

RELACIÓN CAUDAL LÍQUIDO – CAUDAL SÓLIDO EN UNA MICROCUENCA DE LA CIUDAD DE RESISTENCIA (PROV. DEL CHACO, ARGENTINA)

Guillermo José Mendez ⁽¹⁾, Carlos Alberto Depettris ⁽¹⁾, Oscar Orfeo ⁽²⁾, Alejandro Ricardo Ruberto ⁽¹⁾ y Jorge Victor Pilar ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. Las Heras 727 – Resistencia, Chaco, República Argentina. Tel: 54 (3722) 427006 Interno 142

⁽²⁾ Centro de Ecología Aplicada del Litoral.
Ruta Provincial N°5 Km 2,5 – Corrientes, Corrientes, República Argentina.
e_mail: guillermojosemendez@hotmail.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo determinar la curva clave de sedimentos, que relaciona el caudal líquido con la descarga sólida de los desagües pluviales, de una microcuenca de la ciudad de Resistencia (capital de la provincia del Chaco) a partir de nueve eventos medidos desde Septiembre de 2009 a Marzo de 2010. El término descarga sólida se refiere a la cantidad de sedimento en movimiento y su valor se obtuvo del producto entre el caudal líquido y la concentración de sólidos suspendidos. Los datos fueron recolectados aguas arriba de dos bocas de tormenta, donde se realizaron aforos de caudales y análisis de turbiedad y concentración de sólidos suspendidos del efluente pluvial. Con los valores de descarga líquida y sólida, de los distintos eventos, se ajustaron dos curvas claves de sedimentos que presentaron un ajuste aceptable. Se observaron diferencias entre los polutogramas de los efluentes de sendas bocas de tormentas debidas a las diferencias existentes en el uso de suelo de sus áreas de aporte. Se pudo constatar que la descarga sólida tiende a aumentar con el aumento de la descarga líquida. La información obtenida resulta de utilidad para monitoreos y controles tempranos en cuencas urbanas localizadas en áreas de llanura.

Palabras clave: sedimentos, drenaje urbano, cuenca de llanura, Resistencia.

ABSTRACT

The objective of the present work is to establish the key curve of sediments, which relates the liquid flow with the solid discharge of pluvial drainage, of a microbasin of Resistencia city (Capital of Chaco Province), from nine measured events from September 2009 to March 2010. The solid discharge term applies to the sediment quantity in motion and its value was obtained from the product between the liquid flow and the concentration of suspended solids. Data was obtained at upstream from two storm drainage inlets, where flow measurements, turbidity analysis and suspended solids concentration were taken. For both values solid and liquid discharge, of the different events, two key curves of sediments were adjusted, from those which presented an acceptable adjustment. Some differences between the effluent pollutograph of both storm drainage inlets were noticed, due to the existing differences in the land use of their catchment areas. It was verified that the solid discharge tends to increase with the increment of the liquid discharge. The resulting information is useful for monitoring and early controls at urban basins located in plain areas.

Keywords: sediments, urban drainage, plain basin, Resistencia.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, los roles del drenaje urbano han cambiado, y ahora además de proporcionar una protección frente a las inundaciones, debe permitir el control de poluentes y otorgar al efluente pluvial características que contribuyan a un ambiente urbano ameno (Maksimovic, 2001). Es por esto que es fundamental conocer el flujo de sedimentos y otros poluentes especialmente en áreas densamente pobladas.

Los sedimentos 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 tales como metales pesados, amonio, fertilizantes, pesticidas y policlorobifenilos (PCBs), entre otros (Porto, 2001).

A pesar de la problemática enunciada, los datos referentes a las tasas de generación y movilización de sedimentos en áreas urbanas son escasos (Tucci, 1995).

La ciudad de Resistencia, capital de la provincia del Chaco, está emplazada en la megaplancie de inundación del río Paraná, aguas abajo de la confluencia con el río Paraguay (Figura 1). Su ejido 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).

Dada la carencia de datos referidos a la carga de sedimentos en el efluente pluvial de la ciudad de Resistencia y las dificultades inherentes para obtener los mismos, resulta necesario realizar mediciones que permitan cuantificar esta variable para correlacionar los resultados con el caudal líquido.

En cuencas rurales es práctica común el trazado de curvas clave de sedimentos que relacionan concentraciones, descargas sólidas o valores derivados de estudios sedimentológicos con otras variables como tiempo, descarga líquida, nivel de agua, velocidad y demás estudios afines (Carvalho, 1994).

Si bien las cuencas urbanas presentan particularidades que las diferencian de las cuencas rurales, la utilización de este tipo de curvas clave permite no solo determinar valores medios de variables sedimentológicas y su rango de dispersión, sino también conocer

otras variables que afectan al proceso de erosión, lavado de superficies y transporte de sedimentos.

En tal sentido, algunos autores han adoptado esta metodología en cuencas urbanas. Vaze y Chiew (2003) ajustaron correlaciones entre la carga de distintos poluentes y la precipitación, intensidad y el escurrimiento superficial en Australia. También Dotto (2006) encontró una correlación entre la descarga líquida y la descarga sólida para dos cuencas urbanas de la ciudad de Santa María en Brasil.



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

En el presente estudio se determinaron dos curvas clave que relacionan la descarga sólida con el caudal líquido del efluente pluvial de una microcuenca del drenaje pluvial de la ciudad de Resistencia con el objeto de evaluar la interrelación entre dichas variables para ayudar en el control del ambiente urbano.

ÁREA DE ESTUDIO

Como caso de estudio se adoptó la microcuenca que descarga a los sumideros ubicados en la calle San Lorenzo, aguas arriba de su intersección con la avenida Castelli (Figura 3). La elección de la misma responde a: (i) presenta facilidad de acceso y supervisión, (ii) constituye un área de aporte cerrada, (iii) permite mediciones de flujo en calzada, (iv) presenta reducido estacionamiento de vehículos en calzada sobre la zona de medición y (v) las bocas de tormenta son representativas a las usadas en la región y están ubicadas en tramos rectos.

Esta microcuenca (Figura 3.a), tiene uso residencial y pertenece a la cuenca de la Avenida Las Heras, su superficie total es de 119 ha, presenta pendiente muy baja (< 0.1%) y descarga mediante conductos

cerrados y abiertos al canal Soberanía Nacional (Figura 2), emisario receptor y conductor de todas las descargas de dicho sector de la ciudad (CFI - AFIN, 1995).

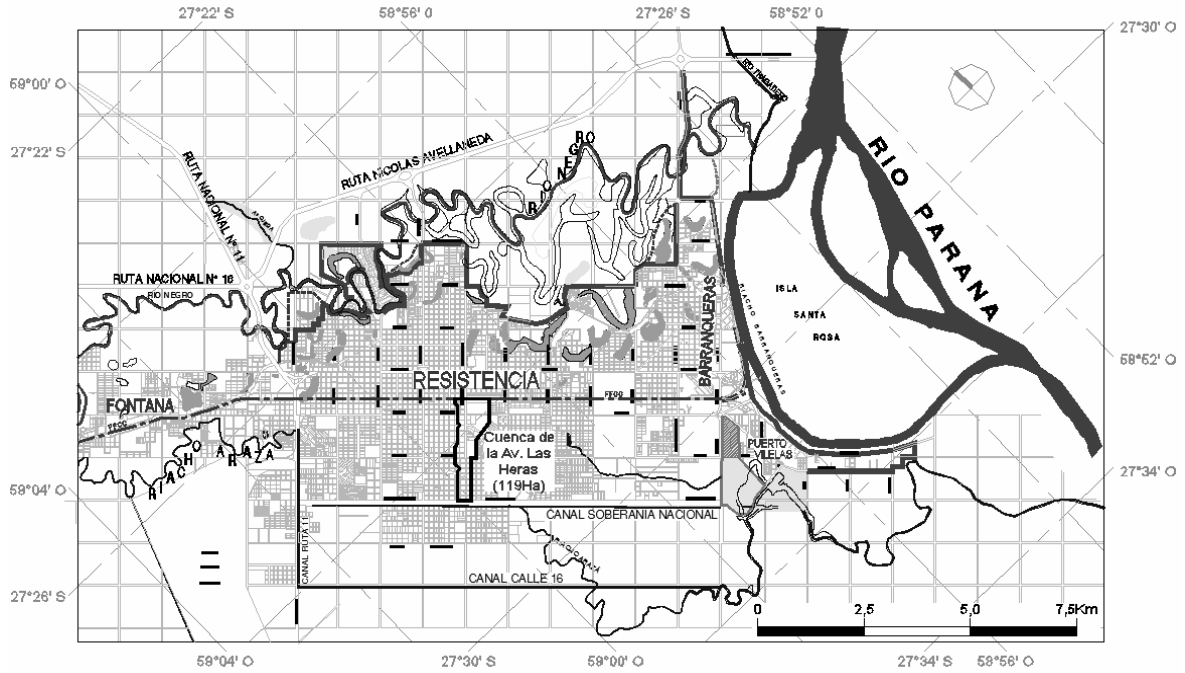


Figura 2. Ubicación de la cuenca Las Heras en la ciudad de Resistencia.

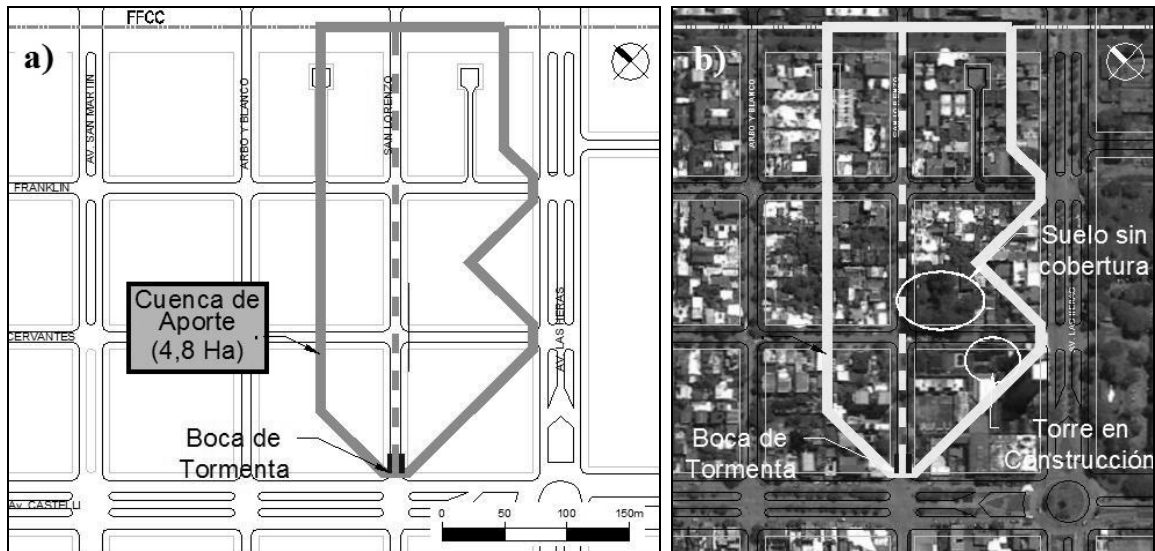


Figura 3. Microcuenca de los sumideros de la calle San Lorenzo y Av. Castelli
a) Área de Aporte b) Imagen Satelital.

Los sumideros, a los que aporta la cuenca de estudio (Depettris et al., 2009), están ubicados sobre las márgenes derecha e izquierda de la calle

San Lorenzo (Figura 3). Considerando al eje de dicha calle como divisoria de aguas, puede asumirse que a sendos sumideros descargan dos

cuenca bien diferenciadas. La cuenca de la margen izquierda, donde se construyeron tres torres de vivienda durante la etapa de recolección de

datos de campo (Figura 3.b), presenta mayor grado de impermeabilidad que la opuesta (Tabla 1; Depettris et al., 2009).

Tabla 1: Distribución de áreas de la microcuenca de estudio.

| Concepto | Margen Derecha | | Margen Izquierda | | Total | |
|------------------|----------------|-----|------------------|-----|-------|-----|
| | (ha) | (%) | (ha) | (%) | (ha) | (%) |
| Área Permeable | 0.29 | 14 | 0.46 | 17 | 0.76 | 16 |
| Área Impermeable | 1.73 | 86 | 2.28 | 83 | 4.01 | 84 |
| Área Total | 2.02 | 100 | 2.74 | 100 | 4.77 | 100 |

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar los aforos de caudales se utilizaron las escalas hidrométricas sobre la calzada, materializando la sección de escurrimiento para cada ancho de cauce registrado. La conversión del ancho mojado en la sección de control a caudales se realizó a través de la fórmula de Chezy (Manning), adoptando valores de n de Manning para hormigón de 0.013 (Chow, 1983).

Asimismo se tomaron muestras del efluente pluvial mediante el captador instantáneo DH3 (Figura 4) (ARG-P-H-09) diseñado por el Departamento de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE para el monitoreo de aguas pluviales urbanas (Ruberto et al., 2009).



Figura 4. Muestreador DH3 (ARG-P-H-09).

Se recolectaron 89 muestras del agua de escorrentía en la calzada, que fueron analizadas en laboratorio para la determinación de la turbiedad por nefelometría y la concentración de sólidos suspendidos por filtrado empleando discos de acetato de celulosa de 0.45 μm de porosidad.

La descarga sólida se obtuvo relacionando el caudal líquido y la concentración de sólidos suspendidos.

EVENTOS AFORADOS

Los eventos aforados corresponden a las precipitaciones ocurridas los días 03/09/2009, 14/10/2009, 06/11/2009, 20/11/2009, 08/02/2010, 15/02/2010, 22/02/2010, 03/03/2010 y 19/03/2010 (en adelante evento 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, respectivamente).

Por cuestiones operativas, no fue posible medir el volumen de escurrimiento total en todos los eventos observados. En la mayoría de los casos se determinaron los caudales y concentraciones pico, pero en los eventos 7 y 8 sólo se pudieron medir las curvas de descenso de los hidrogramas y polutogramas.

En cada evento medido se registraron variaciones muy grandes en las concentraciones de sólidos suspendidos. Aquellas correspondientes a la cuenca del margen izquierdo mostraron valores, en promedio, 1.97 veces mayores a los del margen derecho. Al analizar los eventos en que ha sido posible medir los picos de hidrograma y polutograma, en relación al tiempo transcurrido desde su inicio, es posible aceptar que las cuencas presentan un comportamiento marcadamente diferente.

En la mayoría de los casos, en la cuenca de la margen derecha, se registraron los picos de los polutogramas antes que los del hidrograma, en tanto que en la cuenca de la margen izquierda esta situación

fue inversa. Esto se debe a la influencia de las áreas de suelo descubierto en la cuenca de la margen izquierda. En efecto, el escurrimiento superficial sobre áreas permeables comienza solo después que el suelo se encuentra saturado por el agua de lluvia, lo que significa que el nuevo suministro de sedimentos alcanza la superficie del asfalto un tiempo

considerablemente después de iniciada la lluvia (Deletic, 1998).

En las Figuras 5 y 6 se pueden observar los polutogramas e hidrogramas correspondientes a los aforos de margen derecha e izquierda durante los eventos 3 y 5, respectivamente.

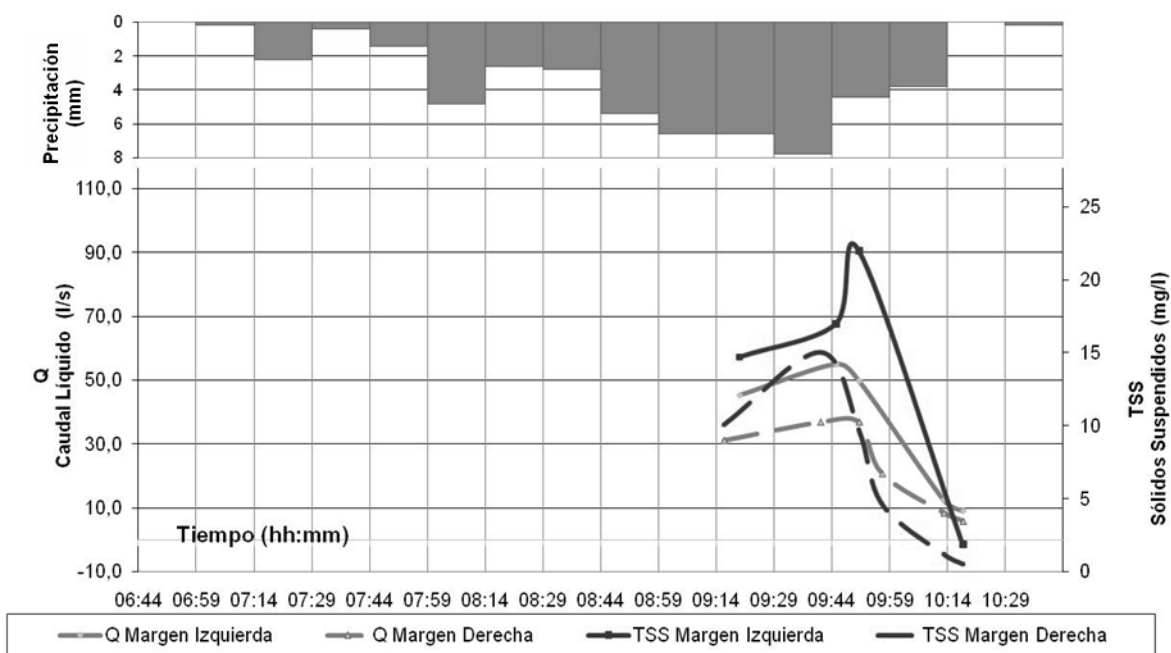


Figura 5. Hietograma, hidrogramas y polutogramas del evento 3 (06/11/2009).

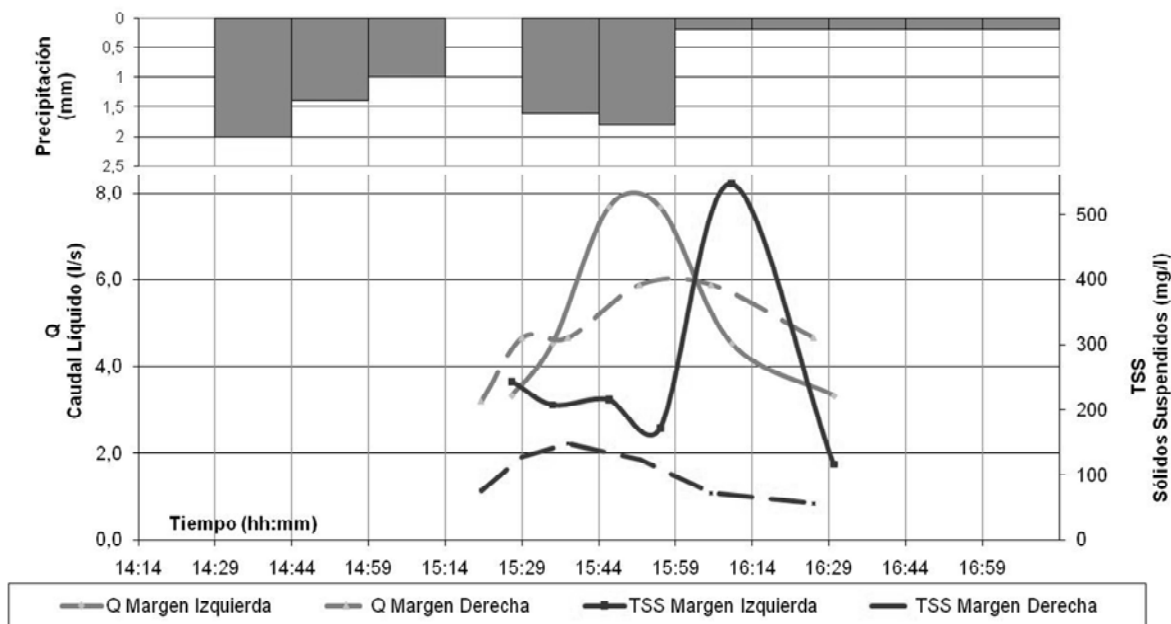


Figura 6. Hietograma, hidrogramas y polutogramas del evento 5 (08/02/2010).

Teniendo en cuenta la marcada variabilidad de forma tanto de los hidrogramas como de polutogramas, algunos autores proponen como aproximación trabajar con las concentraciones medias ponderadas con el caudal para obtener una concentración denominada CME (Concentración Media del Evento) (Ecuación (1)) (Novotny, 1992).

$$CME = \frac{\sum Q_i \cdot C_i}{\sum Q_i} \quad (1)$$

Donde Q_i : caudal instantáneo en el hidrograma y C_i : concentración correspondiente en el polutograma.

Para mejorar la comprensión de los eventos medidos se consideraron los siguientes factores asociados a la generación de sedimentos: intensidad, altura total precipitada, tiempo seco (o período sin precipitaciones anterior al aguacero) y precipitación antecedente.

El término precipitación es utilizado en este artículo para indicar la lámina de lluvia precipitada. En la región de estudio, la lluvia es la que realiza el máximo aporte al total precipitado (Bruniard, 1981).

En la Tabla 2 se pueden observar los valores de CME de los eventos medidos con sus factores asociados. De estos últimos se prestó principal atención a la precipitación antecedente, por ser una variable hidrológica de fácil medición.

Para analizar la variabilidad de los CME respecto a la precipitación antecedente, se trazaron curvas de regresión para precipitaciones de 7, 15, 28, 35, 42, 49 y 56 días antecedentes al evento en cuestión. En tal sentido, la variable que presentó mejor ajuste fue la precipitación antecedente de los últimos 42 días al evento. De la Figura 7 se aprecia que esa variable mantiene una correlación negativa con la CME.

Sin embargo, no se puede afirmar la existencia de una relación biunívoca entre ambas variables, dado que pueden operar otros factores que no se han podido medir en este estudio.

En efecto, la precipitación antecedente es un factor asociado a la cantidad de poluentes susceptibles de ser transportados por el efluente pluvial durante un evento considerado. Esta cantidad depende de un proceso de acumulación en tiempo seco y de lavado durante una lluvia. La acumulación de sedimentos depende de la velocidad del viento, tránsito diario de vehículos y limpieza de calles (Deletic et al., 1997; Dotto, 2006) y alcanza un valor máximo luego de un cierto lapso de tiempo seco, cuando se alcanza un equilibrio dinámico entre las fuerzas que contribuyen a la acumulación y aquellas que generan la remoción de sedimentos. En tanto que el lavado depende del volumen de escurrimiento o de la precipitación en exceso (Porto, 2001).

En la Figura 8 se puede observar la variación de la CME durante el periodo de mediciones.

Tabla 2: CME y Factores Asociados de los Eventos Medidos.

| Evento | Tiempo Seco (Días) | Precipitación Antecedente | | Precipitación | | Concentración Media del Evento | |
|--------|-----------------------|---------------------------|-----------------|---------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| | | 7 días (mm) | 42 días (mm) | Total (mm) | Intensidad Máxima (mm/h) | Margen Derecha (mg/l) | Margen Izquierda (mg/l) |
| 1 | 24 | 0 | 17.5 | 13 | 24 | 242 | 647 |
| 2 | 8 | 0 | 22.4 | 4.8 | 6 | 381 | 606 |
| 3 | 13 | 0 | 50 | 49.2 | 31 | 295 | 348 |
| 4 | 4 | 72.5 | 220.5 | 91.8 | 47 | 257 | 328 |
| 5 | 12 | 0 | 276.4 | 9.4 | 7 | 102 | 245 |
| 6 | 6 | 10 | 265.8 | 34.2 | 38 | 80 | 97 |
| 7 | 1 | 121.5 | 317.8 | 30.6 | 18 | 94 | 149 |
| 8 | 8 | 0.6 | 163.6 | 11.6 | 16 | 257 | 423 |
| 9 | 5 | 45 | 196.1 | 4.4 | 8 | 354 | 537 |

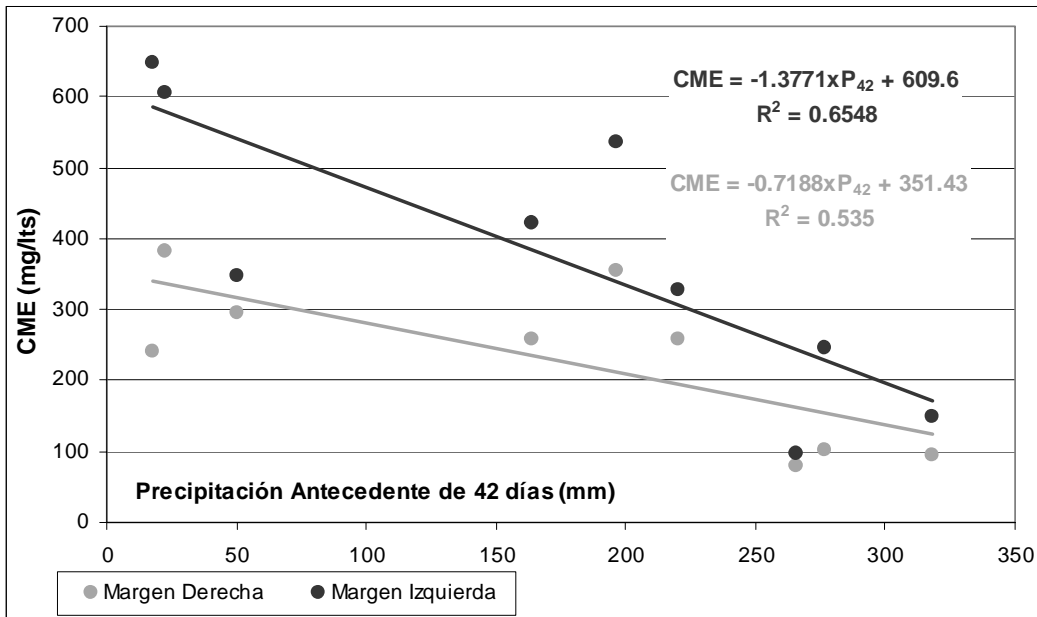


Figura 7. Variación del CME con respecto a la precipitación antecedente de los últimos 42 días.

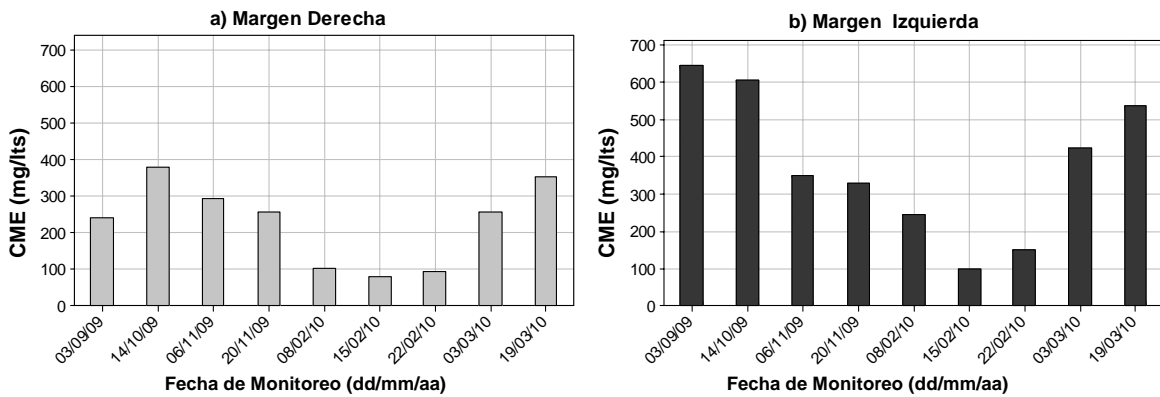


Figura 8. Variación de la Concentración Media del Evento (CME).

RELACIÓN ENTRE TURBIDEZ Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Como medida de control de las concentraciones de sólidos suspendidos, se determinó la turbidez de 66 muestras. La turbidez fue obtenida mediante un turbidímetro que relaciona este parámetro con la intensidad de luz reflejada por las partículas suspendidas en un ángulo de 90° con respecto al rayo incidente.

Con los resultados obtenidos se realizó una curva de regresión utilizando como variable explicativa la turbidez (NTU) y como variable dependiente la concentración de sólidos suspendidos (mg/l).

Debido a la ausencia de diferencias apreciables entre las correlaciones correspondientes a ambas márgenes se unificaron todos los valores en una sola curva sin considerar aquellos atípicos que pudieran distorsionar su interpretación.

En la Figura 9 pueden observarse los valores de turbidez y concentración de sólidos suspendidos, y en la Ecuación (2), la curva de regresión que relaciona ambas variables. El valor de R² de la regresión (0.68), estaría indicando un ajuste aceptable.

[SS] = 0.937 · T^{1.125} (2)

Donde [SS]: concentración de sólidos suspendidos (mg/l) y T: Turbidez (NTU).

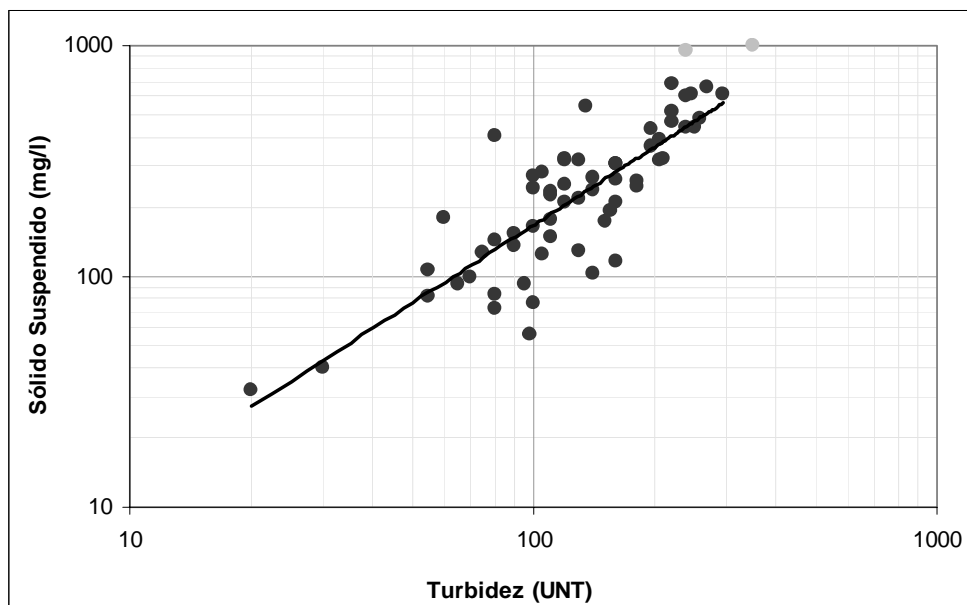


Figura 9. Relación entre turbidez y concentración de sólidos suspendidos de las muestras analizadas.

CURVAS CLAVE DE SEDIMENTOS

Con los valores de descarga sólida de todas las muestras y los caudales líquidos correspondientes se preparó la curva clave de sedimentos para cada margen (Figura 10), atendiendo a las mencionadas diferencias, entre las cuencas que descargan a sendos sumideros.

Como la concentración de sedimentos en los eventos 1 y 2 presenta valores definidamente superiores en ambas márgenes con respecto a la tendencia general, se puede aceptar que las precipitaciones antecedentes determinaron dicho comportamiento, por lo que fueron descartados para el ajuste de las curvas claves.

Durante el evento 9, se observaron valores de concentración de sólidos suspendidos mucho mayores que la tendencia general para caudales similares en la margen izquierda, sin poderse constatar esto en la margen derecha. Esta particularidad puede explicarse por el movimiento de suelos para la construcción de las torres de viviendas en la cuenca que aporta al sumidero de la margen izquierda, llevados a cabo al momento del mencionado evento.

La dispersión de los valores seleccionados por su representatividad puede apreciarse en la Figura 10. Allí se observa que la descarga sólida tiende a aumentar con el aumento de la descarga líquida.

Las curvas claves propuestas para margen derecho e izquierdo, detalladas en las Ecuaciones (3) y (4) respectivamente, presentan un ajuste aceptable (R^2 0.793 y 0.816, respectivamente).

$$Q_s = 0.0325 \cdot Q^{1.58} \quad (3)$$

$$Q_s = 0.1294 \cdot Q^{1.17} \quad (4)$$

Donde Q_s : caudal sólido (g/seg) y Q : caudal líquido (l/seg).

Se constata una marcada diferencia, en las curvas claves de ambos márgenes, para caudales bajos y un mismo comportamiento para caudales líquidos mayores a 11 l/seg.

Considerando las diferencias en uso de suelo de las cuencas de estudio, se concluye que para caudales líquidos bajos la descarga sólida se ve afectada por el proceso de erosión en zonas de suelo desprotegido y/o el lavado de sedimentos depositados en superficies impermeables. En tanto que para caudales mayores a 11 l/seg esta última se ve afectada por la capacidad de transporte de sedimentos de la calzada, es decir, por la cantidad (en peso o volumen) de sedimento que puede movilizarse por un caudal dado en un determinado intervalo de tiempo (Bridge, 2003).

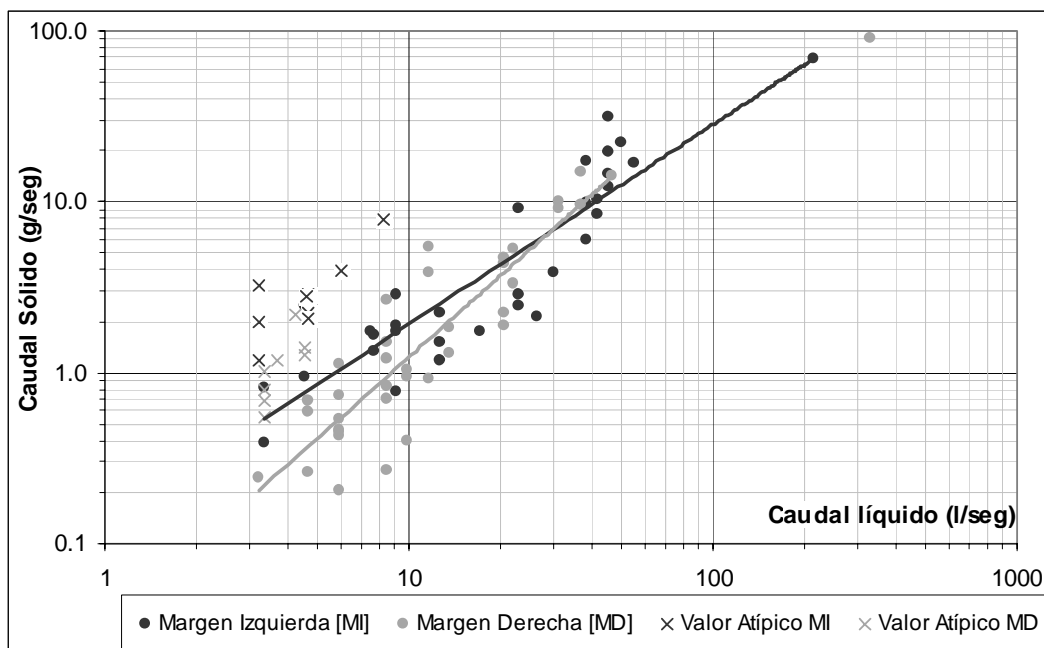


Figura 10. Curva Clave de Sedimentos de los afluentes a los sumideros de margen izquierda y derecha.

CONCLUSIONES

La metodología adoptada ha resultado eficiente, sencilla y de bajo costo para obtener una curva clave de sedimentos de una microcuenca urbana.

Los resultados obtenidos permiten cuantificar la carga de sedimentos de cuencas urbanas similares a la microcuenca estudiada, a partir del registro de los caudales erogados. De igual forma, este procedimiento puede ser adaptado para el estudio de otro tipo de contaminantes.

En la mayoría de los casos, en la cuenca de la margen derecha, se registraron los picos de los polutogramas antes que los del hidrograma, en tanto que en la cuenca de la margen izquierda esta situación fue inversa. Esto se debe a la influencia de las áreas de suelo descubierto en la cuenca de la margen izquierda.

La precipitación antecedente de los últimos 42 días al evento presentó una correlación inversa con la CME de sólidos suspendidos. Sin embargo, no se puede afirmar que haya una relación biunívoca entre ambas variables, dado que pueden existir factores asociados al proceso de acumulación en tiempo seco y de lavado durante una lluvia. Por este motivo la prolongación de esta línea de investigación inclu-

yendo períodos húmedos y secos, tendría significación para despejar dichos interrogantes.

Se pudo constatar que la descarga sólida tiende a aumentar con el aumento de la descarga líquida. En tanto que las curvas claves presentan un ajuste aceptable.

Se concluye que para caudales líquidos reducidos, la descarga sólida se ve afectada por el proceso de erosión en zonas de suelo desprotegido y/o el lavado de sedimentos depositados en superficies impermeables. Para caudales mayores a 11 l/s la descarga sólida se ve afectada por la capacidad de transporte de sedimentos de la calzada.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) y al Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), por la financiación otorgada al Proyecto PICTO136/07 Hidrología Urbana del NEA.

REFERENCIAS

Bridge J. S. 2003. *Rivers and floodplains: form, processes, and sedimentary record*. Blackwell Publishing, Cornwall, United Kingdom.

- Bruniard E. D. 1981. El Clima de las Planicies del Norte Argentino (Ensayo metodológico de geografía de los climas). Tesis de Doctorado en Geografía de la Facultad de Humanidades de la Universidad Nacional del Nordeste. Resistencia, Argentina.
- Carvalho N. O. 1994. *Hidrosedimentologia Prática*. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. Rio de Janeiro, Brasil.
- Chow V. T. 1983. *Hidráulica de Canales Abiertos*. Editorial Diana. México D.F., México.
- Consejo Federal de Inversiones, Asociación de Apoyo a la Facultad de Ingeniería de la UNNE. 1995. Estudio de los desagües pluviales del sector sur de Resistencia. Resistencia, Argentina.
- Deletic A. 1998. The First Flush Load of Urban Surface runoff. *Water Resource*. Vol 32, pp. 2462-2470.
- Deletic A., Maksimovic C., Ivetic M. 1997. Modeling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 35, pp. 99-118.
- Depettris C. A., Ruberto A. R., Kutnich E. J., Ruberto A. R. 2009. Hidrología urbana: instrumentación y evaluación del escurrimiento superficial en una microcuenca de Resistencia, Chaco. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina.
- Dotto CBS. 2006. Acumulação e Balanço de Sedimentos em Superfícies Asfálticas em Área Urbana de Santa Maria – RS. Universidad Federal de Santa Maria – Programa de Pos - Graduação em Engenharia Civil. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, Brasil.
- Maksimovic C. 2001. *Urban drainage in Specific Climates - Volume I: Urban Drainage in humid tropic*. UNESCO – Technical Documents in Hydrology – N° 40. Paris, Francia.
- Novotny V. 1992. Nonpoint source pollution. Unit pollutant loads: their fit in abatement strategies. *Water Environment & Technology*. Vol. 4, pp. 40-43.
- Porto M. F. A. 2001. Water quality of overland flow in urban areas. Maksimovic C. (ed) *Urban drainage in specific climates*, Vol. 1, International Hydrological Programme, Paris, pp. 103 - 121.
- Ruberto A. R., Méndez G. J., Martínez A. E. 2009. Muestreador de aguas pluviales urbanas. XXII Congreso Nacional del Agua, Trelew, Argentina.
- Tucci C. E. M. 1995. *Drenagem urbana*. Editora da Universidade/UFRS, Porto Alegre, Brasil.
- Vaze J., Chiew F. H. S. 2003. Comparative evaluation of urban storm water quality Models. *Water Resources Research*, Vol. 39, pp. 1280-1289.

Artículo recibido el 11/2010 y aprobado para su publicación el 08/2011.