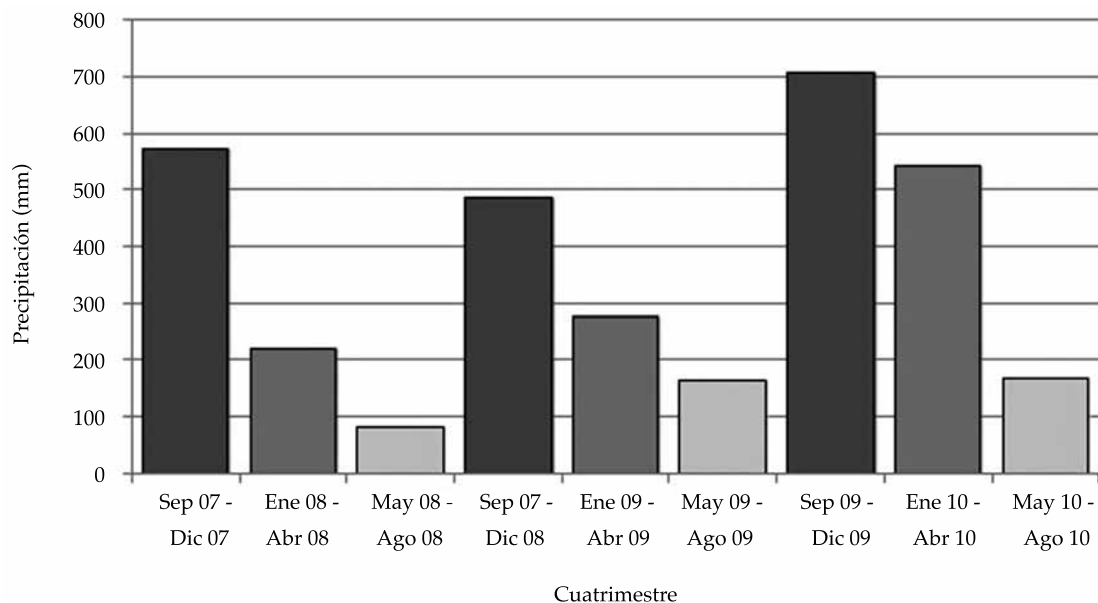


Figura 16. Precipitación acumulada por cuatrimestre.

Cuadro 3. Carga de sedimentos anuales.

Margen	Área (ha)	Área permeable (%)	Carga de sedimentos anual			Tasa de sedimentos		
			2007/08 (t)	2008/09 (t)	2009/10 (t)	2007/08 (t/ha)	2008/09 (t/ha)	2009/10 (t/ha)
Derecha	2.02	14	1.75	2.26	2.98	0.86	1.12	1.47
Izquierda	2.74	17	2.16	2.98	4.17	0.73	1.01	1.41
Total	4.76	16	3.91	5.24	7.16	0.78	1.05	1.43

Cuadro 4. Porcentaje de sedimento transportado desde septiembre hasta diciembre.

Año	Derecho	Izquierdo
2007/08	62%	66%
2008/09	58%	60%
2009/10	58%	55%

hidrológicos 2007/08, 2008/09 y 2009/10 para una microcuenca del sector sur de Resistencia, utilizando el modelo SWMM y curvas de regresión de la relación entre la descarga líquida y la sólida. Ante las deficiencias del modelo hidrológico para predecir caudales originados por precipitaciones de baja intensidad (meno-

res a 7.5 mm/h), se observaron diferencias entre los resultados de caudal sólido obtenidos mediante la metodología detallada y los datos medidos ante tales eventos. Estos últimos, si bien son frecuentes, no tienen incidencia en los resultados de las cargas anuales de sedimentos; en efecto, de los resultados de la modelación planteada, las cargas de sedimentos generadas ante lluvias de intensidades bajas comprenderían un 14 a 5% de la carga anual. Esto indica que la imprecisión en tales eventos no es relevante.

Cabe destacar que la metodología planteada se ajustó a condiciones de uso residencial de la microcuenca, sin considerarse alteraciones

en el uso del suelo producidas durante la construcción de obras civiles.

Las cargas anuales de sedimentos transportadas por la escorrentía superficial de la cuenca de margen derecho oscilaron entre 1.75 y 2.26 t, en tanto que para la cuenca de margen izquierdo, los resultados mostraron valores que van de 2.16 a 4.17 toneladas. Las tasas de sedimentos anuales de ambas cuencas, que relacionan la carga de sedimentos con el área de aporte, son similares para los tres años de análisis, presentando valores que van de 0.8 a 1.40 t/ha.

Se concluye que podría existir incidencia de los volúmenes de escurrimiento en las cargas anuales de sedimentos donde las áreas más impermeables son capaces de generar importantes caudales líquidos y por tanto mayores cargas de sedimentos que las zonas permeables.

Las mayores cargas de sedimento se registraron en el periodo de septiembre a diciembre de cada año, periodo en el que se transporta el 60% del total anual. Se destaca que un solo evento puede transportar, por el escurrimiento superficial, más del 20% del sedimento transportado en todo el año.

Referencias

- APA-AFIN (2001). *Línea de ribera de lagunas ubicadas en el sistema Hídrico del río Negro*. Informe final. Administración Provincial del Agua (APA)-Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería UNNE (AFIN). Resistencia (Chaco), Argentina.
- Bruniard, E. D. (1981). *El clima de las planicies del norte argentino (Ensayo metodológico de geografía de los climas)*. Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Humanidades de la Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Chow, V. T. (1983). *Hidráulica de canales abiertos* (584 pp.). México, DF: Editorial Diana.
- CFI-AFIN (1995). *Estudio de los desagües pluviales del sector sur de Resistencia*. Argentina: Consejo Federal de Inversiones, Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Depettris, C. A., Kutnich, E. J., & Ruberto, A. R. (2009). *Hidrología urbana: instrumentación y evaluación del escurrimiento superficial en una microcuenca de Resistencia*. Congreso Nacional del Agua, Trelew (Chubut), Argentina.
- EPA (1983). *Results of the Nationwide Urban Runoff Program* (pp. 6-64). Vol. I. Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- Garay-Porteros, H., & Alva-Hurtado, J. E. (1999). *Identificación y ensayo de suelos dispersivos*. XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Huber, W. C., & Dickinson, R. E. (1988). *Stormwater management model Version 4. User's Manual*. (313 pp.). Athens (GA), USA: EPA-600/3-88-001a.
- INTA (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Secretaría de Industria, Ganadería y Producción.
- Jiménez-Gallardo, B. R. (1999). *Contaminación por escorrentía urbana* (435 pp.). Madrid, España: Colegio de Caminos, Canales y Puertos.
- Maksimovic, C. (2001). *Urban drainage in specific climates*, Francia: UNESCO – Technical Documents in Hydrology, Vol. I, N°40, 277 pp.
- Mendez, G. J., Depettris, C. A., Orfeo, O., Ruberto, A. R., & Pilar, J. V. (2010). *Curva clave de sedimentos de una microcuenca en Resistencia, Chaco, Argentina*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este, Uruguay.
- Mendez, G. J., Ruberto, A. R., & Pilar, J. V. (2009). *Regionalización de precipitaciones para las provincias de Chaco, Formosa y Santiago del Estero*. XXII Congreso Nacional del Agua, Argentina. Trelew (Chubut), Argentina.
- Mendez, G. J., Ruberto, A. R., Pilar, J. V., & Depettris, C. A. (mayo de 2011). *Regionalización de Precipitaciones Máximas Acumuladas de 7, 15 y 30 días para las Provincias de Chaco y Formosa*. *Revista ASAGAI*, (26), 71-78.
- Mendez, G. J. (2013). *Sedimentos en el drenaje urbano*. Tesis de Maestría en Ciencias la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia (Chaco), Argentina.
- Niemczynowicz, J. (1996). *Challenges and Interactions in Water Future*. *Environmental Research Forum Transtec Publications*, 34, 1-10.
- Novotny, V. (1991). *Urban diffuse pollution: Sources and abatement*. *Water Environment & Technology*. 3 (12), 60-65.
- Orfeo, O. (1997). *Comparación sedimentológica y geomorfológica de los ríos Paraná y Paraguay en su área de confluencia*. Primer Congreso Latinoamericano de Sedimentología-VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geólogos-International Association of Sedimentologists. Porlamar (Isla Margarita).
- Poleto, C. (2008). *Ambiente sedimentos*. Porto Alegre, Brasil: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- Porto, M. F. A. (2001). *Urban Drainage in Specific Climates*. In *Technical Documents in Hydrology* (pp. 103-124). Vol. I, No. 40, Cap 4. Paris, Francia: UNESCO.
- Ramos, C. (1995). *Drenagem Urbana* (pp. 249-250). Cap. 6. Porto Alegre, Brasil: Editora de la UFRGS.

Segemar (1997). *Mapa geológico de la República Argentina*. Buenos Aires: Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino.

Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (2009). *Criterios conceptuales propuestos para la integración, articulación y actualización tendientes al completamiento y desarrollo del Plan Director Básico de Drenaje Pluvial de La Cuenca del Río Matanza-Riachuelo* (78 pp.). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Ministerio De Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios de la Nación - Secretaría de Obras Públicas.

Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering* (418 pp.). New York, Estados Unidos: ASCE.

Dirección institucional de los autores

Mg. Ing. Guillermo José Mendez

Mg. Ing. Carlos Alberto Depettris

Dr. Jorge Víctor Pilar

Ing. Alejandro Ricardo Ruberto

Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica
Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional del Nordeste

Av. Las Heras 727 (CPA H3500COI)

Resistencia, ARGENTINA

Teléfono +37 (22) 427 006, interno 142

guillermojosemendez@hotmail.com

cdepettris@ing.unne.edu.ar

aruberto@ing.unne.edu.ar

jpilar@ing.unne.edu.ar

Dr. Oscar Orfeo

Vicedirector

Centro de Ecología Aplicada del Litoral

Ruta Provincial núm. 5, km 2.5

3400, Corrientes, ARGENTINA

Teléfono: +54 (379) 4454 417

oscar_orfeo@hotmail.com