

Temario

Artículos

- Análisis de la relación entre la conductividad hidráulica efectiva y la curva número bajo dos intensidades de lluvia
- Modelación matemática hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial en la Cuenca del A° Pavón (Santa Fe, Argentina)
- Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección

Notas Técnicas

- Mediciones de caudal líquido y sólido en cuencas urbanas de zona serrana de Misiones
- Las obras de arte ferroviarias, su dinámica y los efectos en la actualidad en Santa Fe



CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

Volumen 24
Año 2018

CURIHAM - FCEIA (UNR)
Rosario - Santa Fe
República Argentina



Universidad
Nacional
de Rosario

ISSN 1514-2906 (impreso)
ISSN 2683-8168 (en línea)

CUADERNOS DEL CURIHAM / Volumen 24 / Año 2018

|

L

|

L

|

L

|

L

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

|

L

|

L

ISSN 1514-2906 (Impresa)
ISSN 2683-8168 (En línea)

CUADERNOS DEL CURIHAM

REVISTA DE ESTUDIOS SOBRE LA CUESTION HIDROAMBIENTAL

Volumen 24
Año 2018

Editada por:
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina

Riobamba 245 bis. Ciudad Universitaria.
S2000EKE. Rosario. Santa Fe. Argentina.
Tel: 54-341-4808541
e_mail: revistac@fceia.unr.edu.ar
Sitio web: <https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar>

CUADERNOS DEL CURIHAM

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

Volumen 24, año 2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

Rector: Franco Bartolacci

Vicerrector: Darío Masía

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA

Decana: Dra. Ing. Graciela Utges

Vicedecano: Ing. Damián Portaro

Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales

Director. Hernán Stenta



Universidad
Nacional
de Rosario



Asociación de Universidades
GRUPO MONTEVIDEO



Libro
Universitario
Argentino

CiN REUN

Red de Editoriales
de las Universidades Nacionales
de la Argentina



**CUADERNOS
DEL CURIHAM**
REVISTA SOBRE
LA CUESTION HIDROAMBIENTAL



IMPRESO EN LA ARGENTINA/PRINTED IN ARGENTINA

UNR EDITORA - EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
SECRETARÍA DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

CUADERNOS DEL CURIHAM (Revista de Estudios sobre la Cuestión Hidroambiental)
Volumen Nro. 24 – Año 2018

CONSEJO EDITORIAL

Editora Responsable: Adelma Mancinelli. *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Editor Asociado: Gerardo Riccardi, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Equipo de Edición:

Carlos Scuderi, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Marina García, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Hernán Stenta, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

CONSEJO REVISOR

Pedro Basile, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Mónica Blarasin, *Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina.*

Armando Brizuela, *Universidad Nacional de Entre Ríos, Entre Ríos, Argentina.*

Gabriel Caamaño Nelli, *Instituto Nacional del Agua-Centro de la Región Semiárida, Córdoba, Argentina.*

Mario Castiglioni, *Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.*

Sandra Fernandez, *Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires, Argentina.*

Carlos Marcelo García, *Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.*

Leopoldo Génova, *Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina.*

Javier Heredia, *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.*

Pablo Miguel Jacovkis, *Universidad Nacional de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.*

Víctor Lallana, *Universidad Nacional de Entre Ríos, Entre Ríos, Argentina.*

Sergio Montico, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Raúl Navarro, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Virginia Pacini, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Nora Pouey, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Mariano Re, *Instituto Nacional del Agua, Buenos Aires, Argentina.*

Leticia Rodríguez, *Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*

José Rodríguez, *University of Newcastle, Newcastle, Australia.*

Patricia Saco, *University of Newcastle, Newcastle, Australia.*

Carlos Scioli, *Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*

Alfredo Trento, *Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.*

José Vargas, *Universidad de Concepción, Concepción, Chile.*

Luis Vives, *Instituto de Hidrología de Llanuras, Buenos Aires, Argentina.*

Juan Weber, *Universidad Tecnológica Nacional-Regional Córdoba, Córdoba, Argentina.*

Eduardo Zamanillo, *Universidad Tecnológica Nacional y Universidad Nacional de Entre Ríos, Entre Ríos, Argentina.*

Erik Zimmermann, *Universidad Nacional de Rosario, Santa Fe, Argentina.*

|

L

|

L

ACERCA DE LA REVISTA

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, ISSN 2683-8168 (En línea) | ISSN 1514-2906 (Impresa), es una publicación de periodicidad anual (publica cada diciembre) editada por el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

La revista tiene como objetivo la divulgación de trabajos de investigación básica y aplicada, como así también innovaciones tecnológicas en el campo concerniente a la disciplina hidroambiental. Además, esta publicación puede incluir resultados de investigaciones de campo, estudios interdisciplinarios como así también trabajos acerca de estado del arte en la temática.

Las temáticas comprendidas son: Hidráulica Fundamental, Fluvial e Hidrodinámica; Hidrología Superficial y Subterránea; Hidrología Urbana; Ingeniería Sanitaria, Hidráulica Experimental, Sistemas de provisión de agua, Estocástica; Planeamiento y Manejo de Recursos Hídricos; Evaluación Ambiental; Contaminación y Calidad de aguas; Política y Legislación de Aguas; Gerenciamiento Hidroambiental Regional; Obras Hidráulicas, Métodos y Técnicas Constructivas; y todos aquellos temas relacionados con las ciencias hidroambientales. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, docentes, estudiantes de posgrado y grado y profesionales de las áreas afines a la temática de la misma.

Los artículos y notas técnicas que se propongan para su publicación deberán ser originales y no haber sido publicados previamente, y no estar simultáneamente propuestos para tal fin en otra publicación. La responsabilidad del contenido, originalidad y autenticidad de los artículos o notas técnicas corresponde a los autores.

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM recibe trabajos en español; portugués y/o inglés.

Los autores no pagan ningún costo por el procesamiento; envío y publicación de los artículos y notas técnicas a la revista.

Todos los artículos / notas técnicas recibidos cumplen con las siguientes instancias. En primera instancia, los artículos son revisados por el Consejo Editorial y sólo aquellos artículos/ notas técnicas que cumplen con los estándares científicos y editoriales de la Revista; con sus objetivos y el enfoque pasan a la siguiente etapa. En segunda instancia se realiza la revisión por parte del Consejo Revisor. La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM utiliza para la Evaluación de cada artículo o nota técnica el protocolo de arbitraje tipo simple ciego. Cada artículo o nota técnica debe ser analizado por expertos de alto nivel y de reconocido prestigio nacional e internacional en su ámbito profesional, quienes recomiendan su aceptación, provisoriamente aceptado, provisoriamente no aceptado o no aceptado. Por último, el Consejo Editorial de la revista será el responsable de la decisión final para la publicación o no del artículo o nota técnica. Adicionalmente, los autores deberán aprobar las pruebas finales de sus textos.

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM (versión papel) se encuentra indizada a partir de los criterios de calidad editorial establecidos por el sistema Latindex. Referencia: Catálogo LATINDEX N° 7515 (a partir del año 2004).

La Revista se publica bajo política de acceso abierto. Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional(CC BY-NC-SA 4.0)

Sitio web: <https://cuadernosdelcuriham.unr.edu.ar/>

|

L

|

L

INDICE

ARTICULOS

Análisis de la relación entre la conductividad hidráulica efectiva y la curva número bajo dos intensidades de lluvia.

María Darder, Mario Castiglioni, Adrián Andriulo y Maria Sasal..... 01

Modelación matemática hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial en la Cuenca del A° Pavón (Santa Fe, Argentina)

Hernán Stenta, Gerardo Riccardi, Pedro Basile y Carlos Scuderi..... 11

Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección

Eugenia Chiarito, Erik Zimmermann y Soledad Méndez Zacarías..... 25

NOTAS TECNICAS

Mediciones de caudal líquido y sólido en cuencas urbanas de zona serrana de Misiones

Tomás Rodríguez y Juan Sanchez..... 37

Las obras de arte ferroviarias, su dinámica y los efectos en la actualidad en Santa Fe

Raúl Navarro, Patricia Ruggeri, Belén Alonso, Carla Pagani, Pablo Bussi, Julieta Marcón y Federico Derman..... 51

|

L

|

L

|

L

|

L

ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EFECTIVA Y LA CURVA NÚMERO BAJO DOS INTENSIDADES DE LLUVIA

María Darder⁽¹⁾, Mario Castiglioni^{(2)(*)}, Adrián Andriulo⁽¹⁾ y María Sasal⁽³⁾

⁽¹⁾ Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Pergamino, Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.

⁽³⁾ Estación Experimental Agropecuaria Paraná, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paraná, Entre Ríos, Argentina.

(*) e-mail: castigli@agro.uba.ar

RESUMEN

La conductividad hidráulica efectiva (K_e) del modelo de infiltración de Green y Ampt y el método de la curva número (CN), son herramientas frecuentemente utilizadas en modelos de escurrimiento y contaminación. El objetivo del presente trabajo fue analizar la relación entre K_e y CN, parámetros calibrados a partir de ensayos de infiltración realizados a campo con simulador de lluvia, determinando a su vez el efecto del cambio de escala espacial sobre dicha relación. Se trabajó con resultados de infiltración generados con un simulador de lluvia sobre suelos con aptitud agrícola y ganadera, al aplicar dos intensidades: 60 y 30 mm.h⁻¹. Se calibraron los parámetros CN y K_e , analizando la relación entre ambos. A su vez, se trabajó con el modelo Hec Hms 4.0 para verificar si el cambio de escala espacial modificaba la relación CN- K_e obtenida previamente. En las tierras con aptitud ganadera no existió una relación significativa entre CN y K_e . En aquellas con aptitud agrícola se observó una relación lineal negativa y significativa entre ambos parámetros, la que dependió de la intensidad de lluvia aplicada. El aumento de escala afectó los valores de escurrimiento estimados por el modelo, respecto a los generados a campo. Sin embargo, la relación CN- K_e determinada en pequeñas parcelas, no varió significativamente al ser evaluada para una superficie mayor.

Palabras clave: Simulador de lluvia, modelo de infiltración, escurrimiento, cambio de escala

ABSTRACT

The effective hydraulic conductivity (K_e) of the Green Ampt infiltration model and the curve number method (CN), are tools frequently used in runoff and contamination models. The aim of the present work was to analyze the relationship between K_e and CN, parameters calibrated from infiltration tests carried out in the field with a rain simulator, determining in turn the effect of the spatial scale change over this relationship. The work was carried out with infiltration results generated with a rain simulator on agricultural and livestock soils, applying two intensities: 60 and 30 mm h⁻¹. The CN and K_e parameters were calibrated, analyzing the relationship between both. In turn, we worked with the Hec Hms 4.0 model to verify if the spatial scale change modified the CN- K_e relationship previously obtained. In livestock soils there was no significant relationship between CN and K_e . In those with agricultural aptitude, a significant negative linear relationship was observed, which depended on the applied rainfall intensity. It was found that the increase in scale, affected the runoff values estimated by the model, compared to those generated in the field. However, the CN- K_e ratio obtained in small plots, did not vary significantly when was evaluated for a larger area.

Keywords: Rainfall simulator, infiltration model, runoff, scale change

INTRODUCCIÓN

El escurrimiento y su transporte de sedimentos, nutrientes y plaguicidas, es el principal factor que contribuye a la contaminación no puntual, afectando negativamente la calidad de los cuerpos de agua superficiales (Ficklin y Zhang, 2013). La escorrentía es frecuentemente estimada a partir de la utilización del método de la curva número (CN) (USDA-NRCS, 2010), o por modelos hidrológicos que presentan alguna ecuación de infiltración, como la de Green y Ampt (Green y Ampt, 1911).

La CN es un modelo conceptualmente simple, basado en relaciones empíricas entre la precipitación, el uso de la tierra, el tipo de suelo y su humedad, que no considera la intensidad de la lluvia ni su duración. Contrariamente, la ecuación de Green y Ampt es un modelo de infiltración con base física, que requiere mayor detalle respecto a la dinámica temporal de la precipitación. A su vez, la CN asume una abstracción inicial previa al escurrimiento, mientras que con Green y Ampt se modela la escorrentía a partir de que la intensidad de la precipitación supera la tasa de infiltración (Ficklin y Zhang, 2013). La ventaja del uso de esta ecuación, es que toma en cuenta la evolución del proceso de infiltración a partir de procesos físicos que ocurren en el suelo, por lo que podría estimar mejor el impacto del cambio de uso de la tierra sobre la escorrentía (King et al., 1999).

La ecuación de infiltración de Green y Ampt es una de las más usadas en modelos hidrológicos y de erosión (Van den Putte et al., 2013; Mao et al., 2016). Su incorporación en los modelos CREAMS (Knisel, 1980), SWMM (Huber y Dickinson, 1988), SWAT (Arnold et al., 1998) y WEPP (Lane y Nearing, 1989; Laflen et al., 1997) sugiere su versatilidad (Risse et al., 1995a; Van den Putte et al., 2013). La misma presenta dos parámetros: la conductividad hidráulica efectiva (K_e) y el potencial mátrico efectivo (Ψ), respondiendo este último al contenido de agua inicial del suelo y a la tensión mátrica en el frente de humedecimiento. Se ha observado que los resultados de infiltración estimados, son sensibles a los cambios en los valores de estos parámetros, especialmente respecto a K_e (Nearing et al., 1990; De Roo y Jetten, 1999). Estudios previos realizados con el modelo WEPP (Van der Sweep, 1992; Risse, 1994), mostraron que es necesario un valor realista de K_e para obtener resultados de escorrentía representativos. Sin embargo, para un variado rango de suelos, los

valores de K_e publicados son poco confiables, de la misma manera que está poco documentado el efecto del uso de la tierra sobre dicho parámetro (Nearing et al., 1996).

Para predecir el escurrimiento generado por 330 tormentas en 17 cuencas pequeñas, Rawls y Brakensiek (1986) usaron para estimar K_e el método desarrollado por estos mismos investigadores (Rawls y Brakensiek, 1983), logrando resultados aceptables. Sin embargo, Darder et al. (2018), al comparar los resultados de K_e estimados por este procedimiento con los calibrados a partir de ensayos de infiltración realizados en la región Pampeana, comprobaron que dicha metodología era poco efectiva.

La CN es un método ampliamente aceptado para predecir la escorrentía, pudiendo ser su valor utilizado como variable de estimación de la K_e (Risse et al., 1995a). En este sentido, se han realizado algunos esfuerzos para encontrar una vinculación entre ambos parámetros (Risse et al., 1995a; Zhang et al., 1995; Nearing et al., 1996). Nearing et al. (1996) desarrolló una serie de procedimientos para estimar K_e tomando en cuenta el grupo hidrológico de los suelos, su contenido de arena y el valor de CN. Estos autores demostraron utilizando esta forma de estimación de K_e , que la predicción del volumen de escurrimiento era más realista que el solo uso de la CN.

El objetivo del presente trabajo fue: analizar la relación entre K_e y CN, parámetros calibrados a partir de ensayos de infiltración realizados a campo en pequeñas parcelas y en distintos ambientes de la cuenca alta del Arroyo Pergamino, determinando a su vez el efecto del cambio de escala espacial sobre dicho comportamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y determinaciones realizadas

El trabajo se realizó con resultados provenientes de ensayos de infiltración efectuados a campo mediante un simulador de lluvia. Estas determinaciones se hicieron sobre suelos con aptitud agrícola y ganadera, en distintos ambientes correspondientes a la cuenca alta del Arroyo Pergamino (Pcia. de Bs. As.). El clima regional es templado, con temperaturas medias diarias que oscilan entre los 10 y 12 °C en el invierno y 23° y 25 °C en el verano. La precipitación media anual histórica es de 984 mm

(período 1910-2015) (Estación meteorológica EEA Pergamino, INTA). En las posiciones altas del paisaje predominan Argiudoles típicos (Serie Pergamino) y sus fases con distinto grado de erosión, mientras que en los bajos los suelos forman asociaciones y complejos muy heterogéneos, que contienen proporciones variables de los suelos encontrados en las tierras altas, entremezclados con Alfisoles salinos y alcalinos (INTA, 1972).

En los ambientes ganaderos se trabajó en distintos lotes y a tres distancias respecto del curso de agua principal: 6 m, 30 m y 100 m, presuponiendo la presencia de suelos con características distintas al estar dispuestos más lejos del arroyo. En los ambientes agrícolas se seleccionaron lotes bajo siembra directa ubicados en la loma y media loma, con dos sucesiones de cultivo contrastantes: predominando en algunos casos el cultivo de soja, mientras que en otros el esquema de rotación estuvo más equilibrado con gramíneas.

El simulador de lluvia utilizado posee una parcela de escurrimiento de 50 cm de lado (Iruetia y Mon, 1994). Se hicieron tres repeticiones por lote y por distancia al curso de agua, aplicando dos intensidades de lluvia: 60 mm.h⁻¹ y 30 mm.h⁻¹, en el primer caso durante una hora y en el segundo en un lapso de dos horas. En todos los casos se determinó la tasa de infiltración cada 5 minutos. No se eliminaron de la superficie del suelo los rastros remanentes del cultivo anterior, ni el tapiz vegetal en aquellos ambientes bajo pastura. Las simulaciones de lluvia con una intensidad de 60 mm.h⁻¹ fueron realizadas en mayo de 2011, siendo en total 85 (28 en lomas, 28 en medias lomas y 29 en ambientes con aptitud ganadera). En mayo de 2013 se hicieron 74 simulaciones a 30 mm.h⁻¹ (27 en lomas, 27 en medias lomas y 20 en las posiciones bajas del paisaje). En cada ensayo se tomaron muestras para la determinación de la humedad gravimétrica edáfica inicial y la porosidad del suelo superficial. Para mayor detalle de la parte metodológica ver Darder et al. (2018).

Análisis de los resultados generados con simulador de lluvia

Con los resultados de la lámina total de escurrimiento y de lluvia de cada ensayo realizado a campo, se estimó primeramente el valor de S (retención potencial máxima al comienzo de la tormenta), aplicando la ecuación 1 (Yoo *et al.*, 1993):

$$S = 5P + 10Q - 10(Q^2 + 1.25PQ)^{0.5} \quad (1)$$

Siendo: P = lámina de lluvia (mm); Q = lámina de escurrimiento (mm).

Posteriormente, los valores de S fueron transformados a CN mediante la ecuación 2 (Hawkins, 1993):

$$CN = \frac{25400}{(254 + S)} \quad (2)$$

El método de la CN fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (USDA-NRCS, 2010) para predecir el escurrimiento en superficies que oscilan entre 0.0971 y 18600 ha. No obstante, en el presente trabajo se empleó una superficie menor con la finalidad de analizar fundamentalmente la relación CN-Ke, observando posteriormente su comportamiento en una mayor superficie.

A partir de los resultados de tasa de infiltración de cada ensayo de simulación de lluvia, obtenida cada cinco minutos durante una o dos horas, se calibró la conductividad hidráulica efectiva y la tensión mátrica en el frente de humedecimiento, correspondientes al modelo de infiltración de Green Ampt (Green y Ampt, 1911). Se determinó el grado de vinculación entre ambos parámetros (CN y Ke) para la escala de los ensayos realizados a campo. Posteriormente se analizó el grado de ajuste entre los resultados calibrados de Ke y los estimados mediante la ecuación desarrollada por Nearing et al. (1996) para suelos bajo agricultura, la cual relaciona la Ke con CN según se detalla en la ecuación 3:

$$Ke = \left[\frac{56.82 K_{ef}^{0.286}}{1 + 0.051 \exp^{(0.062 CN)}} \right]^{-2} \quad (3)$$

Siendo: Ke = Conductividad hidráulica efectiva; K_{ef} = conductividad hidráulica efectiva obtenida por tablas para una condición de barbecho; CN = valor de la curva número calibrada para las condiciones de cada ensayo.

Utilización del modelo Hec Hms 4.0 (2010)

Mediante el modelo hidrológico Hec Hms 4.0 (2010), se analizó si la lámina de escurrimiento

estimada con los valores de Ke y CN calibrados con los ensayos de infiltración realizados a campo, se modificaba con la escala. Para ello, se ejecutó dicho modelo utilizando la mitad de los resultados de Ke y CN obtenidos según lo detallado en el punto anterior, bajo iguales condiciones iniciales pero para una superficie de 2 ha. Se contempló que los valores de estos parámetros, abarcaran el rango de resultados obtenidos a campo. Posteriormente se comparó la lámina de escurrimiento generada para las dos escalas (0.25 m² y 2 ha), según los dos parámetros calibrados (Ke y CN) y las dos intensidades de lluvia utilizadas.

También se analizó si la relación Ke-CN obtenida con los ensayos de campo para las dos intensidades de lluvia, se mantenía con el cambio de superficie evaluada. De esta manera y con la utilización del modelo Hec Hms 4.0 (2010), se calibraron nuevamente los parámetros Ke y CN (calibración condicionada) para un área de 2 ha. Para ello se tomó en cuenta la información inicial de campo: humedad edáfica superficial inicial, hietograma de lluvia, caudal generado cada 5 minutos para la superficie de 2 ha (calculado a partir de los milímetros de escurrimiento obtenidos en la parcela del simulador de lluvia, convertidos a caudal considerando la mayor superficie), tensión mátrica en el frente de humedecimiento calibrada para los ensayos de simulación de lluvia, porosidad total del suelo y su contenido de agua bajo suelo saturado (Darder et al., 2018). Con el mismo objetivo pero sin contemplar los resultados de caudal determinados con el simulador de lluvia, se realizó una nueva calibración de Ke (calibración no condicionada), a partir de los caudales estimados con el modelo Hec Hms 4.0 para distintos valores de CN. En este caso, se consideró un rango de valores de CN similar al obtenido en las pequeñas parcelas, aparte de tomar en cuenta el resto de las condiciones iniciales de los ensayos realizados a campo.

El tiempo de retardo (Lag) utilizado con el modelo Hec Hms 4.0 (2010) fue calculando el tiempo de concentración por la fórmula de Sheridan (1994) (Ecuación 4), considerando posteriormente que el Lag es igual a 0.6 * tiempo de concentración (Chow et al., 1994).

$$TC = 2.96(DA^{0.54}) \quad (4)$$

Siendo: TC (horas) = tiempo de concentración y DA = área de drenaje en km².

Análisis de los resultados

El criterio utilizado para determinar los mejores resultados de CN y Ke calibrados, fue la utilización del coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970) (Ecuación 5):

$$R_N^2 = 1 - \frac{\sum (Sim_i - Obs_i)^2}{\sum (Obs_i - Media_{obs})^2} \quad (5)$$

Siendo: Sim_i: Valores simulados; Obs_i: Valores observados; Media_{obs}: Valor medio observado.

R_N² puede variar entre -∞ y 1. Un valor R_N² igual a 1 indica una simulación perfecta (ajuste perfecto a la línea 1:1). Valores menores a cero (negativos) indican que el error del modelo es mayor que la variabilidad de la propiedad bajo estudio y por lo tanto es mejor usar el promedio de los datos que utilizar los valores simulados.

La comparación de resultados obtenidos y el grado de vinculación entre Ke y CN, se hicieron a partir de análisis de varianza, correlación y regresión lineal. Para ello se utilizó el programa InfoStat versión 2017 (Di Rienzo et al., 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados generados con simulador de lluvia

En la Tabla 1 se detallan los resultados medios de CN y Ke y su variabilidad, calibrados a partir de los ensayos de simulación de lluvia, junto con los de humedad gravimétrica inicial del suelo superficial.

Las tierras ganaderas presentaron una Ke significativamente más baja (p<0.05), al mismo tiempo que un valor de CN mayor (p<0.05), independientemente de la intensidad de lluvia aplicada. También se observó cierto efecto de la intensidad de lluvia sobre estos parámetros, aunque el mismo resultó significativo (p<0.05) únicamente para la Ke calibrada en las tierras agrícolas. La variabilidad determinada para Ke fue sensiblemente superior a la de CN, siendo a su vez el coeficiente de variación de este último parámetro menor en las tierras ganaderas. La humedad edáfica inicial media fue del 30-31%, salvo en el caso de las tierras agrícolas bajo 30 mm.h⁻¹ de lluvia simulada, en las cuales el contenido hídrico del suelo fue

significativamente menor ($p < 0.05$). Estos valores de contenido hídrico se consideraron equivalentes a los de una condición antecedente de humedad media (Condición II) (USDA-NRCS, 2010).

Tabla 1: Ke y CN medios calibrados y humedad edáfica superficial inicial.

Intensidad lluvia	30 mm.h ⁻¹				60 mm.h ⁻¹			
Aptitud de las tierras	Agrícolas		Ganaderas		Agrícolas		Ganaderas	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Ke (mm h ⁻¹)	10.8 a A	71	1.7 b A	47	20.2 a B	73	2.2 b A	101
CN	76 b A	22	89 a A	17	78.2 b A	17	92 a A	5
HE (%)	24 a B	23	30 b A	40	30 a A	15	31 a A	39

Ke: conductividad hidráulica efectiva; CN: curva número; HE: humedad edáfica superficial inicial; CV: coeficiente de variación. Letras minúsculas diferentes para una misma propiedad, indican diferencias estadísticas significativas entre usos distintos de la tierra para igual intensidad de lluvia ($p < 0.05$). Letras mayúsculas diferentes para una misma propiedad, indican diferencias estadísticas significativas entre intensidades de lluvia distintas para igual uso de la tierra ($p < 0.05$).

En las tierras con aptitud ganadera, independientemente de la intensidad de lluvia aplicada, se encontró una vinculación débil entre los resultados de estos dos parámetros calibrados. Los valores de CN se ubicaron mayoritariamente por encima de 85, mientras que los de Ke oscilaron entre 0.2 y 6 mm.h⁻¹. Estos resultados no difirieron de lo encontrado en la bibliografía. En este sentido, Luque et al. (1979), citados por Orsolini et al. (2000), mencionaron para suelos de ambientes bajos, inundables y con escasa infiltración, valores de CN entre 84 y 88 para los grupos hidrológicos de suelo C y D, respectivamente. Por su parte y de acuerdo a lo publicado por Rawls et al. (1983), la Ke de los suelos con textura superficial similar a los encontrados en el área evaluada (limosos y franco limosos), sería en promedio 3.4 y 6.5 mm.h⁻¹. Dada la falta de vinculación entre ambos parámetros para este tipo de tierras, se prosiguió únicamente con el análisis de dicha relación para las tierras con aptitud agrícola.

En estas últimas se comprobó una relación negativa entre ambos parámetros, la cual estuvo a su vez condicionada por la intensidad de la lluvia aplicada (Figura 1), resultando mayor la Ke para un mismo valor de CN cuando la precipitación fue de 60 mm.h⁻¹. Sin embargo, para valores de CN iguales o mayores a 85, la relación Ke-CN fue similar para ambas intensidades de lluvia.

En este sentido y bajo 30 mm.h⁻¹, para una CN igual o mayor a 85, los resultados de Ke estuvieron dentro del rango 0.2-8 mm.h⁻¹, mientras que para 60 mm.h⁻¹ se registraron valores de Ke en el rango de 0.7-9 mm.h⁻¹. Este comportamiento coincide con lo hallado para las tierras ganaderas: una Ke reducida para un acotado intervalo de elevados valores de CN.

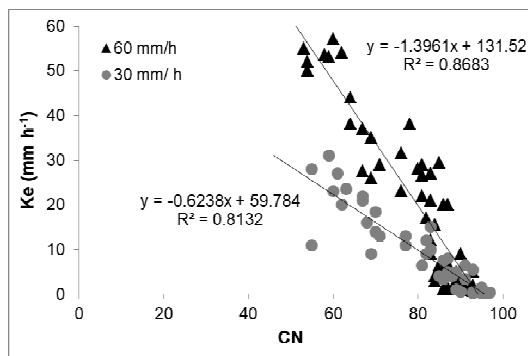


Figura 1. Relación entre CN y Ke para las tierras con aptitud agrícola, considerando dos intensidades de lluvia.

A su vez, la diferente sucesión de cultivos y la posición en el paisaje, no modificaron la tendencia general encontrada para la relación Ke-CN (Figuras 2 y 3) en las tierras agrícolas. Por su parte, los resultados de estos dos parámetros no estuvieron condicionados por el diferente uso de la tierra o por la posición en el paisaje de los suelos, dado que sus valores abarcaron un rango similar, independientemente si los suelos se ubicaban en la loma o media loma, o si se encontraban bajo el monocultivo de soja o con una sucesión de cultivos más equilibrada con gramíneas.

La amplitud de resultados de la Ke y CN calibradas para las tierras bajo agricultura, excedió lo publicado en la bibliografía. Luque et al. (1979), citados por Orsolini et al. (2000), mencionan para suelos pertenecientes al grupo hidrológico C, con cultivos de verano y bajo una condición antecedente de humedad II, valores de CN entre 72 y 82, dependiendo del grado de la pendiente del terreno. Por su parte y de acuerdo con Rawls et al. (1983), la

Ke de estas tierras sería de igual magnitud a la mencionada para las ganaderas, dada la similar textura superficial de ambos tipos de suelo. De esta manera, los valores de Ke y CN citados por estos autores, representarían entre el 10 y 23 % de los calibrados a partir de las mediciones de infiltración realizadas a campo. Esta mayor variabilidad no pudo ser explicada a partir del diferente contenido hídrico inicial de los suelos, ya que el análisis de correlación mostró que el intervalo de humedad edáfica registrado, no incidió significativamente sobre Ke y CN. Solo bajo 30 mm.h⁻¹ de lluvia simulada, se comprobó una débil relación entre la humedad del suelo y Ke (R^2 : 0.17).

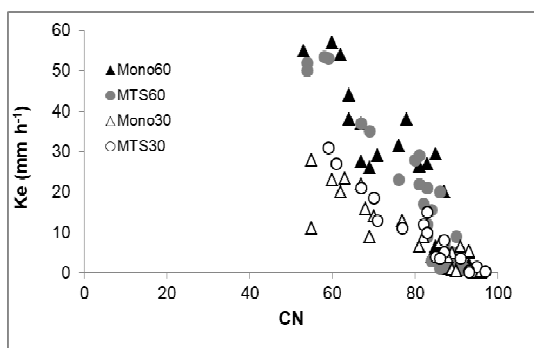


Figura 2. Relación entre la CN y Ke para las tierras agrícolas, de acuerdo a la diferente sucesión de cultivos.

Mono60 y Mono30: monocultivo de soja con 60 mm.h⁻¹ y 30 mm.h⁻¹ de lluvia aplicada, respectivamente. MTS60 y MTS30: rotación equilibrada de gramíneas y leguminosas con 60 mm.h⁻¹ y 30 mm.h⁻¹ de lluvia aplicada, respectivamente.

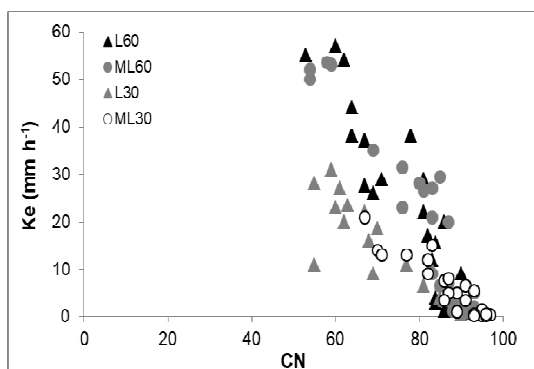


Figura 3. Relación entre la CN y Ke para las tierras agrícolas, de acuerdo a la distinta posición en el paisaje.

L60 y L30: Posición loma con 60 mm.h⁻¹ y 30 mm.h⁻¹ de lluvia aplicada, respectivamente. ML60 y ML30: Posición media loma con 60 mm.h⁻¹ y 30 mm.h⁻¹ de lluvia aplicada, respectivamente.

Distintos trabajos muestran que el tamaño del soporte influye en la variabilidad de los resultados de conductividad hidráulica saturada (Baveye y

Spósito, 1984; Mallants et al., 1997). Por lo tanto, la amplitud de valores observada en Ke y CN, obedecería en parte a que el reducido tamaño de la parcela empleada en las mediciones de campo, habría capturado una mayor diversidad de situaciones, las que habrían quedado diluidas si se hubiese trabajado sobre una superficie mayor.

Los sistemas de producción agrícola en la región Pampeana se encuentran bastante estandarizados, reduciendo la heterogeneidad de las condiciones edáficas. Sin embargo, en el presente trabajo hubo factores que no fueron identificados, que favorecieron el aumento en la variabilidad de los parámetros que condicionan la relación lluvia-escurrimiento (CN y Ke). En este sentido, algunos investigadores (Risse et al., 1995b; Zhang et al., 1995) desarrollaron algunos algoritmos para predecir los cambios sufridos en la Ke, a partir de modificaciones ocurridas en la estructura del suelo, la rugosidad superficial, la intensidad del encostramiento superficial y el grado y tipo de la cobertura vegetal.

Al aplicar la fórmula desarrollada por Nearing et al. (1966) para suelos agrícolas, se comprobó una subestimación de la Ke respecto a los valores calibrados de este parámetro (Figura 4).

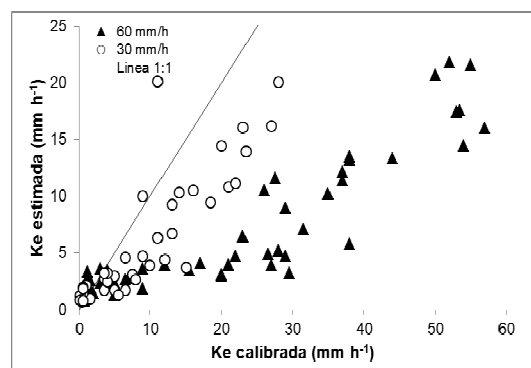


Figura 4. Relación entre la Ke estimada de acuerdo a Nearing et al. (1966) y la Ke calibrada para las tierras agrícolas.

Este comportamiento se observó con mayor intensidad en los ensayos con 60 mm.h⁻¹ de lluvia simulada. En este sentido, desde valores muy bajos de la Ke calibrada y hasta los 30 mm.h⁻¹ de este parámetro, se observó un ligero incremento de la Ke estimada por fórmula. Sin embargo, a partir de dicho valor se pudo comprobar una tendencia en los resultados de la relación Ke estimada-Ke calibrada, bastante similar a la línea de perfecto ajuste (1:1).

Por su parte, con una intensidad de lluvia de 30 mm.h⁻¹, si bien esta relación también se ubicó por debajo de la mencionada línea, la distancia respecto a la misma fue menor.

Utilización del modelo Hec Hms 4.0 (2010)

La relación entre las láminas de escurrimiento observadas a campo y estimadas por el modelo Hec Hms 4.0 para una superficie de 2 ha, dependió del parámetro empleado (CN o Ke) y de la intensidad de lluvia aplicada (Figuras 5 y 6).

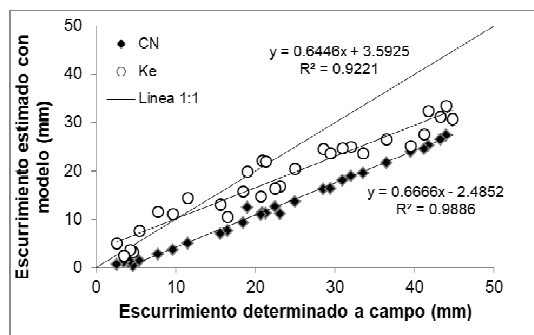


Figura 5. Relación entre las láminas de escurrimiento generadas para ambas escalas bajo una intensidad de lluvia de 60 mm.h⁻¹.

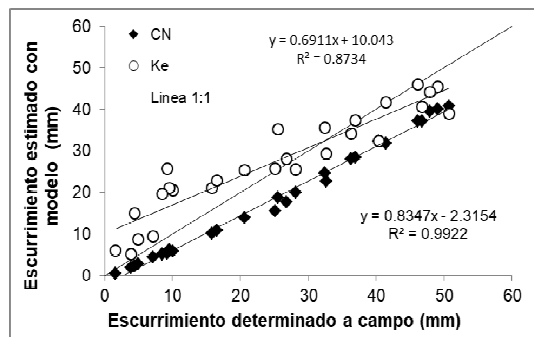


Figura 6. Relación entre las láminas de escurrimiento generadas para ambas escalas bajo una intensidad de lluvia de 30 mm.h⁻¹.

Con una precipitación de 60 mm.h⁻¹ (Figura 5) y para iguales valores de CN, el escurrimiento estimado por Hec Hms 4.0 fue siempre menor al registrado en las parcelas del simulador de lluvia.

A su vez, este comportamiento se acentuó en la medida que el escurrimiento fue mayor. Por su parte, los milímetros escurridos estimados con dicho modelo al utilizar Ke, fueron bastante similares para ambas escalas hasta una lámina de 12 mm, a partir de la cual las diferencias se incrementaron. Al usar

CN, los milímetros de escurrimiento estimados estuvieron entre el 32 y 1577% por debajo de los registrados a campo (promedio: 51%), mientras que utilizando Ke los valores extremos estuvieron por arriba (90%) y por debajo (37%) de lo observado en las parcelas con menor superficie (promedio: 11%).

El coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970), obtenido al contrastar los valores de escurrimiento para ambas escalas, fue 0.29 y 0.71 al utilizar CN y Ke, respectivamente.

Con una precipitación de 30 mm.h⁻¹ (Figura 6), los resultados estimados de escurrimiento a partir de CN presentaron un comportamiento similar al observado con una intensidad de lluvia mayor, aunque en este caso los porcentajes en que se redujo la lámina escurrida estimada con el aumento de escala oscilaron entre el 17 y 75 % (promedio: 33%). Por su parte, con Ke las mayores diferencias de estimación estuvieron entre -23% y +276% (promedio: 46%). Para esta intensidad de lluvia, los resultados del coeficiente de Nash y Sutcliffe (1970) obtenidos al comparar el escurrimiento entre escalas, fueron muy similares al utilizar Ke o CN (0.82 y 0.80, respectivamente).

De acuerdo con estos resultados, los valores de Ke y CN calibrados serían diferentes de acuerdo a la superficie considerada. En este sentido, Castiglioni (2016) determinó una reducción en la Ke calibrada del 60 al 100%, al pasar de una superficie de 0.25 m² a otra de 2100 m². A su vez, este comportamiento dependería también de la intensidad de lluvia y de la magnitud del escurrimiento generado (Figuras 5 y 6). Considerando los coeficientes de Nash y Sutcliffe (1970) obtenidos, la utilización de la Ke calibrada a una determinada escala, arrojaría menos incertidumbre al estimar el escurrimiento a una escala mayor, en comparación al uso de la CN. No obstante, para poder llegar a conclusiones más generales, sería necesario aportar más resultados que abarquen una mayor diversidad de situaciones.

Estas diferencias no fueron suficientes para modificar la relación CN-Ke previamente observada (Figuras 1, 7 y 8).

Estos parámetros, calibrados mediante el modelo Hec Hms 4.0 con los datos de lámina de lluvia y de escurrimiento obtenidos con el simulador de lluvia y transformados a caudal para una superficie de 2 ha, mantuvieron dicha relación (Figura 1) independientemente de la intensidad de lluvia

aplicada (Figuras 7 y 8). Lo mismo sucedió al calibrar la K_e mediante el mismo modelo, a partir de los caudales estimados para una superficie de 2 ha con distintos valores de CN, no estando estos directamente vinculados con los resultados obtenidos a campo (Figuras 7 y 8).

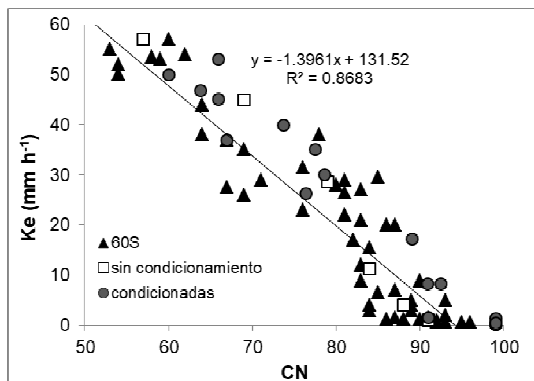


Figura 7. Relación entre CN y K_e calibradas a dos escalas espaciales para una intensidad de 60 mm.h⁻¹.

60S: Relación entre CN y K_e , generada a partir de los ensayos de simulación de lluvia a campo; sin condicionamiento: Relación entre CN y K_e , calibradas con el modelo Hec Hms 4.0 para una superficie de 2 ha, sin estar los resultados condicionados por los caudales observados a campo; condicionadas: Relación entre CN y K_e , calibradas con el modelo Hec Hms 4.0 para una superficie de 2 ha, estando los resultados condicionados por los caudales observados a campo.

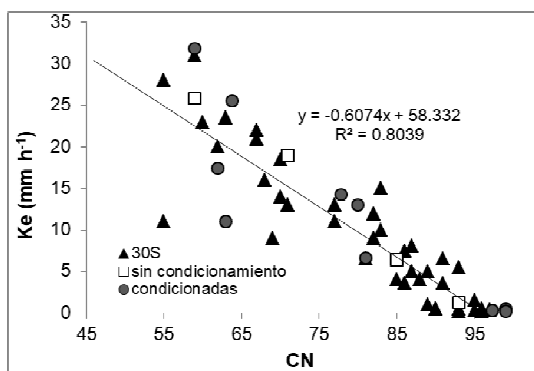


Figura 8. Relación entre CN y K_e calibradas a dos escalas espaciales para una intensidad de 30 mm.h⁻¹.

30S: Relación entre CN y K_e , generada a partir de los ensayos de simulación de lluvia a campo; sin condicionamiento: Relación entre CN y K_e , calibradas con el modelo Hec Hms 4.0 para una superficie de 2 ha, sin estar los resultados condicionados por los caudales observados a campo; condicionadas: Relación entre CN y K_e , calibradas con el modelo Hec Hms 4.0 para una superficie de 2 ha, estando los resultados condicionados por los caudales observados a campo.

A su vez, el grado de dispersión obtenido de K_e y CN no fue mayor que el determinado con las parcelas más pequeñas. Estos resultados muestran la

alta vinculación que existe entre la CN y K_e independientemente de la escala, pudiendo por lo tanto la CN ser utilizada como una variable para predecir K_e .

CONCLUSIONES

Con el objetivo de analizar la relación entre CN y K_e , parámetros calibrados a partir de ensayos de infiltración realizados a campo sobre suelos representativos de la Pampa Ondulada, se pudo comprobar en las tierras con aptitud ganadera, que no existió una relación significativa entre ambas variables. Sin embargo, en aquellos suelos con aptitud agrícola, se observó una correlación lineal negativa y significativa entre CN y K_e , la que fue afectada por la intensidad de lluvia aplicada. No obstante, para resultados de CN superiores a 85, las diferencias en dicha relación entre intensidades de lluvia se diluyeron. Los valores calibrados de estos parámetros, presentaron en las tierras agrícolas una amplitud mayor que la publicada en la bibliografía. La ecuación desarrollada por Nearing et al. (1996) subestimó los valores de K_e , lo cual fue más evidente bajo una intensidad de lluvia de 60 mm.h⁻¹. La relación CN- K_e obtenida en pequeñas parcelas, se comportó de manera similar al ser estimada para una superficie mayor, no obstante lo cual los resultados obtenidos en el presente trabajo deberían ser convalidados con un mayor número de ensayos y que abarquen una mayor diversidad de situaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: Model development. *J. Am. Water Resour. As.*, 34(1), 73-89.
- Baveye, P. y Sposito, G. (1984). The operational significance of the continuum hypothesis in the theory of water movement through soils and aquifers. *Water Resources Research*, 20 (5), 521-530.
- Castiglioni, M. (2016). Propiedades físicas y conductividad hidráulica efectiva en el transcurso de una rotación trigo/soja. *Cuadernos del Curiham*, 22, 15-25.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. Suárez, M. E. (Ed). McGraw Hill, Interamericana S.A., 584 págs.
- Darder, M. L., Castiglioni, M., Andriulo, A. y Sasal, M. C. (2018). Calibración de parámetros de un modelo de infiltración en la cuenca alta del Arroyo

- Pergamino. *Ciencia del Suelo*. En revisión.
- De Roo, A. P. J. y Jetten, V. G. (1999). Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. *Catena*, 37(3-4), 477-493.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2017). InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Ficklin, D. L. y Zhang, M. (2013). A comparison of the curve number and Green-Ampt models in an agricultural watershed. *Trans. ASABE*, 56(1), 61-69.
- Green, W. H. y Ampt, G. (1911). Studies in soil physics. I: The flow of air and water through soils. *J. Agr. Sci.*, 4, 1-24.
- Hawkins, R. (1993). Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *J. Irrig. Drainage Eng.*, 19(2), 334-345.
- Hec-Hms 4.0. (2010). Hydrologic Modeling System. U.S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resource. Hydrologic Engineering Center. Davis C.A.
- Huber, W. C. y Dickinson, R. E. (1988). Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. Environmental Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.
- INTA. (1972). Cartas de Suelo de la República Argentina. Hoja 3360-32 Pergamino, 106p.
- Irurtia, C.B. y Mon, R. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Instituto de Suelos. CIRN INTA Castelar. Publicación Técnica 176.18 pp.
- King, K. W., Arnold, J. G. y Bingner, R. L. (1999). Comparison of Green-Ampt and curve number methods on Goodwin Creek watershed using SWAT. *Trans. ASAE*, 42(4), 919-925.
- Knisel, W. (1980). CREAMS. A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. USDA Conservation Research Report, No.26, 640 pp.
- Laflen, J. M., Elliot, W. J., Flanagan, D. C., Meyer, C. R. y Nearing, M. A. (1997). WEPP predicting water erosion using a process-based model. *J. Soil Water. Conserv.*, 52 (2), 96-102.
- Lane, L. J. y Nearing, M. (Editors). (1989). USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation. NSERL Report No. 2, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). Estudio geológico e hidrogeológico de la cuenca del Río Sauce Grande. Publicación interna del Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional del Sur, Serie Hidrología. Bahía Blanca, Argentina, 3: 64 p.
- Mallants, D., Binayak, P., Mohanty, B. P., Vervoort, A. y Feyen, J. (1997). Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.*, 10, 115-131.
- Mao, L., Li, Y., Hao, W., Zhou, X., Xu, C. y Lei, T. (2016). A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green-Ampt model. *Soil Till. Res.*, 161, 31-37.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models, Part 1, A Discussion of Principles. *J. Hydrol.*, 10, 282-290.
- Nearing, M. A., Deer-Ascough, L. y Laflen, J. M. (1990). Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. *Trans. ASAE*, 33(3), 839-849.
- Nearing, M. A., Liu, B. Y., Risse, L. M. y Zhang, X. (1996). Curve numbers and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resour. Bull.*, 32(1), 125-136.
- Orsolini, H. E., Zimmermann, E. D. y Basile, P. A. (2000). Hidrología, procesos y métodos. UNR (Ed). Rosario. 319 pp.
- Rawls, W. J. y Brakensiek, D. L. (1983). A procedure to predict Green and Ampt infiltration parameters. In Proc. ASAE Conf. On Advances in Infiltration, ASAE, St. Joseph, Michigan, pp. 102-112.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. y Miller, N. (1983). Green Ampt infiltration parameters from soils data. *J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 109(1), 62-70.
- Rawls, W. J. y Brakensiek, D. L. (1986). Comparison Between Green-Ampt and Curve Number Runoff Predictions. *Trans. ASAE*, 29(6), 1597-1599.
- Risse, L. M. (1994). Validation of WEPP Using Natural Runoff Plot Data. Unpublished Ph.D. Dissertation, National Soil Erosion Research Laboratory, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 230 p.
- Risse, L. M., Liu, B. Y. y Nearing, M. A. (1995a). Using curve numbers to determine baseline values of Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resour. Bull.*, 31(1), 147-158.
- Risse, L. M., Nearing, M. A. y Zhang, X. C. (1995b). Variability in Green-Ampt effective hydraulic conductivity under fallow conditions. *J. Hydrol*, 169, 1-24.
- Sheridan, J. M. (1994). Hydrograph time parameters for flatland watersheds. *Trans. ASAE* 37, 103-113.
- USDA-NRCS. (2010). National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology. National Soil Conservation Service, USDA, Washington, DC.

- Van den Putte, A., Govers, G., Leys, A., Langhans, C., Clymans, W. y Diels, J. (2013). Estimating the parameters of the Green-Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. *J. Hydrol*, 476, 332–344.
- Van der Zweep, R. A. (1992). Evaluation of the Water Erosion Prediction Project's Hydrologic Component on a Semi Arid Rangeland Watershed. Unpublished M.S. Thesis, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Yoo, K. H., Yoon, K. S. y Soileau, J. M. (1993). Runoff curve numbers determined by three methods under conventional and conservation tillage. *Trans. ASAE*, 36(1), 57-63.
- Zhang, X. C.; Nearing, M. A. y Risse, L. M. (1995). Estimation of Green-Ampt conductivity parameters: Part I. Row Crops. *Trans. ASAE*, 38(4), 1069-1077.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

Darder, M. L., Castiglioni, M., Andriulo, A. y Nasal, M. C. (2018). Análisis de la relación entre la conductividad hidráulica efectiva y la curva número bajo dos intensidades de lluvia. *Cuadernos del CURIHAM*. 24, 1-10. DOI: 10.35305/curiham.v24i0.111

Tipo de Publicación: ARTICULO.

Trabajo recibido el 11/06/2018 y aprobado para su publicación el 30/11/2018.

MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL A° PAVÓN (SANTA FE, ARGENTINA)

Hernán Stenta^{(1)(*)}, Gerardo Riccardi⁽¹⁾⁽²⁾, Pedro Basile⁽¹⁾ y Carlos Scuderi⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Hidráulica y Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina.

⁽²⁾ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario, Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Santa Fe, Argentina.

(*) e-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la implementación y calibración preliminar de un modelo matemático distribuido, hidrológico-hidráulico de escurrimiento superficial físicamente basado en la cuenca del A° Pavón (sur de la provincia de Santa Fe). La cuenca tiene una superficie de aproximadamente 3143 km² y su principal curso es el tramo: canal San Urbano-A. Sauce –A° Pavón, con descarga al río Paraná. Se utilizó como modelo digital del terreno la información proveniente de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con agregamiento en celdas de 150 m x 150 m. Adicionalmente se contó con información de red de cursos desde cartas topográficas del IGN, imágenes Google Earth ©; recorridas de campo y proyectos existentes. El modelo quedó constituido con 139717 celdas y una red de cursos de 895 km y fue calibrado preliminarmente con información hidrológica e hidráulica de un evento extraordinario ocurrido el 15 de enero de 2017. La explotación del modelo, en este primer nivel de avance, permitió realizar la delimitación de áreas inundadas en la cuenca; la determinación de zonas con riesgo para vidas humanas y mapas de permanencias de agua para el evento extraordinario y una serie de eventos hipotéticos de diferentes recurrencias. Estos resultados son un aporte en la planificación territorial de los recursos hídricos en la zona de estudio. Si bien se evidencia un severo déficit de información, los primeros resultados obtenidos en la transformación lluvia caudal y propagación de escurrimiento superficial son aceptables.

Palabras clave: Modelación matemática distribuida, cuenca de llanura, arroyo Pavón.

ABSTRACT

The implementation and preliminary calibration of a distributed, hydrological-hydraulic, physically based model of surface runoff on the Pavón basin (south of Santa Fe province) is presented. The basin has an area of approximately 3143 km² and its main course is the San Urbano Channel- Sauce Stream and Pavón stream. The discharge is in the Paraná River. The information from topographic charts of the National Geographic Institute (IGN) was used, with aggregation in 150 m x 150 m grid size cells, as a digital terrain model. Additionally, information about the course network was available from topographic maps of the IGN, Google Earth © images; field trips and existing projects. The model was constituted with 139717 cells and a network of courses of 895 km and was preliminarily calibrated with hydrological and hydraulic information of an extraordinary event that occurred on January 15, 2017. The exploitation of the model, in this first level of advancement, allowed to realize the delimitation of flooded areas in the basin; the determination of areas with risk to human lives and maps of water permanence for the extraordinary event and a series of hypothetical events of different recurrences. These results are a contribution in the territorial planning of water resources in the study area. Although a severe information deficit is evident, the first results obtained in the rainwater flow and surface runoff propagation are acceptable.

Keywords: Distributed mathematical modeling, flatland basins, Pavón stream.

INTRODUCCIÓN

En la cuenca hidrográfica del A° Pavón se han realizado diferentes estudios y trabajos; orientados a la descripción general de sus características más relevantes desde el punto de vista de los recursos hídricos, aspectos ambientales y socio-políticos.

La Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (<https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/33.pdf>. Ingreso en febrero de 2018) presenta un reporte descriptivo de las cuencas hídricas de la República Argentina, entre la que se encuentran un grupo de cuencas denominadas en el citado informe como: Cuencas de arroyos del Sudeste de Santa Fe y Norte de Buenos Aires. Este grupo de cuencas está formado por una serie de arroyos que desaguan al delta del Paraná, todos pertenecientes a la cuenca del río Paraná y por lo tanto, a la Cuenca del Plata. Esta cuenca drena un área de aproximadamente 13398 km² siendo la hidrografía del área típica de la llanura ondulada con cursos de agua originados en cañadas. De norte a sur integran la cuenca: el A° Saladillo, A° Pavón, A° del Medio, A° Ramallo, A° de las Hermanas y A° de los Cueros. En dicho trabajo se realiza la descripción general de aspectos físicos-naturales; hidrológicos y socio-económicos de dicha cuenca, remarcando que resultan aspectos descriptivos.

Postiglione et al. (1988) y Postiglione et al. (1989) realizaron un estudio en la cuenca del A° Pavón con el objetivo de obtener caudales de diseño para distintos períodos de retorno en diferentes puntos conflictivos. Detectaron problemas puntuales dentro de la cuenca, entre otras causas, debido a la falta de una solución integrada para las obras de saneamiento de áreas inundadas o por falta de planificación de la infraestructura ferro-vial. Utilizaron modelos agregados para cuantificar las pérdidas de escurrimiento y la transformación lluvia-caudal. Remarcan sobre la importancia crucial que juega la calidad y cantidad de información disponible para lograr adecuados resultados. El trabajo se desarrolló en el marco de un convenio entre el Comité de Cuencas Hídricas Área Gran Rosario y la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

Basile et al. (1988) realizaron un trabajo que propone una “metodología mínima” a aplicar en los estudios hidráulicos de puentes a construir en cursos de agua no navegables de nuestra región. Concretamente, realizan la aplicación directa a manera de “pronóstico

hidráulico” del puente de la ruta Provincial N° 18 emplazado en correspondencia con el A° Pavón.

Riccardi (1989) realizó la aplicación de un modelo matemático hidrodinámico en un tramo de la cuenca media del A° Pavón con el objetivo de simular numéricamente el tránsito de crecidas en dicho tramo.

Orsolini y Daniele (1994) realizan el estudio de la descarga del A° Pavón en el río Paraná. Realizaron la caracterización del funcionamiento en la zona de la descarga previa al río Paraná y la detección de las diferentes problemáticas del hidrosistema. Plantearon medidas estructurales y no estructurales para dar solución a la problemática encontrada.

INA (2004) realizó estudios hidrológicos e hidráulicos en el marco del proyecto de descarga de la laguna La Picasa al río Paraná. Realizaron la evaluación hidrológica e hidráulica del arroyo Pavón, ya que este curso de agua es el receptor y conductor de los aportes derivados por bombeo desde la laguna La Picasa y los interceptados por el canal en todo su recorrido. Evaluaron las interferencias que genera el canal desde el punto de bombeo hasta su conexión con el arroyo Pavón. Evaluaron la evolución temporal y espacial de una situación de excesos hídricos correspondiente al año 2001 en donde se registraron 1412 mm en un estado de alta saturación antecedente. Realizaron la simulación hidrológica utilizando HEC-HMS en forma continua. También realizaron la implementación de un modelo matemático hidrodinámico unidimensional en el tramo proyectado, simulando el comportamiento del canal y de los reservorios de laminación.

Mendez Zacarías y Zimmermann (2011) realizan un trabajo donde utilizan un Sistema de Información Geográfica (SIG), como herramienta para la gestión de información necesaria en la modelación de dos sistemas hidrológicos del sur de la provincia de Santa Fe. Dichos sistemas son la cuenca del A° Pavón y la cuenca del A° Saladillo. Entre las conclusiones indican sobre la importancia de los SIG para la gestión de la información de los modelos matemáticos ya sea para la caracterización de las cuencas como para la interpretación de resultados.

Por su parte, Pasotti (1971), realizó un detallado trabajo respecto a los aspectos fisiográficos, morfológicos y geológicos en la cuenca del A° Pavón.

La revisión del estado del arte indica que no se han realizado estudios respecto a modelación matemática

distribuida del escurrimiento superficial en todo el ambiente hidrográfico de la cuenca del A° Pavón. En este trabajo se comienza a implementar un modelo matemático de escurrimiento superficial, de parámetros distribuidos en toda la cuenca. Se ha avanzado en la constitución del área de modelación, la definición de la red de cursos de mayor importancia y la definición de las obras de arte de mayor importancia conjuntamente con la definición del trazado ferro-vial en toda la cuenca. El modelo fue calibrado preliminarmente y aplicado a los efectos de analizar áreas de inundación; zonas de riesgo de vida humano y tiempos de permanencia de aguas.

Se remarca el déficit de información hidrometeorológica, lo que implica cierto grado de incertidumbre en el ajuste del modelo. En un sentido opuesto a lo anterior, se indica que el modelo y diferentes variantes del mismo ha sido empleado en tiempos recientes obteniéndose resultados satisfactorios, en trabajos de Stenta et al. (2015), Stenta et al. (2017a y 2017b), Riccardi et al. (2013), Basile et al. (2010); Rodríguez et al. (2017) y Sandy et al. (2018).

OBJETIVO

El objetivo principal del trabajo es avanzar en la descripción del comportamiento del escurrimiento superficial y su impacto en cuencas del sur de la provincia de Santa Fe, en este caso se realiza el estudio sobre la cuenca del A° Pavón (sur de la provincia de santa Fe).

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los trabajos

El trabajo se compone de una breve descripción del modelo matemático utilizado; se describe la constitución del modelo matemático distribuido en la cuenca del A° Pavón y se presenta un proceso de pre-calibración o calibración preliminar en función del avance logrado hasta la fecha respecto a la disponibilidad de datos existentes para un evento extraordinario, el ocurrido el día 15 de enero de 2017.

Debido a la extensión superficial del sistema físico a modelar, a la dificultad de acceder a datos como registros de niveles, caudales, lluvias, dimensiones

de obras de arte, se remarca que lo que aquí se presenta es un primer avance.

Breve Descripción del Modelo Matemático

Para la modelación matemática distribuida se utilizó el sistema de modelación matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido cuasi-bidimensional, basado en un esquema de celdas interconectadas; denominado VMMHH 1.0 (Riccardi et al., 2013). Esta herramienta tecnológica es la última actualización de la fusión entre el modelo matemático hidrológico-hidráulico CTSS8 (Riccardi, 2000) y la plataforma en sistema de ventanas para pre y post procesamiento de información y resultados SIMULACIONES (Stenta et al., 2005). El sistema de modelación está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El sistema permite la simulación de escurrimiento superficial multidireccional en ambientes rurales y urbanos. En cada unidad de la capa superficial es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta, aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. Para la información necesaria de lluvia neta en cada celda se plantea la utilización de las metodologías reconocidas de Green y Ampt o del Servicio de Conservación del Suelo de EEUU (Chow et al., 1994). El escurrimiento resultante puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde aproximaciones cinemáticas a difusivas de la ecuación de momento, permitiendo el tránsito por ríos, canales y valles de inundación. Para contemplar alternativas puntuales de flujo se incorporaron leyes de descarga para puentes, vertederos y alcantarillas. Las ecuaciones gobernantes consideradas son la de continuidad y distintas simplificaciones de la ecuación de cantidad de movimiento transformadas en formulaciones de descarga entre celdas. La distribución espacial de los parámetros y variables hidrológicas se realiza mediante la subdivisión de la cuenca en celdas de igual tamaño (cuadrangulares) interconectadas entre sí que definen el dominio del sistema hídrico a modelar. Las celdas pueden ser tipo valle o río que representan el flujo superficial y en canal respectivamente. De esta forma; las celdas tipo río representan cursos de agua permanente y/o transitorios de importancia y las celdas tipo valle representan las áreas tributarias a estos.

Descripción de la Cuenca del A° Pavón

El arroyo Pavón constituye la red más meridional de la Provincia de Santa Fe. Su cuenca está orientada de un modo general de SO a NE; las cotas máximas llegan a los 115 m IGN y las mínimas a los 17 m IGN, correspondiendo el nivel de base al encuentro con el río Paraná (Figura 1 y Tabla 1). Limita al norte con la cuenca del A° Saladillo; al Sur con la cuenca del A° del Medio y la Laguna Melincué (en sus nacientes) y al oeste con la cuenca del río Salado. Tiene una superficie colectora del orden de los 3143 km².

La cuenca del arroyo Pavón abarca las localidades de Chovet, Elortondo, Miguel Torres, Carreras, Bombal, Alcorta, Máximo Paz, Francisco, Santa Teresa, Acebal, Carmen del Sauce, La Vanguardia, Cepeda, Sargento Cabral, cañada Rica, Stephenson, J. B. Molina, Coronel Bogado (cerca de la divisoria), Godoy, Rueda, Pavón y Uranga (cerca de la divisoria).

La cuenca se encuentra en la denominada Pampa Ondulada, subregión de la Llanura Pampeana. La Pampa Ondulada es una angosta franja que se extiende desde el río Carcarañá en Santa Fe hasta Punta Indio en Buenos Aires; presenta un relieve caracterizado por suaves ondulaciones, más marcado en la parte oriental, debido a la erosión de los ríos y una leve elevación del basamento cristalino por lo que se puede distinguir en esta zona barrancas, bajos y terrazas fluviales. Los numerosos arroyos, en dirección oeste – noreste, se dirigen al río Paraná que en esta zona se presenta en forma deltaica. El frente fluvial sobre los grandes colectores está caracterizado por una barranca casi continua, de gran importancia antropogeográfica. Los suelos “zonales” son argiudoles típicos (familia arcillosa fina), bien drenados. Los horizontes superficiales tienen una textura franco-limosa, con bajo contenido de arena. (<https://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/pdf/33.pdf>. Ingreso en febrero de 2018)

El sistema de drenaje principal está constituido por los arroyos Pavón y Sauce, este último recoge los aportes del canal San Urbano. Aguas abajo de la confluencia de los arroyos Sauce y Pavón se incorporan por margen derecho los aportes del arroyo Cabral y la cañada Rica.

En la estación de Coronel Bogado (Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica.

<http://bdhi.hidricosargentina.gob.ar/> Ingreso diciembre 2017), se estima que el módulo anual para el periodo 1988-2018 es de 14 m³/s con un valor máximo de 47.5 m³/s (2015-16) y un mínimo de 3.3 m³/s (1999-2000).

El escurrimiento de la cuenca del A° Pavón se compone de los aportes de dos cursos principales: canal San Urbano-A. Sauce y canal Alcorta-A. Pavón. Del área total de aportes (3143 km²), el 56 % corresponde al primer curso, el 15% para el segundo y el 29 % restante para el área aguas debajo de la confluencia de ambos.

Según INA (2004) en la salida de la cuenca las crecidas propias tienen un tiempo al pico de 48 a 72 horas y un tiempo de base del orden de 5-10 días, dependiendo de la distribución de la tormenta.

Respecto al régimen de caudales se verifican máximos superiores a 700 m³/s en crecidas extraordinarias. No obstante, la curva de duración de caudales medios diarios corresponde a un régimen de crecidas de corta duración y esporádicas, con caudales superiores a los 200 m³/s en no más del 1% de los días del año; también indica caudales superiores a 40 m³/s en no más del 5% de los días del año. Esta característica observada del régimen de caudales hace factible la simulación por eventos en la cuenca.

Tabla 1. Características generales de la cuenca del A° Pavón.

Área Total (km ²)	3143
Cota Máxima (m IGN)	115.3
Cota Mínima (m IGN)	16.95
Pendiente media (m/km)	0.60
Densidad de Drenaje (km/km ²)	0.28
Índice de Compacidad de Gravelius (-)	2.02
Índice de Rugosidad (-)	28
Uso predominante	Agrícola-ganadero
Área Urbana total (%) respecto al área de la cuenca)	0.7

La disponibilidad y existencia de datos de precipitación y niveles de agua resulta escasa. La única estación de registro de niveles operada por la Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica de la Nación es la estación Coronel Bogado: 3318 - Pavón - Coronel Bogado. Red hidrometeorológica nacional. río: Pavón. Provincia: Santa Fe. Latitud: 33° 21' 36,22". Longitud: 60° 34' 36,39". Los datos de interés utilizados en el trabajo son: Aforos (14/05/1987 al 07/03/2019); Altura (01/06/1988 al 31/03/2019) y Caudal Medio Diario (01/06/1988 al 02/09/2018).

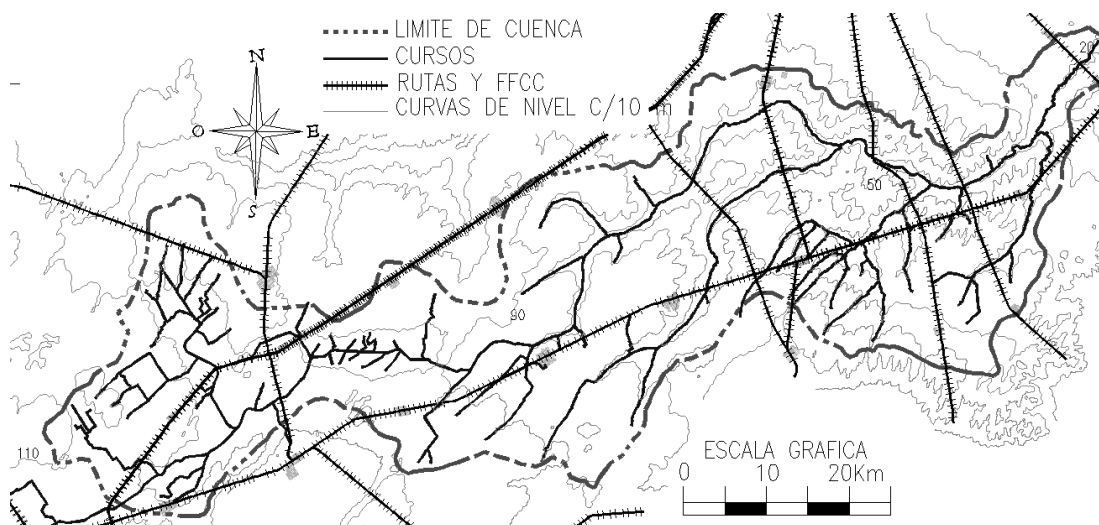


Figura 1: Cuenca del arroyo Pavón.

Respecto a la información de precipitación; para el evento extraordinario del día 15 de enero de 2017 se utilizaron los registros de precipitaciones totales de las estaciones de Agricultores Federados Argentinos (<http://clima.afascl.coop/historico/>.

Ingreso Diciembre de 2017) donde se obtuvieron los valores de lluvia total en 13 estaciones: Bigand; Rueda; Santa Teresa; Bombal; Alcorta; Villa Amelia; Maizales; Labordeboy; Firmat; J. B. Molina; Cda. Rica; Carmen del Sauce y Chovet. Para la distribución temporal de la lluvia se utilizaron los datos disponibles de los registros pluviográficos de la Estación de Peaje de General Lagos sobre la Autopista Rosario-Buenos Aires. Dicha estación de peaje se encuentra a aproximadamente 25 km al norte de la estación de aforo de Coronel Bogado citada previamente. La duración de la lluvia total es de 10 hs. Para la distribución espacial se utilizó la técnica de polígonos de Thiessen. Para la obtención de la lluvia neta se utilizó la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de suelos de los Estados Unidos. Se estimó un valor de 231 mm de lluvia total y de 210 mm de lluvia neta, ponderada en la cuenca.

Implementación del modelo matemático en la cuenca.

Generación del modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno (MDT) se constituyó en base a la utilización de los cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Las cartas utilizadas son: Acebal, Bogado, Villa Constitución, Los Quirquinchos, Firmat, Bigand, Santa Teresa, J. B. Molina, General Rojo, Chautebrian, Chovet, Melincué, Alcorta, Peyrano, El Socorro, Elortondo, Hughes y Wheelright.

En función de la capacidad de información a ser manejada que permita operar computacionalmente al modelo matemático se adoptó un nivel de discretización espacial de celdas de 150 m x 150 m. Los datos originales de las curvas de nivel de las cartas topográficas del IGN fueron procesados con un software específico que permitió recortar los datos dentro del límite de la cuenca; realizar la proyección plana a Gauss-Krüger (GK) - faja 5 Argentina Posgar 94, Datum WGS 84 y finalmente realizar el agrupamiento en valores equidistantes de 150 m x 150 m.

Para la delimitación de la cuenca se utilizaron las curvas de nivel obtenidas del MDT agregado de 150 m x 150 m y se realizó el trazado considerando la divisoria de aguas topográfica y los elementos antrópicos como ser terraplenes ferroviarios y carreteros.

Se consideró como sección de control de la cuenca la desembocadura del A° Pavón en el río Paraná.

Modelación de la red hídrica; terraplenes carreteros y ferroviarios y puentes.

Para la incorporación de la red de cursos se utilizaron diferentes fuentes de información con la finalidad de obtener tanto la definición de la traza como las características hidráulicas y geométricas más representativas de los diferentes tramos de los cursos. Dichas fuentes fueron: Google Earth[®]; relevamientos y estudios previos existentes en el DH-CURIHAM (FCEIA, UNR). En esta primer etapa se realizó la incorporación de los principales cursos. Se realizó el trazado de los cursos en el software Google Earth[®] y desde allí se exportaron y se realizó el tratamiento correspondiente para obtener la red de cursos

georreferenciada en formato DXF; luego se importaron en la plataforma visual SIMULACIONES 2.0 y se definieron las celdas ríos y sus características en el modelo matemático. Cada celda río posee las siguientes características: base de fondo, talud, profundidad, coeficiente de rugosidad de Manning en río y en valle y cota de fondo. Estas características debieron ser ingresadas al modelo para cada celda. Se cargaron un total de 5964 elementos río, generando una extensión de 895 km de cursos.

En esta etapa del trabajo no han sido incorporados a la constitución del modelo dos puntos de aporte o inyección de caudales. Uno de ellos corresponde a los caudales bombeados desde la Laguna Melincué hacia el canal San Urbano. El sistema de bombeo admite un caudal máximo de 5 m³/s. El otro punto corresponde al límite oeste, donde por medio de una red artificial de canales se incorpora al escurrimiento superficial de la cuenca natural del A° Pavón un área aproximada de 120 km². Como se indicó este aporte se produce en la cuenca alta, en el límite oeste de la cuenca natural. Sin embargo debe dejarse claro que a los efectos de estas primeras aplicaciones donde se focaliza la descripción de crecidas extremas en la cuenca baja del sistema hídrico, la evidencia empírica indica que la respuesta hidrológica en términos de caudales producida por estos dos puntos de aportes externos no está directamente en fase con la generación de ondas de crecidas de relevancia en la cuenca baja.

Para el trazado vial se siguió la misma metodología que para la traza de cursos. Los tramos de rutas ingresados dentro de la cuenca son: R33; R90; R178; R18; R21 y Au. Ros.-Bs.As. y se definieron las trazas de 7 ferrocarriles y sus correspondientes obras de arte. Se definieron 3856 vinculaciones tipo terraplenes; 155 alcantarillas y 13 puentes.

El modelo se constituyó con un tamaño de grilla (TG) cuadrangular de 150 m de lado (Figura 2), conformado por 139717 celdas (133753 celdas tipo valle y 5964 celdas tipo río) y 277729 vinculaciones entre celdas.

Escenarios modelados

El evento del 15 de enero de 2017 ha sido utilizado para la calibración preliminar del modelo.

Adicionalmente, se utilizaron escenarios hipotéticos para lluvias de recurrencia 20 años, 50 años, 100 años y 500 años, todos de duración 5 días para la obtención de alturas máximas, permanencia de agua y riesgo humano. Los escenarios han sido obtenidos a partir del trabajo de Riccardi et al. (2008). En la Tabla 2 se resumen las variables de mayor interés de los escenarios hipotéticos y del evento ocurrido el 15 de enero de 2017.

Tabla 2. Escenarios modelados.

Escenario	Lluvia total (mm)	Duración (hs)	Lluvia neta (mm)	CN
R=20 años	231	120	140	variable
R=50 años	267	120	170	variable
R=100 años	294	120	198	variable
R=500 años	357	120	253.2	variable
15 de enero de 2017	231	10	200	90

Mapas de inundación; riesgo de vida humana y permanencia.

Para estimar los valores de alturas de agua en las celdas del modelo que permitan representar las zonas de afectación y elaborar los mapas de inundación se adoptó como hipótesis un valor de altura de agua igual o superior a 0.30 m (altura de agua calculada en el modelo matemático) que representa un valor del 85 % del área en planta inundada de la celda del modelo. Por lo anterior los sectores que no se presentan como afectados no indican que no presentan algún grado de inundación, sino que las alturas de agua en dichas celdas del modelo tienen un área en planta anegada menor al 85 %.

Para la obtención de los mapas de riesgo de vidas humanas se adoptó como criterio el que se muestra en la Figura 3 que resulta de la combinación de las variables hidráulicas de velocidades de flujo y alturas de agua.

Para la elaboración de los resultados respecto a las permanencias de agua se consideró como criterio, obtener la permeancia para alturas iguales o superiores a los 0.30 m.

Para la obtención de todos los resultados se utilizaron rutinas específicas.

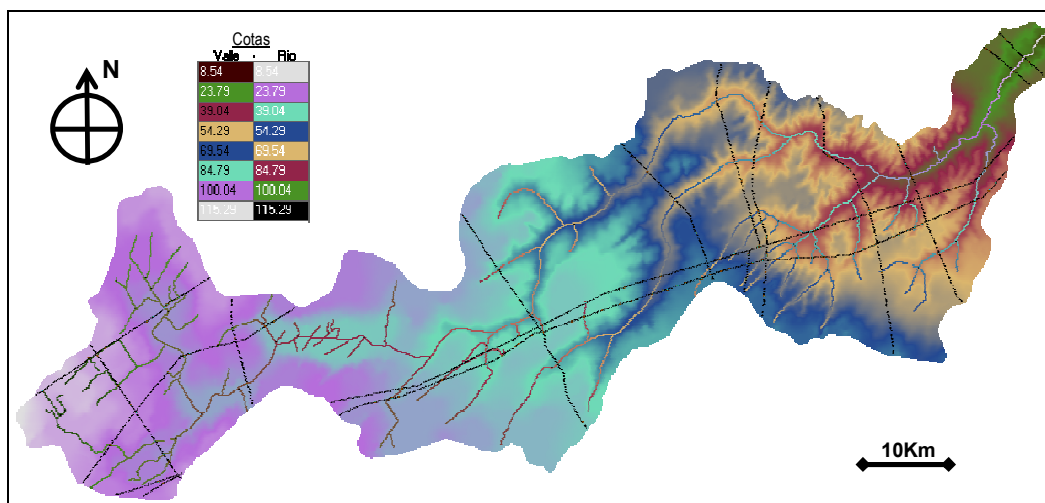


Figura 2: Modelo matemático de la Cuenca del arroyo Pavón. Tamaño de celda: 150 m x 150 m.

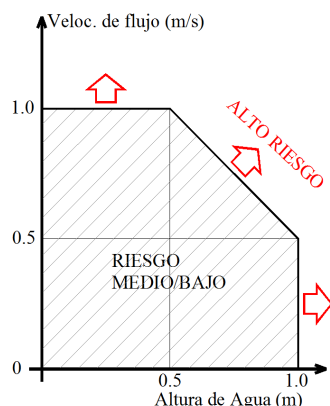


Figura 3: Criterio de definición de riesgo de vida humana.

RESULTADOS OBTENIDOS

Calibración preliminar

En este primer avance del trabajo se contó solamente con información de un evento extraordinario de precipitación ocurrido el 15 de enero de 2017. Se reconoce la falta de información hidrometeorológica para realizar un adecuado proceso de calibración –validación. Por otra parte se indica que el modelo utilizado, con base física y espacialmente distribuido ha sido aplicado con muy buenos resultados en cuencas de características similares. Por lo anterior, los valores de los parámetros del modelo (coeficientes de rugosidad de Manning en cursos y en valle de inundación; coeficiente de gastos en alcantarillas, puentes y en los terraplenes carreteros y ferroviarios que por su baja altura pueden ser sobrepasados por las aguas y actúan como vertederos de cresta ancha) se han definido

en función de valores de esos parámetros calibrados en otras cuencas de la región de características similares; en base a los datos reportados en bibliografía específica y en base a lograr un adecuado ajuste para el evento modelado del 15/01/2017.

Para el evento mencionado se contrastaron volúmenes de escurrimiento, caudales máximos e hidrogramas y limnigramas calculados en la estación Coronel Bogado. En esta instancia del trabajo no se pudo disponer de otros puntos de control interno en la cuenca (es decir, secciones aforadas con valores de alturas de agua y caudales). Se focalizó en determinar el rango de rugosidades en el escurrimiento por valle y encausado, como así también en la proposición de la sección transversal de conducción y almacenamiento en las celdas valle. Los valores resultantes del coeficiente de rugosidad de Manning en cursos se valorizaron en el rango $0.025 - 0.04 \text{ s/m}^{1/3}$; la rugosidad en valle se ajustó en el rango entre $0.08 - 0.12 \text{ s/m}^{1/3}$ y las características geométricas de la sección transversal de conducción y almacenamiento dentro de cada celda resultó en sección triangular; inclinación: 0.02 V: 1 H. Una síntesis de los resultados obtenidos en el proceso de calibración se presenta en la Tabla 3. En dicha Tabla 3 se indica: PBIAS, error porcentual del sesgo (BIAS); R, coeficiente de correlación y EP, error porcentual.

Los caudales son inferidos a partir de relación ajustada H-Q determinada a partir de los aforos de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2014). En la Figura 4 se muestran los datos de aforo y la ecuación de ajuste de la curva H-Q.

Tabla 3 - Comparación de variables en sitio Coronel Bogado. Evento 15/01/2017.

	$H_{\max}$ (m)	$Q_{\max}$ (m ³ /s)	Vol. (hm ³)	PBIAS H (%)	PBIAS Q (%)	R ² H	R ² Q	EP en $H_{\max}$	EP en $Q_{\max}$	EP Vol.
Observado	6.4	570	294	-2.3	-12.1	0.95	0.89	-4.8	+9.1	-12.7
Calculado	6.1	622	257							

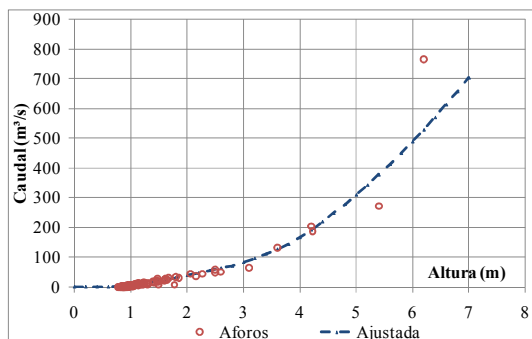


Figura 4: Aforos y curva H-Q ajustada, SSRRHH Nación (2014)

En la Figura 5 se muestran los limnigramas observado y calculado y en la Figura 6 se presentan los hidrogramas inferido y calculado.

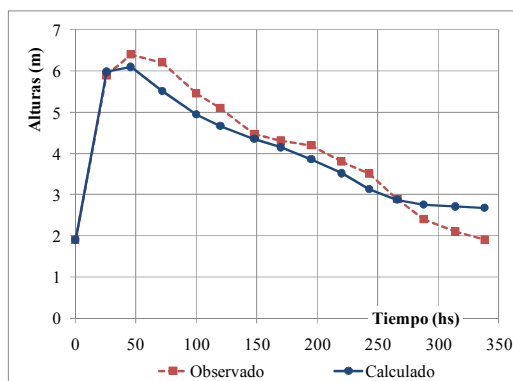


Figura 5: Limnigramas observado y calculados.

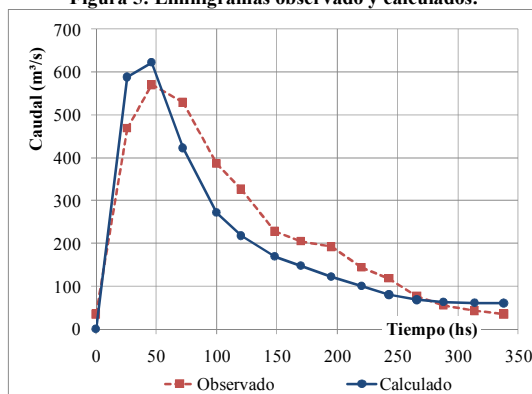


Figura 6: Hidrogramas observado y calculado.

Se observa un adecuado grado de ajuste entre los valores observados y calculados. Se alcanzó un mejor ajuste en términos de alturas de agua respecto a caudales.

Es posible realizar un análisis global en términos de volúmenes en la cuenca. En la Figura 7 se muestra la evolución temporal del volumen total ingresante, saliente y remanente en la sección de aforo.

Se observa que al momento de finalizar la lluvia (10 hs), debido a que no hay gran caudal saliente, todo el agua se encuentra almacenada en la cuenca, es decir, una lámina promedio de 210 mm (601 hm³ asociada al área de la cuenca en la sección de aforo de 2866 km²). También se observa que luego de 15 días (360 hs) se tiene un volumen remanente en la cuenca de 344 hm³ (representa un 57 % del total del volumen ingresante). Si se asume que el cual se estabiliza en 50 m³/s (valor cercano al caudal en el hidrograma de salida a los 15 días), el volumen de 344 hm³ tardará en drenar aproximadamente 80 días.

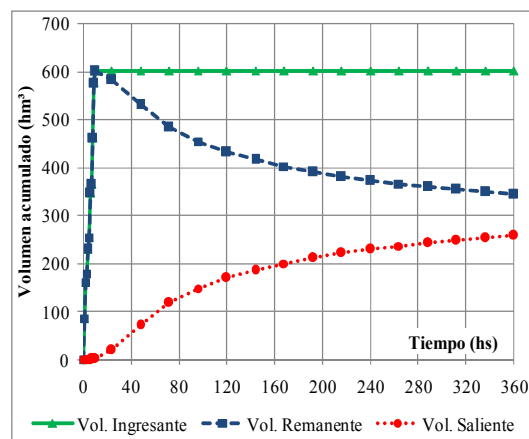


Figura 7: Variación temporal de volúmenes acumulados.

A partir de la calibración preliminar se realizó la explotación del modelo, con la finalidad de obtener mapas de inundación, mapas de permanencia y mapas de riesgo humano; tanto para el evento del 15/01/2017 como Para los diferentes escenarios hipotéticos (R = 20 años a R = 500 años).

Mapas de inundación

En la Figura 8 se muestra el mapa de inundación para la Recurrencia de 20 años, y en la Figura 9 para la Recurrencia de 500 años.

En la Tabla 4 se resumen los valores de área afectada, y su porcentaje respecto al total de la cuenca para diferentes rangos de alturas máximas y para los escenarios modelados.

Mapas de permanencia

En la Figura 10 se muestra el mapa de permanencia de agua superior a 0.30 m para la Recurrencia de 20 años (Figura 9), y en la Figura 11 para la Recurrencia de 500 años.

En la Tabla 5 se resumen los valores de área afectada, y su porcentaje respecto al total de la cuenca para diferentes rangos de horas de permanencia con alturas superiores a 0.30 m para los escenarios modelados.

Mapas de riesgo humano

En la Figura 12 se muestra el mapa de riesgo humano (alto riesgo) para la Recurrencia de 20 años y en la Figura 13 para la Recurrencia de 500 años.

En la Tabla 6 se resumen los valores de área afectada, y su porcentaje respecto al total de la cuenca para el caso de riesgo humano alto para los escenarios modelados.

En términos generales es posible observar que el evento del 15 de enero de 2017 arroja resultados similares a los eventos extraordinarios de 100 años y 500 años de recurrencia. Específicamente, en términos de áreas de inundaciones y riesgo humano los resultados se encuentran entre los resultados de los eventos de 100 años y 500 años de recurrencia y en términos de permanencia de agua los resultados son muy similares al escenario de 100 años de recurrencia.

Estos resultados evidencian el carácter extraordinario del evento ocurrido el 15 de enero de 2017.

En el rango de recurrencias estudiadas (20 años a 500 años) se observan como resultados generales valores de áreas de inundación entre el 11.7 % (R = 20 años) y 15.9 % (R = 500 años) del área total de la

cuenca para alturas iguales o mayores a 1.0 m. Estos valores se incrementan al reducirse la altura de agua considerada, llegando a un porcentaje entre el 66.7 % del área de la cuenca (R = 20 años) y el 80.1 % (R = 500 años) para alturas superiores a 0.30 m.

En términos de permanencia de aguas se tienen porcentajes de afectación respecto al área total de 29.7 % (R = 20 años) y 35.7 % (R = 500 años) para permanencia mayores a 24 hs (y alturas iguales o superiores a 0.30 m). Estos valores se reducen al incrementarse la permanencia, obteniéndose porcentajes de afectación de 7.8 % (R = 20 años) y 8.8 % (R = 500 años) para permanencias superiores a 10 días (y alturas iguales o superiores a 0.30 m).

Los valores de riesgo humano varían entre 11.8 % y 15.9 %, para R = 20 años y R = 500 años, respectivamente.

La cantidad de celdas tipo río (es decir, celdas en donde se ha definido un tramo de curso de agua) es de 5964, lo que representa un área de 134.2 km² y un 4.3 % del área total de la cuenca.

A partir de esta consideración, los resultados arrojan que el porcentaje de área de la cuenca con riesgo humano, fuera del área de los cursos de agua, es variable entre 7.5 % (R = 20 años) hasta 12.7 % (R = 500 años).

De igual forma, para el caso de permanencia de aguas superiores a 10 días (y alturas iguales o superiores a 30 cm), el porcentaje del área de afectación (fuera de los cursos de agua) es de 3.5 % para R=20 años y de 6.1 % para R = 500 años.

Fue posible determinar también a partir de los resultados obtenidos, que existen sectores donde se produce la acumulación de agua en los límites de la cuenca, lo que indica que deben revisarse (adecuarse) las condiciones de borde del modelo en dichas zonas. En estos casos se evidencia trasvase de cuencas. Estos efectos se observan en la parte alta de la cuenca, con posible trasvase hacia el sistema de la laguna Melincué y hacia el sistema de las nacientes de la cuenca del Río Salado.

Otra cuestión observada, también referida al comportamiento del sector alto de la cuenca, tiene que ver con la condición inicial de los sectores bajos. En dicha zona de la cuenca, la red de drenaje se encuentra en una zona plana, con cursos y zonas bajas interconectadas en momentos de producirse un

evento lluvioso, y sin una red de drenaje definida. En dichos sectores es necesario definir niveles de agua como condición inicial al modelo, asociados a niveles históricos de los bajos. En este nivel de avance del trabajo solo se han considerado niveles mínimos en los sectores bajos.

Tabla 4 - Resumen de resultados. Áreas de inundación.

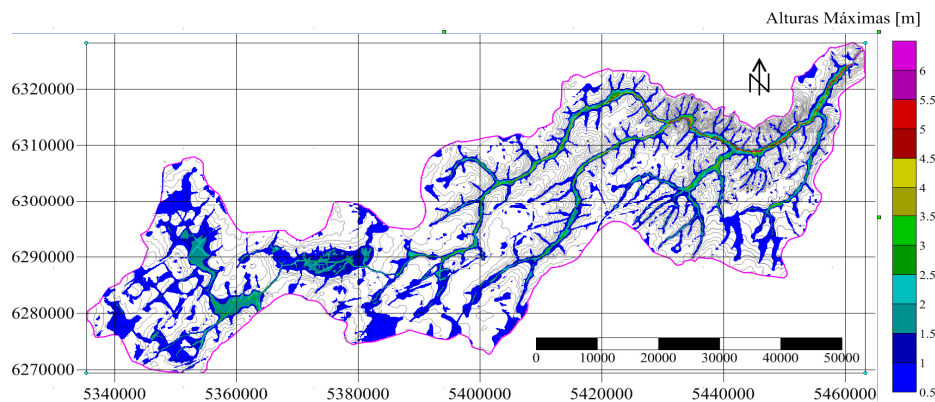
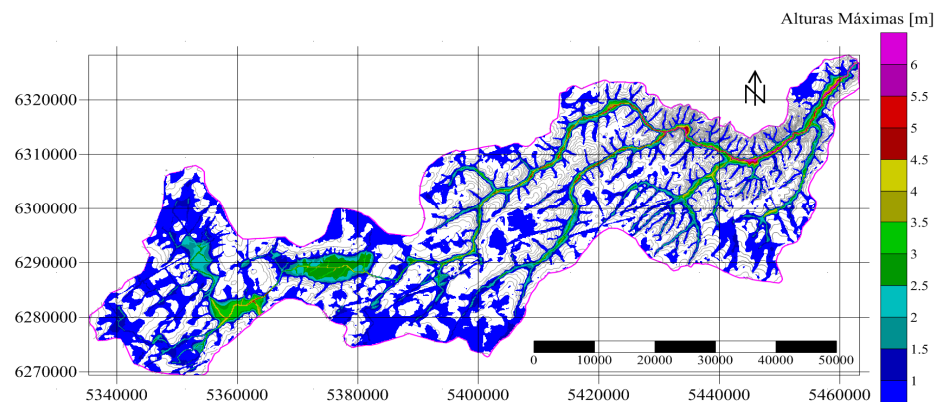
Alturas de agua (m)	R = 20 años		R = 50 años		R = 100 años		R = 500 años		Evento 15/01/2017	
	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área
0.3	2096	66.7	2299	73.1	2422	77.0	2632	83.7	2520	80.1
0.8	469	14.9	530	16.9	574	18.3	691	22.0	649	20.6
1.0	368	11.7	413	13.1	445	14.2	533	17.0	501	15.9

Tabla 5 - Resumen de resultados. Permanencia de aguas.

Horas de permanencia (hs)	R = 20 años		R = 50 años		R = 100 años		R = 500 años		Evento 15 ene 2017	
	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área
24	934	29.7	1008	32.1	1069	34.0	1196	38.1	1123	35.7
48	707	22.5	772	24.6	838	26.7	936	29.8	816	25.9
72	578	18.4	624	19.8	678	21.6	773	24.6	640	20.4
120	433	13.8	470	14.9	494	15.7	550	17.5	470	14.9
240	245	7.8	266	8.5	278	8.8	326	10.4	278	8.8

Tabla 6 - Resumen de resultados. Riesgo humano.

Riesgo Humano	R = 20 años		R = 50 años		R = 100 años		R = 500 años		Evento 15 ene 2017	
	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área	Área (km ²)	% Área
Alto Riesgo	371	11.8	415	13.2	447	14.2	532	16.9	501	15.9


Figura 7. Mapas de alturas máximas para Escenario R = 20 años.

Figura 8. Mapas de alturas máximas para Escenario R = 500 años.

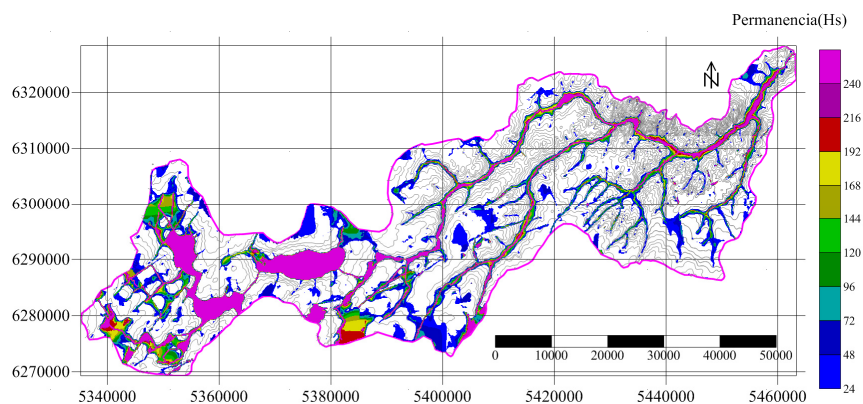


Figura 9. Mapas de permanencia de agua para Escenario R = 20 años.

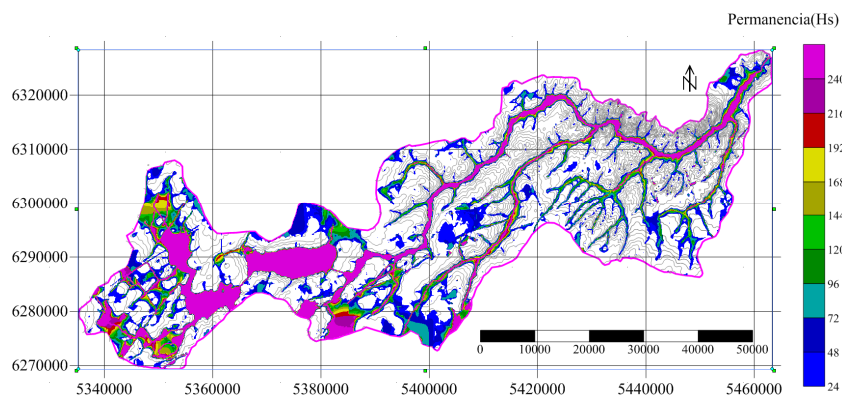


Figura 10. Mapas de permanencia de agua para Escenario R = 500 años.

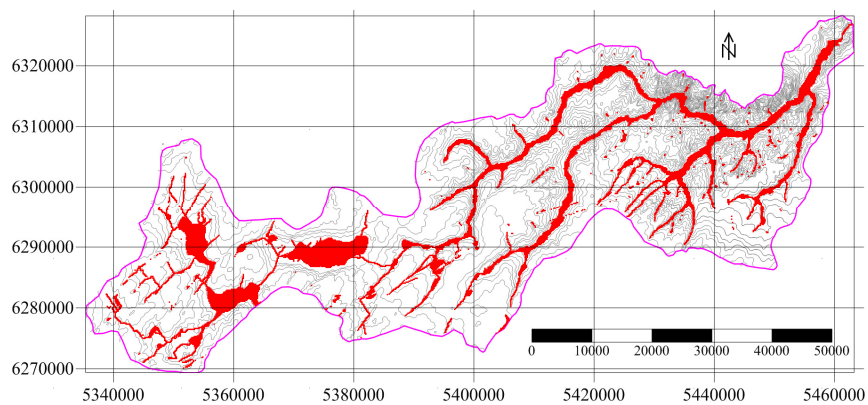


Figura 11. Mapas de riesgo humano para Escenario R = 20 años.

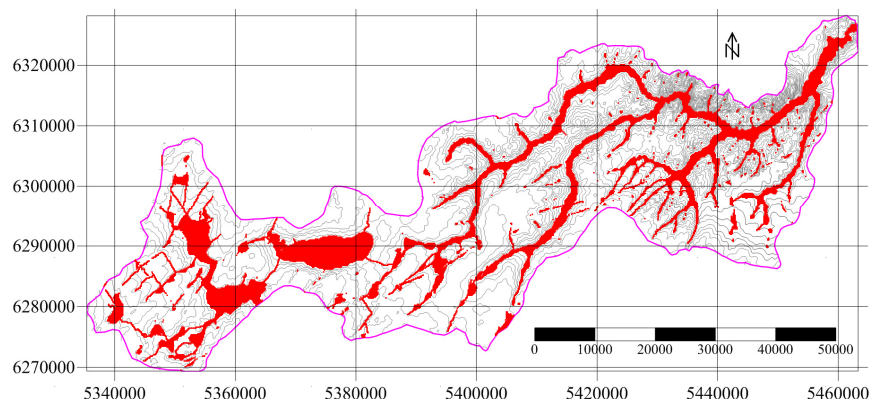


Figura 12. Mapas de riesgo humano para Escenario R = 500 años.

CONCLUSIONES

Se ha logrado realizar un avance en la modelación matemática hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial en la cuenca del A° Pavón (Sur de la provincia de Santa Fe). Este tipo de avance no ha sido reportado en la bibliografía consultada.

Se ha realizado la calibración preliminar considerando un evento extraordinario ocurrido el 15 de enero de 2017. Los resultados son satisfactorios, en términos del ajuste en alturas de agua y caudales en una sección interna de la cuenca, a partir de la comparación con datos relevados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

Los resultados permitieron conocer el comportamiento hídrico superficial de la cuenca y definir mapas de inundación (para diferentes alturas de agua), mapas de riesgo humano y mapas de permanencia de aguas (para diferentes tiempos de permanencia) tanto para el evento ocurrido el 15 de enero de 2017 como para una serie de eventos hipotéticos con recurrencias variables entre 20 años y 500 años.

Estos resultados son de utilidad para las autoridades públicas de los municipios involucrados para tener en consideración las posibles zonas de mayor vulnerabilidad ante crecidas en la cuenca y para su utilización en la planificación y gestión del recurso hídrico superficial.

Debido a la inexistencia de registros es necesario remarcar la necesidad de incorporar infraestructura para recolección de información hidrometeorológica (niveles, caudales, precipitaciones, etc.) que permitirá tener mayor certeza en las predicciones del modelo.

Como continuidad en el avance de la modelación del escurrimiento superficial en esta cuenca se pretende ampliar los datos de eventos observados para ser utilizados en el procesos de calibración - validación, tanto en la sección utilizada para la calibración como en otras secciones internas de la cuenca.

Se resalta la necesidad de contar con un sistema de monitoreo de variables hidrometeorológicas en la cuenca; así como la necesidad de salir a realizar mediciones en los casos de eventos ordinarios y/o extraordinarios.

También se abordará el estudio de las condiciones de borde en los límites de la cuenca debido al efecto de trasvase de cuencas. De igual forma se pretende avanzar con mayor certeza respecto a las condiciones iniciales de niveles de agua en los bajos internos del sistema, principalmente, en la zona alta de la cuenca.

Futuros estudios incorporarán el análisis de otras variables de flujo y sedimentológicas, como por ejemplo el estudio de áreas de influencia en la respuesta hidrológica-hidráulica de la cuenca en diferentes sectores dentro de la misma y la determinación de la producción y transporte de sedimentos a nivel de cuenca.

También se proyecta a mediano plazo realizar la explotación del modelo en la cuenca del A° Pavón orientada a aportar a la solución de las diversas problemáticas que actualmente producen los excedentes hídricos superficiales de la cuenca; así como evaluar posibles mini-aprovechamientos hidroeléctricos; profundizar los estudios referidos a la descarga de la Laguna La Picasa y su impacto; entre otras aplicaciones. En forma general se intenta avanzar para abordar la problemática del recurso hídrico a nivel superficial dentro de la cuenca del A° Pavón.

AGRADECIMIENTOS. A la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID-UNR: ING 509 y ING 514.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Basile, P.; Bruno, S.; Serafino, S.; Forestieri, C. (1988). Diseño hidráulico de un puente. Proyecto Integrador. Carrera de Ingeniería Civil. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad regional Rosario. 172 pgs.
- Basile, P.; Riccardi, G.; Zimmermann, E. y Stenta, H. (2010). Simulation of erosion-deposition processes at basin scale by a physically-based mathematical model. *International Journal of Sediment Research*, 25, 91-109.
- Chow, V. T., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia. Mc Graw-Hill.
- Cunge, J. (1975). Two Dimensional Modelling of Floodplains (Cap. 17). En Mahmood K. and Yevjevich V (Eds.) *Unsteady flow in open channels*. Water Resources Publications, Fort Collins.
- Instituto Nacional del Agua (INA) (2004). Proyecto de descarga de la laguna La Picasa al río Paraná. Informe Final. Cap. IV. Estudios Hidrológicos. 95 pgs.
- Mendez Zacarías, J. S. y Zimmermann, E. (2011). Uso de sistemas de información geográfica para parametrización de modelos de simulación hidrológica en llanuras. XXIII Congreso Nacional del Agua Resistencia, Chaco, Argentina. pp 55-72.
- Orsolini, H. y Daniele, A. (1994). Diagnóstico de la descarga del A° Pavón al Río Paraná. Dirección provincial de Obras Hidráulicas. Provincia de Santa Fe. Consejo Federal de Inversiones. 98 pag.
- Pasotti, P. (1971) El Arroyo Pavón. Morfología de su cuenca y modelo de red Hidrográfica. Instituto de Fisiografía y Geología. Publicaciones LV. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. 59 pgs.
- Postiglione, R.; Zimmermann, E.; Fava, D.; Gómez, G.; Reghitto, C. y Zucca, O. (1988). Estudio Hidrológico Arroyo Pavón – Provincia de Santa FE. Informe de Avance N° 2. Reporte técnico Interno, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.
- Postiglione, R.; Zimmermann, E.; Fava, G.; Gomez, G. (1989). Metodología propuesta para el estudio hidrológico de la cuenca del Arroyo Pavón. Primer encuentro Nacional de Comités de Cuenca. 8 pag. Cosquín, Córdoba.
- Riccardi, G. (1989). Implementación de un modelo matemático hidrodinámico en un tramo de la cuenca media del Arroyo Pavón. Primer encuentro Nacional de Comités de Cuenca. 8 pag. Cosquín, Córdoba.
- Riccardi, G. (2000). A cell model for hydrological-hydraulic modeling. *Journal of Environmental Hydrology*, 8.
- Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E. y Trivisonno, F. (2013). Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(1), 83-105.
- Rodríguez, J.; Saco, P.; Sandi, S.; Saintilan, N.; y Riccardi, G. (2017). Potential increase in coastal wetland vulnerability to sea-level rise suggested by considering hydrodynamic attenuation effects. *Nature Communications*, 8, 16094.
- Sandi, S., Rodríguez, J., Saintilan, N., Riccardi, G. y Saco, P. (2018). Rising tides, rising gates: The complex ecogeomorphic response of coastal wetlands to sea-level rise and human interventions. *Advances in Water Resources*, 114, 135-148.
- Stenta, H., Rentería, J. P. y Riccardi, G. (2005). Plataforma Computacional para Gestión de Información en la Simulación Hidrológica-Hidráulica del Escurrimiento Superficial. XX° Congreso Nacional del Agua y III° Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Mendoza, Argentina. Trabajo 74. pp 1-13.
- Stenta, H.; Riccardi, G. y Basile, P. (2015). Modelación distribuida del escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Caracaraña.. *Aqua-LAC*, 8(1), pp. 44-57.
- Stenta, H.; Riccardi, G. y Basile, P. (2017a). Grid size effects analysis and hydrological similarity of surface runoff in flatland basins. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 1736-1754.
- Stenta, H.; Riccardi, G.; y Basile, P. (2017b). Modelación del escurrimiento superficial en la cuenca del A° Seco (Santa Fe) para el evento extremo del día 15 de Enero de 2017. XXVI Congreso Nacional del Agua, Córdoba, Argentina. 527-540

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO:

- Stenta, H.; Riccardi, G.; Basile, P. y Scuderi, C. (2018). Modelación matemática hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial en la cuenca del A° Pavón (Santa Fe, Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*. 24, 11-23. DOI: 10.35305/curiham.v25i0.122

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 01/08/2018 y aprobado para su publicación el 30/11/2018.

METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA EN ÁREAS URBANIZADAS MEDIANTE TELEDETECCIÓN

Eugenia Chiarito ⁽¹⁾; Erik Zimmermann ^{(1) (2) (*)} y Soledad Méndez Zacarías ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Santa Fe, Argentina.

⁽²⁾ CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina.

(*) e_mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

El coeficiente de escorrentía (C) del método racional, correspondiente a un área determinada, se estima en base al uso y el tipo de suelo existentes, pautado por una vasta bibliografía internacional. Convencionalmente esta clasificación de usos de suelo se realiza a través de la interpretación de imágenes satelitales y de su constatación en campo. Este trabajo se centra en la comparación entre la metodología convencional y dos metodologías que permiten vincular valores de C con usos de suelos obtenidos mediante técnicas de Teledetección. En una de ellas se busca esta correlación a partir del uso de índices normalizados de construcción (NDBI y UI), mientras que en la otra se determinan las coberturas a partir de una clasificación supervisada. En ambos casos se utilizan imágenes del satélite LANDSAT 8. Las metodologías fueron validadas contrastando resultados en 3 cuencas urbanas de la ciudad de Rosario, Santa Fe. Con ambas se obtuvieron resultados con diferencias respecto a la metodología convencional comprendidas entre el 3% y el 16%. Estas propuestas alternativas implican una reducción significativa del tiempo requerido para la estimación del C.

Palabras clave: uso de suelo, coeficiente de escorrentía, teledetección.

ABSTRACT

The estimation of the runoff coefficient (C) of the rational method in a given area is based on the land use and land cover based on a wide international bibliography. Conventionally this classification is done by interpreting satellite images supported with field supervision. This work focuses on the comparison between the conventional methodology and two methodologies that relate C values with land use estimation based on remote sensing techniques. One of them is based on standardized building indexes (NDBI and UI), while the other is based on supervised classification. In both cases, LANDSAT 8 images are processed. The methodologies were validated by contrasting results in 3 urban basins of Rosario city, in Santa Fe. Differences between 3% and 16% were obtained in both cases when compared to the conventional methodology. These alternative proposals imply a significant reduction in the time demanding for the C estimation.

Keywords: land use; runoff coefficient, remote sensing.

INTRODUCCIÓN

El escurrimiento en cuencas urbanas se puede dividir en dos componentes interrelacionados, los cuales, en función de la magnitud de los eventos de lluvia, presentarán funcionamientos hidráulicos diferentes.

Un componente es el escurrimiento superficial por techos, veredas, calles, playas de estacionamiento, cunetas, zanjas, etc. El mismo puede drenar hacia la red de conductos a través de obras de captación, hacia canales urbanos secundarios o directamente hacia el cuerpo receptor principal (río, mar, lago, etc.). El otro componente es el escurrimiento en la red de conductos, los cuales transportan el agua captada del sistema superficial por medio de bocas de tormenta, captaciones de zanja, etc. Los conductos drenan hacia el cuerpo receptor principal o en ocasiones hacia canales urbanos secundarios. La capacidad de descarga de la red de conductos se establece a partir de lluvias de diseño máximas de una duración determinada y valores bajos de períodos medios de retorno, generalmente de 2 a 5 años. La adopción de recurrencias bajas obedece a razones de orden económico como así también a las limitaciones de espacio físico que plantea la realidad urbana. De cualquier modo es esperable que, para un sistema bien diseñado, durante tales eventos no se produzcan sustanciales inundaciones en la ciudad, y para tormentas de recurrencia mayor, dicho sistema permita mitigar en algún grado los posibles anegamientos.

El proyecto del sistema de una red de drenaje implica la selección del diámetro de los conductos, las pendientes, la distribución y localización de los conductos, de las bocas de tormenta, de las bocas de registro, etc.

Una vez que se ha seleccionado una distribución para los conductos colectores, se puede utilizar el método racional para determinar el caudal máximo de diseño. Con dicho caudal podrán establecerse las dimensiones de las bocas de tormenta, el diámetro de los conductos, las dimensiones de eventuales canales, etc. El método racional, a pesar de las críticas, ha sido y es actualmente aplicado dada su simplicidad y facilidad de implementación. Una de las implicancias de mayor incertidumbre en el método es el denominado *coeficiente de escorrentía* C. Normalmente se recurre a tablas, publicadas en la bibliografía internacional, donde el valor de C queda definido en función de las características del

sistema, afectado por una ponderación areal según cada configuración presente en el área de interés.

En este sentido, intenta hacer un aporte al siguiente trabajo, analizando distintas metodologías basadas en técnicas de teledetección, con la intención de sistematizar la estimación de este parámetro. Las metodologías propuestas se comparan entre sí y con los valores obtenidos de la manera convencional en tres cuencas urbanas de la ciudad de Rosario (Santa Fe, Argentina).

EL MÉTODO RACIONAL

El método racional fue desarrollado por Mulvaney (1850) cuya propuesta se basa en que: dada una cuenca de área A con un tiempo de concentración T_c , si se produce una lluvia P con duración $D=T_c$, el caudal generado en el punto de salida será el máximo, ya que estará aportando toda la cuenca.

El método plantea una proporcionalidad entre el caudal máximo y la intensidad de lluvia y puede expresarse como:

$$Q = C_u \cdot C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Donde: Q es el caudal de diseño (L^3/T), C_u es el coeficiente de conversión de unidades, C es el coeficiente de escurrimiento (adimensional), i es la intensidad de la precipitación de diseño (L/T), y A es el área de drenaje de cuencas (L^2).

El coeficiente de escurrimiento C, es la variable que presenta mayor incertidumbre en su determinación, y representa una relación adimensional entre la lámina de escorrentía superficial generada por una determinada cuenca y la lámina de la precipitación. El coeficiente de escorrentía varía con la pendiente, condiciones de la superficie y de la cubierta vegetal y el tipo de suelo hidrológico. Las superficies que son relativamente impermeables como las calles y plazas de aparcamiento tienen coeficientes de escorrentía que se aproximan a uno. Las superficies con vegetación para interceptar la escorrentía superficial y las que permiten la infiltración de las precipitaciones tienen coeficientes de escorrentía más bajas (cercanas a 0). Si todos los demás factores son iguales, una zona con una mayor pendiente tendrá más escorrentía de aguas pluviales y así un coeficiente de escorrentía más alto que una zona con una pendiente inferior. Los suelos que tienen un alto contenido de arcilla no permiten mucha infiltración

y por lo tanto tienen coeficientes relativamente altos de escurrimiento, mientras que los suelos con alto contenido de arena tienen mayores tasas de infiltración y bajos coeficientes de escorrentía.

Este coeficiente se puede cuantificar en términos de tipo de suelo, pendiente topográfica y tipo de cobertura. Numerosa bibliografía puede consultarse para estimar los coeficientes de escurrimiento (Chow et al, 1988; McCuen 1998). En el caso de que haya heterogeneidades en dichos parámetros, debe ser estimado mediante áreas de ponderación un valor representativo del coeficiente de escurrimiento. En este caso un C compuesto se puede definir como:

$$C_c = \frac{\sum C_i A_i}{\sum A_i} \quad (2)$$

Donde C_c es el coeficiente de escorrentía compuesto, C_i son los coeficientes de escorrentía de áreas homogéneas y A_i son áreas individuales con C homogéneo. Esta información se puede estimar mediante imágenes satelitales, cartografía de suelos y modelos digitales del terreno.

La intensidad media máxima, i , se determina a partir de curvas Intensidad-Duración-Recurrencia (IDR) construidas con datos medidos en el sitio en estudio. Con dichas curvas se adopta una duración de diseño igual al tiempo de concentración de la cuenca y para una recurrencia especificada se obtiene la intensidad media máxima.

El tiempo de concentración de una cuenca, T_c , se define como el tiempo que demora el sector más alejado de la cuenca en aportar a la sección de salida. El tiempo de concentración se calcula como la suma de los tiempos de escurrimiento mantiforme (no encauzado) y el tiempo de flujo canalizado (encauzado). Pueden existir varios recorridos posibles de flujo para las diferentes áreas drenadas, el mayor tiempo de concentración de todos los tiempos, para los diferentes recorridos, es el tiempo de concentración crítico a adoptar para el área drenada.

CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Las cuencas que fueron analizadas forman parte de la cuenca del arroyo Ludueña, el que cruza el casco urbano de la ciudad de Rosario por el sector norte. Se localizan al Noroeste del municipio, sector

afectado por los desbordes del arroyo y de sus afluentes, los canales Salvat e Ibarlucea.

El estudio se ha realizado en tres de las dieciocho subcuencas de la ciudad (Figura 1).

Para la selección de las mismas se tuvo en cuenta la conveniencia de analizar situaciones urbanas y periurbanas diversas, es decir, áreas no urbanizadas, áreas parcialmente urbanizadas y áreas altamente urbanizadas.

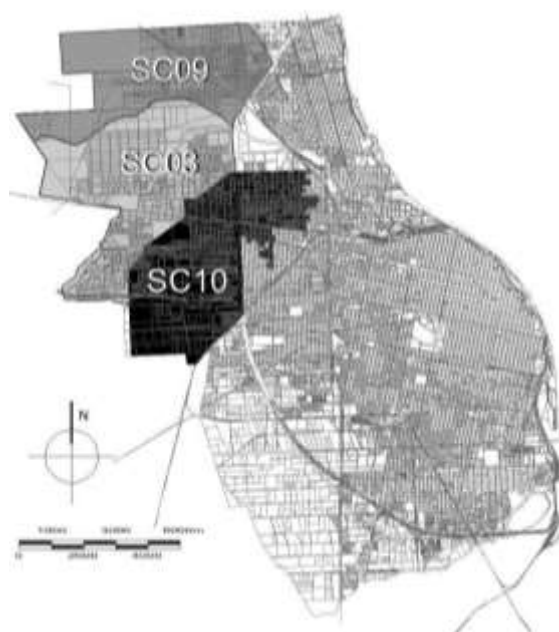


Figura 1. Subcuencas urbanas analizadas de la ciudad de Rosario.

La **Subcuenca 09** (SC09) está ubicada al Noroeste del territorio Municipal. Pertenecce casi en su totalidad al Distrito Norte y ocupa un área de 1641 ha. Presenta gran diversidad de usos de suelo y contiene una de las zonas no urbanizables de mayor superficie que aún se mantienen en el municipio, la cual representa alrededor del 40% del total de la subcuenca. Incluye sectores residenciales correspondientes a grupos medios, medios-bajos y bajos. Existen numerosos barrios construidos por el estado, otros están actualmente en construcción y si bien una gran parte de su superficie urbanizable no está todavía edificada, están planificados diversos proyectos de vivienda social que prevén tipologías residenciales colectivas y con uso privado del suelo. En el caso de éstas últimas, de acuerdo a las tendencias evidenciadas en la ciudad, la superficie verde prevista va edificándose progresivamente, por lo cual, a mediano plazo, presentan un alto grado de impermeabilización del

suelo a pesar de mantener una baja densidad poblacional. El estudio de la SC09 reviste especial interés debido a que están urbanizándose áreas inundables y sectores rurales que debieran preservarse para mantener la infraestructura verde urbana.

La **Subcuenca 03** (SC03) se localiza en el centro-Oeste de la ciudad y su borde Oeste coincide con parte del límite jurisdiccional del municipio, sobre el frente rural. Esta subcuenca es extensa, abarcando una superficie de 1952 ha, cerca del 45% de la superficie del Distrito Municipal Noroeste, al que pertenece. Presenta sectores altamente urbanizados, barrios periurbanos de baja densidad, zonas industriales y rurales. La diversidad de usos de suelo determina una densidad media de población baja. Esta subcuenca resulta de interés por la intensiva urbanización del suelo inundable mediante las modalidades de barrios abiertos y cerrados con tipologías residenciales de baja densidad, y porque se han producido inundaciones recientes en sectores urbanizados. Estas inundaciones fueron ocasionadas por la imposibilidad de evacuación de la infraestructura pluvial en el arroyo Ludueña debida a sus crecidas súbitas, influidas por las intensas lluvias y la impactante urbanización de su vaso de inundación.

La **Subcuenca 10** (SC10), se ubica en el centro-Oeste de la ciudad, al Sureste de la SC03. Tiene una superficie de 1905 ha y, a excepción del sector Sur, correspondiente al Distrito Oeste, pertenece en su totalidad al Distrito Noroeste. Integra áreas urbanizadas de diverso valor inmobiliario, áreas periurbanas y rurales. Presenta sectores forestados, hortícolas tradicionales y agrarios intensivos, además de grandes superficies vacantes. Reviste interés para la investigación ya que en ella se localizan zonas densamente urbanizadas que se han inundado recientemente que nunca antes habían sido alcanzadas por el agua y porque contiene una superficie rural significativa que constituye un componente relevante de la infraestructura verde de la ciudad. El sector Noroeste de la SC10 está siendo rápidamente ocupado por tejido residencial de baja densidad tras diversas operaciones inmobiliarias que otorgaron alto valor al suelo de este sector del vaso de inundación. Otro aspecto que debe mencionarse es que acaba de habilitarse un parque industrial de gran superficie en un área actualmente no urbanizada y con coberturas vegetales. Estos sectores debieran planificarse considerando preservar superficies permeables suficientes para evitar el agravamiento de los conflictos.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA CONVENCIONAL PARA LA OBTENCIÓN DE LOS COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA

Para la evaluación de los coeficientes de escorrentía, la literatura proporciona tablas. En este documento, se utilizaron las tablas propuestas por Chow et al. (1988) para áreas urbanas y Mc Cuen (1998) para áreas no urbanizables. Los coeficientes de escorrentía de la cuenca dependen del uso de la tierra, el tipo de suelo y la pendiente de la cuenca. El área de drenaje de la cuenca se determinó a partir de mapas topográficos y estudios de campo. Se consideraron tres tipos de suelo, que se identificaron previamente como tipos de suelo hidrológicos B, C y D (ver Chow et al., 1988). Los tipos de suelo hidrológicos considerados fueron el grupo B (loess poco profundo, limo arenoso, tasa mínima de infiltración 3.8-7.6 mm/h), grupo C (margas arcillosas, marga arenosa poco profunda, suelos con bajo contenido orgánico, suelos generalmente altos en arcilla, tasa mínima de infiltración: 1.3-3.8 mm/h) y grupo D (suelos que se hinchan significativamente cuando están húmedos, arcillas pesadas, ciertos suelos salinos, tasa mínima de infiltración: 0-1.3 mm/h). La pendiente se estimó en función de la información topográfica y solo se usó una clase ya que la pendiente promedio de la cuenca es de aproximadamente 1 m/km. El coeficiente de escorrentía compuesto (ecuación 2) para varias coberturas de tierra en el área de la cuenca fue calculado con información adicional usando imágenes satelitales (Google-Earth). Esta información fue verificada in situ por los recorridos en los distintos sectores de las cuencas estudiadas.

Resultados

La metodología convencional antes detallada fue aplicada en las tres cuencas urbanas seleccionadas para el estudio. A tal efecto se propusieron 31 categorías de usos de suelo según se muestra en la Figura 2. En la Figura 3, Figura 4 y Figura 5 se muestran con códigos de color las diferentes coberturas clasificadas para las tres cuencas de estudio (Piacentini et al., 2015, Zimmermann et al., 2016, Zimmermann y Bracalenti, 2015). Las condiciones de uso de la tierra; los datos de suelos identificados para las cuencas para definir los coeficientes de escorrentía y los valores utilizados se muestran en la Tabla 1.



Figura 2. Referencias para los usos de suelo en las figuras.



Figura 3. Usos del suelo estimados para la subcuencas 09.



Figura 4. Usos del suelo estimados para la subcuenca 03.

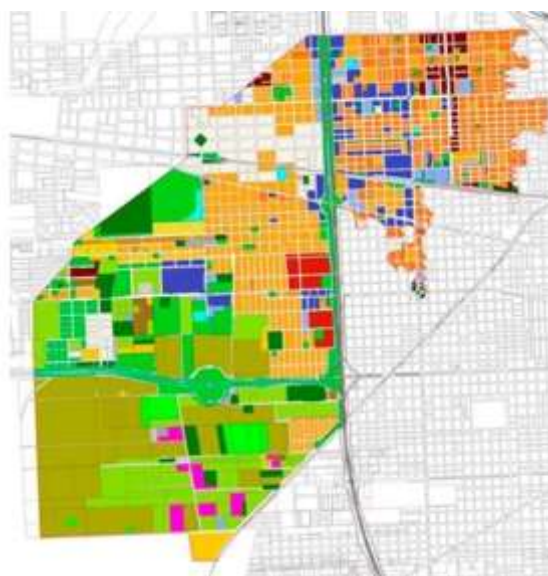


Figura 5. Usos del suelo estimados para la subcuenca 10

Tabla 1. Porcentajes de coberturas y coeficientes de escurrimientos medios para cada subcuenca estudiada

Coberturas	C	SC 09	SC 03	SC 10
		% Sup	% Sup	% Sup
Calles (aceras y calzadas) (*)				
Pavimentos en espacios públicos	0.90	3.36	5.90	16.91
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (< OCUPACION DE SUELO)	0.60	4.68	4.88	9.12
Vivienda unifamiliar, hasta 2 pisos (> OCUPACION DE SUELO)	0.65	0.16	0.09	6.95
Vivienda unifamiliar con centro de manzana forestado	0.57	0.20	16.98	5.63
Viviendas multi - unidades, hasta 4 pisos	0.70	1.05	0.43	0.02
Viviendas multi - unidades, mas de 4 pisos	0.75	-	0.01	0.00
Viviendas multi unidades con acera, centro de Mz. y terraza verde	0.48	-	-	1.50
Residencial o suburbano	0.40	0.79	1.89	0.60
Barrio cerrado	0.48	-	6.78	-
Area comercial y de negocios	0.60	-	-	0.52
Asentamientos irregulares incipiente	0.56	0.95	0.06	1.19
Asentamientos irregulares consolidados	0.70	1.19	0.93	1.52
Industrial poco densa	0.70	0.48	0.62	3.70
Industrial densa	0.80	0.42	0.78	21.09
Pasto/prado/césped suelo arcillo-limoso	0.30	11.26	19.71	4.23
Suelo desnudo compactado	0.63	6.96	12.14	13.10
Cultivo extensivo	0.21	30.19	-	1.31
Cultivo hortícola tradicional	0.20	-	0.28	-
Cultivo hortícola agroecológico	0.19	0.01	0.02	-
Forestal : bosques denso	0.13	-	0.81	0.11
Forestal : (más del 50% del terreno cubierto)	0.23	1.42	1.28	2.96
Forestal : (menos del 50% del terreno cubierto)	0.33	6.52	13.36	8.05
Escasa vegetación (no compactado por la actividad humana)	0.44	25.08	10.77	1.03
Ladrilleras	0.63	0.43	0.02	-
Ladrilleras con construcciones dispersas	0.74	2.23	0.41	0.13
Basurales	0.63	1.58	-	-
Cursos de agua, Cavas	1.00	0.44	1.63	0.32
Equipamiento deportivo sobre terreno forestado	0.30	0.60	0.20	-
Equipamiento urbano (> permeabilidad)	0.55	-	-	-
Equipamiento urbano (< permeabilidad)	0.60	-	-	-
Coeficiente de ecorrentía medio		0.40	0.49	0.51

METODOLOGÍA BASADA EN ÍNDICES DE CONSTRUCCIÓN

Las zonas urbanizadas se componen de una cantidad heterogénea de materiales y tipologías constructivas, que sin embargo presentan una respuesta capaz de ser unificada en contraste con áreas vegetadas o cuerpos de agua. El comportamiento de estas superficies en el rango de Rojo (R) Infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) permite su clara distinción utilizando índices normalizados: el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) resalta superficies vegetadas, mientras que el NDBI (Normalized Difference Building Index) y el UI (Urbanization Index) resaltan terrenos sobre los cuales hay construcciones. La gran capacidad de absorber energía de los cuerpos de agua genera que estas superficies se presenten siempre oscuras (valores de índice significativamente bajos). A su vez el grado de densidad de dichas construcciones presenta una correlación muy fuerte con los valores de índices de construcción (NDBI y UI), lo cual permite suponer a priori que también habrá un correlato entre dichos índices y el coeficiente de escorrentía C. Se propone analizar dichos índices analizando diferentes imágenes de la plataforma LANDSAT-8 OLI, cuya resolución espacial es suficiente (aunque no óptima) para la escala del presente trabajo, considerando que la campaña de inspección y relevamiento manual fue llevada a cabo durante el año 2016, y era requisito garantizar que el tejido urbano no ha sufrido modificaciones de gran magnitud entre la fecha de la inspección visual y la adquisición de la imagen, para que los resultados sean contrastables.

Los índices utilizados corresponden a las siguientes ecuaciones:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (3)$$

$$NDBI = \frac{SWIR1 - R}{SWIR1 + R} \quad (4)$$

$$UI = \frac{SWIR2 - R}{SWIR1 + R} \quad (5)$$

Donde SWIR1 corresponde a la banda entre longitudes de onda 1.566 y 1.651 μm , mientras que SWIR2 comprende la porción 2.107 a 2.294 μm . Los rangos de banda rojo y NIR son respectivamente 0.636 a 0.673 μm y 0.851 - 0.879 μm .

El procedimiento consistió en construir una relación biunívoca entre los índices normalizados de construcción y urbanización (NDBI y UI respectivamente) respecto del coeficiente de escorrentía asignado previamente mediante el procedimiento convencional. Se consideraron las áreas tipificadas en 31 clases conforme a lo previamente descrito, para luego extrapolar dicha relación al resto de la ciudad de Rosario, incluyendo las cuencas de estudio. Se analizaron 3 imágenes distintas entre 2014 y 2016, preseleccionadas bajo la condición que estuvieran libres de cobertura nubosa y no estuvieran alejadas del período de relevamiento *in situ*. Las fechas analizadas fueron 15 de Enero de 2014, 21 de Enero de 2016, y 13 de Agosto de 2015. Esta última corresponde a la época invernal, mientras que las primeras son de verano, para poder analizar también la incidencia estacional en las correlaciones.

A partir del trabajo simultáneo con el plano confeccionado con la metodología tradicional e imágenes de Google Earth, se identificaron parcelas homogéneas de extensión significativa para cada una de las clases (Figura 6).



Figura 6. Ejemplo de algunos de los polígonos utilizados para la regresión lineal coeficiente C, índice de construcción.

Se optó por reagrupar las 31 categorías originales de uso de suelo en 7 clases, ya que el nivel de resolución espacial moderada de la plataforma Landsat no admite tal nivel de detalle, cubriendo el píxel un área de 30 metros por 30 metros.

Los polígonos con cobertura homogénea obtenidos fueron superpuestos a la imagen satelital de los índices, y se extrajeron los valores representativos de cada cobertura: media aritmética, valores máximo y mínimo, considerando el 95% de los datos, ya que se consideró que los píxeles con valores extremos podrían presentar anomalías no representativas de la clase en análisis.

Cabe aclarar que previamente fueron enmascarados los píxeles de agua pura tal que no incidieran en desvíos dentro del análisis.

De la confrontación en un gráfico de ejes ortogonales entre los coeficientes de escorrentía de cada clase y su respectivo índice de urbanización medio se observó una fuerte correlación lineal positiva entre ambos (Figura 7).

Se realizaron ajustes en la selección de las áreas de interés a partir de la inspección visual de aquellas zonas que presentaban mayor divergencia respecto de la recta de ajuste entre ambas variables, comprobando que en todos los casos tal desvío era producto de errores en la selección original propuesta de los polígonos, al incluir píxeles que no pertenecían a la clase en cuestión y alteraban los estadísticos. Además, se incorporaron 2 clases más en correspondencia con las porciones de la trama urbana más densa dentro del microcentro y primer anillo perimetral de la ciudad ya que tal nivel de construcción no se encontraba representado en el trabajo de relevamiento antes mencionado.



Figura 7. Relación Coeficiente de escorrentía C, índice NDBI para la imagen del 15/01/2014. Valores máximo, mínimo y media aritmética representados para cada una de las 9 clases.

Una vez completados los ajustes de las regiones de interés, y habiendo alcanzado en todos los casos una ecuación de regresión lineal con coeficiente de determinación R^2 superior a 0.94 y desvíos de cada área de interés despreciables respecto de la recta de ajuste, se aplicó la ecuación de dicha recta a la imagen completa de la ciudad de Rosario y alrededores para estimar un mapa de coeficiente de escorrentía C desagregado arealmente.

La validación se realizó calculando los valores medios de cada una de las 3 subcuencas donde se había realizado el relevamiento original, respecto de la media estimada a partir de cada índice de urbanización.

El mismo procedimiento se aplicó para imágenes de índice NDVI, pero al presentar un ajuste de menor calidad fue descartado.

Resultados

Respecto de la metodología basada en índices de construcción, un primer punto sobresaliente es la fuerte correlación lineal que presentan los índices UI y NDBI con el coeficiente de escorrentía siendo éstas cercanas a la unidad, lo cual permitió suponer que el mapa desagregado de coeficiente C presentaría un nivel de precisión y ajuste a destacar.

Se observa en la Figura 8 que a medida que aumenta el grado de impermeabilización de la cobertura (C tiende a 1), la relación entre el coeficiente de escorrentía y el índice NDBI tiende a ser lineal. Es posible suponer que los desvíos en las áreas de coeficiente bajo respecto de dicha recta se deban a distorsiones introducidas por sectores de la superficie que no presenten cobertura vegetal frondosa.

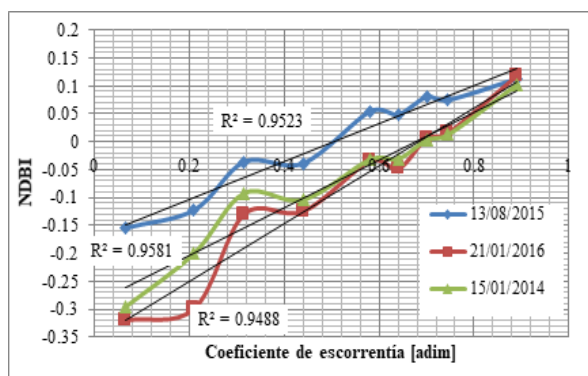


Figura 8. Recta correlación Coeficiente escorrentía, índice NDBI, para cada fecha analizada.

No obstante estos resultados fueron alcanzados luego de una serie de ajustes en las regiones homogéneas a partir del proceso iterativo de propuesta y revisión de las áreas cuyos valores medios presentaran una diferencia significativa respecto de la recta de regresión. Esto permite apreciar la sensibilidad del método a la correcta selección de tales áreas.

Cabe aclarar que el procedimiento se repitió para cada escena y se construyó una ley de correlación específica por fecha.

Asimismo la imagen de invierno precisó la identificación de nuevas áreas de interés en la zona rural, debido a que presentaba valores de índice muy

elevados producto de la alta reflectancia del suelo desnudo en la combinación de bandas consideradas.

Se realizaron estimaciones del coeficiente C a partir de la ecuación de la recta que lo relaciona con el índice NDBI para cada fecha.

La comparación final se realizó a partir del contraste entre el coeficiente de escorrentía medio asignado a cada subcuenca, respecto del estimado con la metodología antes descrita. En la Tabla 2 se presenta un resumen de los resultados por fecha y por índice de construcción.

Tabla 2. Coeficiente de escorrentía asignado por relevamiento y estimado con índices de construcción para cada fecha. (a) NDBI, (b) UI.

(a) NDBI.				
Subcca	In situ	15/01/14	13/08/15	21/01/16
3	0.49	0.45	0.51	0.45
9	0.4	0.44	0.63	0.42
10	0.52	0.50	0.63	0.47

(b) UI.				
Subcca	In situ	15/01/14	13/08/15	21/01/16
3	0.49	0.41	0.46	0.43
9	0.4	0.39	0.54	0.39
10	0.52	0.51	0.63	0.49

Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios, y las estimaciones realizadas con ambos índices de construcción se ajustan a los valores asignados a partir del relevamiento original. Esto pondera positivamente la metodología propuesta, aunque cabe realizar la salvedad de que las escenas de verano presentan mayor precisión, tal como era de esperar ya que la vegetación presente dentro de la trama urbana y en la zona periurbana es más frondosa y cubre mejor el suelo subyacente, el cual podría ser fuente de incertidumbre en las estimaciones.

Por otro lado no es posible concluir que uno de los índices de construcción tenga un comportamiento mejor que el otro. Puede observarse que la cuenca con mayor índice de vegetación NDVI (subcuenca 9) es aquella que presenta los desvíos más importantes en ambos casos. Esto permite proponer como línea de investigación futura la incorporación y combinación de información de cobertura vegetal con los índices de construcción.

Asimismo las gráficas de caja de la Figura 9 sintetizan algunas particularidades observadas para las distintas alternativas exploradas, siendo la recta horizontal la media asignada para cada subcuenca según lo observado en terreno.

En primer lugar se puede observar que no hay mayores diferencias entre las estimaciones con cada índice de construcción, aunque sí hay un mayor rango de valores de C entre el primer y tercer cuartil.

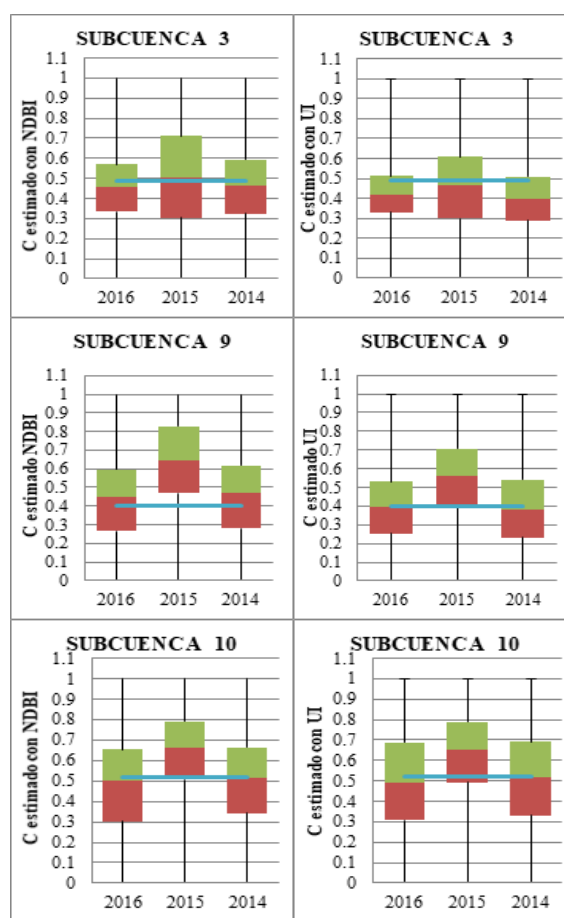


Figura 9. Gráficos de cajas diferenciados por subcuenca, para cada fecha analizada. La columna izquierda presenta los valores de C estimados con NDBI, y la de la derecha los que corresponden a UI.

Se destaca también la sobreestimación de la escena de invierno, especialmente para las subcuencas 9 y 10, que son precisamente aquellas que mejor ajuste presentan para las escenas de verano.

Se pretendió justificar estos fenómenos a partir de la identificación de mayores porciones de terreno vegetado, no obstante no se verificó esto en los valores medios de NDVI por zona, sino que los valores

observados en cada escena tienen divergencias despreciables entre subcuencas, aunque se puede apreciar que la 9 presenta mayor superficie con espacios verdes.

METODOLOGÍA BASADA EN LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE IMÁGENES SATELITALES

Con el objeto de encontrar una metodología que permita estimar de manera sistematizada valores de coeficientes de escorrentía de diferentes subcuencas, en este segundo caso se utilizó, dentro de las técnicas de teledetección, la clasificación supervisada de una imagen satelital para determinar distintos tipos de cobertura o usos de suelo presentes en la región en estudio que puedan correlacionarse con los mismos.

Partiendo de la base que cada material posee una determinada “firma espectral”, se puede asociar a cada pixel de una imagen satelital un determinado uso del suelo.

Con esta metodología se pudo clasificar la imagen en 7 tipos de cobertura a saber: suelo desnudo, cultivos, césped, hormigón, pavimento asfáltico y chapa. Cada tipología queda entonces identificada como una clase diferente. Luego, a cada uno de estos tipos de cobertura se le asignaron coeficientes de escorrentía asociados para determinar un C compuesto en cada subcuenca estudiada mediante la ecuación 2.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante la metodología basada en el índice de construcción, se decidió utilizar la imagen del 21 de Enero de 2016 tomada por el satélite LANDSAT 8, que fue con la que se obtuvieron mejores ajustes.

De todas las bandas disponibles en las imágenes de LANDSAT 8, se utilizaron para el procesamiento sólo 6, las tres del espectro visible (rojo, verde y azul) y otras tres del rango no visible (una del infrarrojo cercano y dos del infrarrojo medio).

Se realizó una clasificación supervisada de la imagen definiendo previamente áreas de entrenamiento o regiones de interés (ROIs) según los distintos tipos de cobertura. A partir de estas regiones se calcularon las estadísticas para clasificar a cada pixel de la imagen dentro de una categoría según su probabilidad de pertenecer a la misma. En este caso se utilizó el método

de la Máxima Verosimilitud, por haber comprobado previamente que se obtienen mejores resultados para este tipo de clasificaciones (Riccardi et al., 2018).

En la determinación de los sitios de entrenamiento se tuvo la precaución de buscar píxeles en “regiones puras” según el tipo de cobertura, de manera que no exista mucha dispersión en las firmas espectrales de cada tipo, ya que esto luego introduce errores en la clasificación de la imagen. Esta tarea no es dificultosa para los tipos de cobertura que se dan en la zona rural (suelo desnudo, cultivado, césped, etc.), pero en la zona más urbanizada esto se complejiza teniendo en cuenta que el tamaño de las construcciones en general es menor al tamaño del píxel.

Una vez determinadas las regiones de entrenamiento, se enmascaró la zona de islas y el río Paraná, quedando como resultado una imagen como la que se visualiza en la Figura 10. En la misma se representaron en color blanco todos los píxeles clasificados como superficie impermeable (hormigón, chapa y asfalto) y en marrón y distintos tonos de verde, los correspondientes a superficies permeables (suelo desnudo, césped, cultivos y arboleda respectivamente).

La metodología de clasificación supervisada fue validada en varios trabajos previos (Mendez Zacarías y Zimmermann, 2011; Mendez Zacarías y Zimmermann, 2014 y Riccardi et al., 2018).

Finalmente, se puede asociar cada uno de los tipos de suelo identificados en la clasificación supervisada a un coeficiente de escorrentía en función de sus características, para luego estimar valores medios de C de cada una de las cuencas en estudio. En la Tabla 3 se presentan los tipos de cobertura de suelo y el coeficiente C asignado a cada uno.

Tabla 3. Coeficiente de escorrentía para los distintos tipos de cobertura.

Cobertura suelo	C
césped	0.3
chapa	0.9
asfalto	0.9
hormigón	0.9
arboleda	0.23
cultivo	0.2
suelo desnudo	0.44

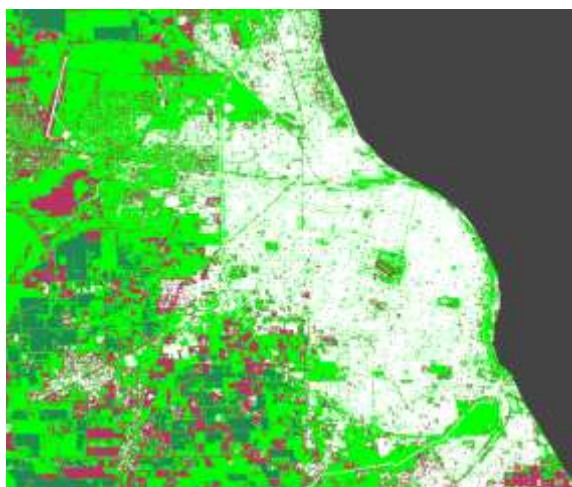


Figura 10. Clasificación supervisada imagen satelital.

Resultados

Respecto a la metodología desarrollada a partir de la clasificación supervisada, se determinaron valores medios de coeficientes de escorrentía para cada una de las cuencas en estudio a partir de la Ecuación 2.

En la Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en cada subcuenca.

Tabla 4. Coeficiente de escorrentía ponderado Subcuenca 03. Arroyo Ludueña.

Tipo de cobertura	C	Cant. Píxeles	Porc. Área	C Pond.
Césped	0.3	14533	67%	0.20
Chapa/Asfalto/H°	0.9	3186	15%	0.13
Arboleda	0.23	801	4%	0.01
Cultivo	0.2	69	<1%	<0.01
Suelo desnudo	0.44	3083	14 %	0.06
Total		21672	100%	0.41

Tabla 5. Coeficiente de escorrentía ponderado Subcuenca 09. Canal Ibarlucea.

Tipo de cobertura	C	Cant. Píxeles	Porc. Área	C Pond.
Césped	0.3	12230	64%	0.19
Chapa/Asfalto/H°	0.9	2147	11%	0.10
Arboleda	0.23	750	4%	0.01
Cultivo	0.2	1086	7%	0.01
Suelo desnudo	0.44	2887	15%	0.07
Total		19100	100%	0.38

Tabla 6. Coeficiente de escorrentía ponderado Subcuenca 10.

Tipo de cobertura	C	Cant. Píxeles	Porc. Área	C Pond.
Césped	0.3	19466	46%	0.14
Chapa/Asfalto/H°	0.9	15758	37%	0.34
Arboleda	0.23	1392	3%	0.01
Cultivo	0.2	1316	3%	0.01
Suelo desnudo	0.44	4442	11 %	0.05
Total		42374	100%	0.53

COMPARACIÓN ENTRE LAS METODOLOGÍAS

Finalmente se compararon los resultados obtenidos mediante las tres metodologías planteadas. Los mismos se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Comparación entre las distintas metodologías.

Cuenca	C Estimados			
	Conv.	NDBI	UI	Clasif. Sup.
SC 03	0.49	0.45	0.43	0.41
SC 09	0.40	0.42	0.39	0.38
SC 10	0.51	0.47	0.49	0.53

Se observa que la máxima diferencia respecto a la metodología convencional utilizada como referencia, es del orden del 16% y se da para la Subcuenca SC 03. Esta diferencia se observa en el caso de la clasificación supervisada. La subcuenca SC 03 presenta una tipología de vivienda característica de barrios abiertos, donde los espacios permeables e impermeables configuran un tejido más heterogéneo que en las otras subcuencas, por ello la determinación del tipo de cobertura es más dificultosa.

En el resto de los casos las diferencias se acotan en un rango entre el 3% y 12%, validando las metodologías presentadas.

Los métodos dan diferencias tanto por exceso como por defecto y ninguno presenta un sesgo en particular por diferencias positivas o negativas.

CONCLUSIONES

Quedan validadas ambas metodologías para la

estimación de valores de coeficiente de escorrentía a escala de subcuenca urbana, en zonas de baja pendiente, y con herramientas de teledetección combinadas con información de terreno. Las diferencias observadas son de poca implicancia, por lo que es posible asumir que mientras los usos de suelo en la zona de estudio no diverjan significativamente de los observados en este trabajo, es posible aplicar cualquiera de las metodologías propuestas.

Sin embargo, en casos donde la heterogeneidad de los usos de suelo sea creciente, la segunda metodología pierde sensibilidad y podría tender a evidenciar errores mayores.

El nivel de detalles en la cobertura y en consecuencia el coeficiente de escorrentía estimado, está vinculado a resolución espacial de los sensores utilizados.

Teniendo un conocimiento previo de la zona en estudio, las metodologías basadas en teledetección permiten la estimación de los coeficientes C mediante el auxilio de imágenes satelitales de mayor resolución como las disponibles en Google Earth, prescindiendo de las exhaustivas tareas de campo del método convencional.

Cabe destacar que la metodología convencional demanda un minucioso detalle del tejido urbano realizado artesanalmente, lo cual demanda un importante consumo de tiempo en gabinete y en campo. En este sentido las metodologías alternativas presentan una atractiva propuesta que agiliza la estimación.

REFERENCIAS

- Chow, V T., Maidment, D., Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw -Hill.
- McCuen R. H. (1998). *Hydrology: Analysis and Design*. Prentice-Hall. 2ed.
- Mendez Zacarías J. y Zimmermann E. (2011). Uso de Sistemas de Información Geográfica para parametrización de modelos de simulación hidrológica en llanuras. Congreso Nacional del Agua 2011. Resistencia. Chaco.
- Mendez Zacarías, J. y Zimmermann E. (2014). Calibración del modelo SHALL con elevado nivel de detalle en la cuenca del A° Ludueña utilizando SIG.

II Congreso Internacional de Hidrología de llanuras 2014. Santa Fe. Santa Fe.

- Piacentini, R., Feldman, S., Coronel, A., Feldman, N., Vega, M., Moskat, V., Bracalenti, L., Zimmermann, E., Lattuca, A., Biasatti, N., Dubbeling, M. (2015). Agricultura urbana y periurbana y forestación como posibilidad de mitigación y adaptación al cambio climático. Estudio de caso en la ciudad de Rosario y región, Argentina. *Cambio climático. Lecciones de y para ciudades de América Latina*. Sylvie Nail (ed.) Universidad Externado de Colombia. 327-368.
- Riccardi, G., Mendez Zacarías, J., Odicini, L., Ramaciotti, G., Gigante Rodríguez, F., Marrone, L. (2018) Modelación hidrológica e hidráulica en las cuencas de los Emisarios Pluviales 9 Y 10 del distrito Rosario (SF). XII Jornadas de Ciencia y Tecnología 2018. Secretaría de Ciencia y Técnica. Universidad Nacional de Rosario.
- Zimmermann, E. y Bracalenti, L. (2015). Reducción de riesgo de inundación urbana mediante incremento de áreas ocupadas por agricultura y forestación urbana y periurbana. El caso Rosario. Informe Proyecto: Field testing of the monitoring framework, establishing monitoring baseline, design of scenarios and policy uptake in cities. Phase 2:” Climate Development Knowledge Network (CDKN) RUAF Foundation; UN Habitat. 2012-2014.
- Zimmermann, E., Bracalenti, L., Piacentini, R. e Inostroza, L. (2016). Urban flood risk reduction by increasing green areas for adaptation to climate change. *Procedia Engineering and World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium*. Edit. Elsevier. (In press).

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO:

- Chiarito, E.; Zimmermann, E. y Méndez Zacarías, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. *Cuadernos del CURIHAM*. 24, 25-36. DOI: 10.35305/curiham.v24i0.126

Tipo de Publicación: ARTÍCULO.

Trabajo recibido el 17/09/2018 y aprobado para su publicación el 03/12/2018.

MEDICIONES DE CAUDAL LÍQUIDO Y SÓLIDO EN CUENCAS URBANAS DE ZONA SERRANA DE MISIONES

Tomás Rodríguez^(*) y Juan Sanchez

Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones. Oberá, Misiones, Argentina.

^(*)e-mail: tomas8448@hotmail.com

RESUMEN

La falta de datos confiables y precisos es uno de los principales obstáculos para la correcta aplicación de tecnologías apropiadas en los modernos sistemas de drenaje urbano. Particularmente, la provincia de Misiones presenta un marcado déficit de información hidroambiental de sus cursos de agua internos. Déficit que se hace más evidente, en la información discretizada en intervalos de tiempo subdiarios como los que son necesarios en la modelación de cuencas urbanas de cabecera. El presente trabajo presenta la aplicación de una serie de metodologías para registrar aforos de variables hidrosedimentológicas, en una cuenca urbana de la ciudad de Oberá, Misiones. Las mediciones realizadas se presentan como inéditas en la región misionera de estudio, caracterizada por una topografía serrana de altas pendientes, con suelos finos del tipo limo-arcillosos y clima subtropical húmedo donde se desarrollan precipitaciones intensas. Las mediciones alcanzadas representan rangos relativamente amplios de registros, los que cubren un significativo espectro de valores. De los 10 eventos registrados, la precipitación total varió entre 31 y 160 mm, los caudales líquidos máximos entre 7 y 69 m³/s y las máximas concentraciones de sólidos entre 369 y 1602 PPM. Los aforos registrados han sido utilizados en una etapa posterior en la calibración de modelos hidrológico-hidráulicos, acoplados a modelos de producción de sedimentos por erosión hídrica ante eventos lluviosos en cuencas urbanas de la región serrana de Misiones.

Palabras clave: Mediciones; caudal líquido; caudal sólido; cuencas urbanas; zona serrana; Misiones.

ABSTRACT

The lack of reliable and accurate data is one of the main obstacles to the correct application of appropriate technologies in modern urban drainage systems. In particular, the province of Misiones presents a marked deficit of hydro-environmental information of its internal water courses. Deficit that becomes more evident, in discretized information in subdaily time intervals such as those that are necessary in the modeling of urban headwaters basin. This work presents the application of a series of methodologies to register indicators of hydrosedimentological variables, in an urban basin of the city of Oberá, Misiones. The measurements are presented as unprecedented in the mountain region of Misiones, characterized by mountain topography of steep slopes, with fine soils of silt-clayey type and humid subtropical climate where intense precipitations develop. The measurements reached represent relatively wide ranges of records, which cover a significant range of values. With a total of 10 registered events, the total precipitation varied between 3 and 160 mm, the maximum flow rates between 7 and 69 m³/s and the maximum solids concentrations between 369 and 1602 PPM. The registered have been used at a later stage in the calibration of hydrological-hydraulic models, coupled to sediment production models by water erosion in rainfall events in urban basins of the mountain region of Misiones.

Keywords: Measurements; liquid flow; solid flow; urban basins; mountain area; Misiones

INTRODUCCION

En ambientes urbanos, durante largo tiempo, la solución del control de los excedentes hídricos superficiales se ha encarado a través de la ejecución de obras de drenaje, para remover el agua pluvial del área urbana de la forma más eficiente posible. La experiencia indica que las soluciones más convenientes se alcanzan a partir de una compresión más integrada de los procesos asociados al escurrimiento de los excedentes hídricos.

A partir de la década del '70, en los países desarrollados se fue extendiendo el concepto del manejo del agua pluvial urbana, como la percepción de un conjunto planificado de medidas estructurales y no estructurales destinadas a administrar el agua pluvial de una manera integral, racional y sustentable. Bajo este concepto, el drenaje es concebido como un subconjunto del manejo e interrelacionado con otros propósitos, tales como la regulación de crecidas, el mejoramiento de la calidad de agua pluvial, el control de la erosión, la creación o conservación de espacios abiertos para recreación y otros usos.

Sin embargo, los problemas concretos de cada sitio requieren soluciones específicas. Las tecnologías modernas de los países desarrollados no pueden ser copiadas simplemente, ya que no funcionan correctamente al ser implementadas en zonas para las que no fueron diseñadas.

A su vez, para la aplicación de adecuadas técnicas y tecnologías disponibles para la gestión del agua de lluvia, es necesaria la descripción de los procesos hidrológicos y sedimentológicos involucrados en la generación y transporte del escurrimiento superficial, variables tales como niveles, velocidades, caudales y concentración de sólidos en cada elemento del sistema de desagüe pluvial.

Para el diagnóstico de la situación del sistema existente, la implementación de modelos avanzados (lluvia-escorrentía) y la evaluación del efecto sobre las superficies y cuerpos de agua receptores locales, tienen que ser recogidos datos específicos y los modelos deben ser adaptados.

Se ha señalado muchas veces (Dunne, 1986; Maksimović, 1992) que la falta de datos confiables y precisos es uno de los principales obstáculos para la correcta aplicación de tecnologías apropiadas en los modernos sistemas de drenaje urbano.

Particularmente, la descripción de la generación, traslado y disposición de sólidos en ambientes urbanos presenta un alto grado de complejidad dada la gran cantidad de fuentes y materiales susceptibles de ser incorporados a la corriente hídrica. Además de los suelos erosionados por flujo mantiforme en las áreas permeables y el flujo concentrado en los cursos de agua, se suman los sedimentos generados por las actividades humanas, depositados en superficies impermeables como calles, veredas, techos y solados de edificios.

En zonas como la de estudio, además de las afectaciones negativas sobre el medioambiente por procesos de erosión, los suelos finos son susceptibles a la absorción, traslado y acumulación de contaminantes, pudiendo provocar impactos negativos crónicos en los cuerpos de agua receptores del desagüe pluvial y el ambiente en general.

Si bien se han encontrado estudios científicos sobre el comportamiento de las cuencas hidrológicas en Misiones, las mediciones hidroambientales de las mismas se presentan como deficientes para la concreción de estudios científicos de relevancia. Dicha escasez de datos se ve incrementada en lo referente a las cuencas urbanas de cabecera en la región serrana de la provincia.

El presente trabajo presenta la aplicación de una serie de metodologías para registrar aforos de variables hidrosedimentológicas, en una cuenca urbana de la ciudad de Oberá, Misiones (Figura 1). En particular se recabaron registros de precipitaciones, caudales líquidos y sólidos. Las mediciones realizadas se presentan como inéditas en la región misionera de estudio, caracterizada por una topografía serrana de altas pendientes, con suelos finos del tipo limo-arcillosos y clima subtropical húmedo donde se desarrollan precipitaciones intensas.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo es presentar los resultados obtenidos en la aplicación de metodologías de medición de variables hidrosedimentológicas en la cuenca rural-urbana del arroyo Mbotaby (Oberá, Misiones). Los aforos registrados han sido utilizados en una etapa posterior en la calibración de modelos hidrológico-hidráulicos, acoplados a modelos de producción de sedimentos por erosión hídrica ante eventos lluviosos en cuencas urbanas

de la región serrana de Misiones. En particular, los aforos se utilizaron para la simulación de la transformación lluvia-caudal y de los procesos de erosión hídrica superficial en modelos implementados en el entorno del SWMM 5.0ve (GMMF, 2005), a través de una constitución con un alto nivel de detalle (Rodríguez, 2018).

CUENCA PILOTO

La cuenca en estudio, donde se implementaron las mediciones, es la cuenca del Arroyo Mbotaby (arroyo de tábanos, en dialecto guaraní). El brazo principal de dicho arroyo nace al Este de la ciudad

de Oberá, en la divisoria de aguas de las cuencas de los ríos Paraná y Uruguay (Figura 2). La cuenca Mbotaby recoge 40 % de los excedentes hídricos superficiales del casco urbano de la ciudad de Oberá, y si bien posee una impermeabilidad total estimada de 23.9% (Rodríguez, 2018), la misma se presenta como unas de las cuencas más densamente pobladas en la región Serrana de Misiones.

El ambiente de modelación, producto de las tareas de relevamiento y análisis de datos disponibles hasta el año 2013, resultó de una extensión superficial de 976.7 ha, correspondiendo un 10.9 % a áreas impermeables directamente conectadas, 13.0 % a áreas impermeables no conectadas y 76.1 % a áreas permeables.

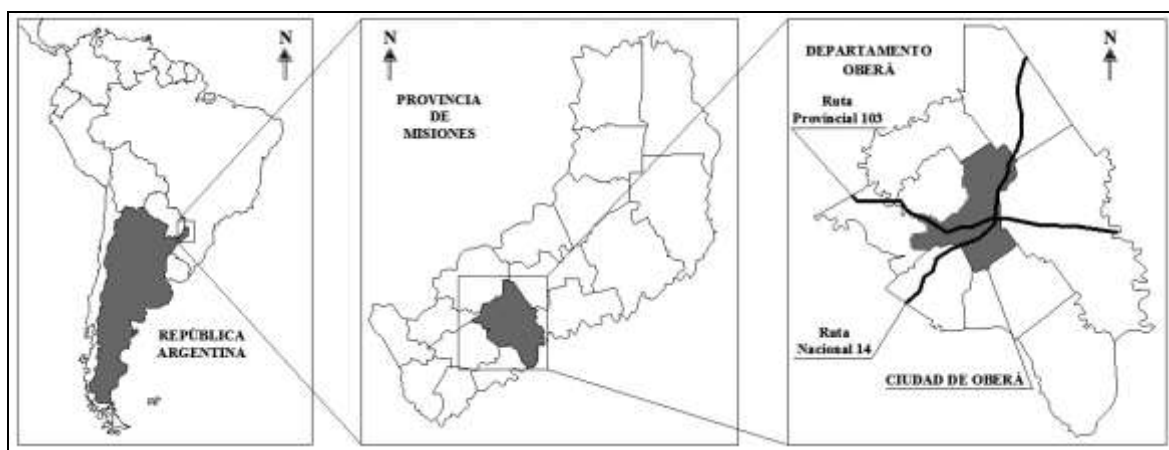


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Oberá, Misiones, Argentina.



Figura 2. Cuenca del arroyo Mbotaby (Adaptado de Google Earth, 2017).

La cuenca presenta en un 94.5 % suelos del Complejo 9 (Tierra Colorada) caracterizada por un limo-arcilloso de coloración rojiza; mientras que el 5.5 % restante de la superficie está cubierta por suelos del Complejo 6 (Suelos Pedregosos) compuestos por el basalto en descomposición (CARTA, 1964).

La región ha sido caracterizada como subtopical sin estación seca (Olinuk, 1998), con una distribución de precipitaciones a lo largo de todo el año y un módulo pluviométrico de 1925 mm (INTA Cerro Azul, 2013). Particularmente, según un informe del Servicio Meteorológico Nacional, la ciudad de Oberá fue la ciudad con mayores precipitaciones durante el 2017, con 2709 mm precipitados (SMN, 2018). Posee además, la distinción de estar sujeta a tormentas de gran intensidad, con importantes volúmenes precipitados en corto tiempo (Olinuk, 1998).

Respecto a las demás caracterizaciones hidrogeológicas referidas por Rodríguez (2018), la totalidad de la cuenca presenta una región natural de “Meseta Central Preservada” y un potencial de erosión “Moderadamente Alto”.

METODOLOGÍAS DE MEDICIÓN

Registro de hietogramas y limnigramas

Los datos de precipitación fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en la Facultad de

Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM) (27°29'06"S; 55°06'38"O), situada en el campus universitario dentro del casco céntrico de la ciudad, cercana al baricentro de la cuenca en estudio.

Se trata de una estación digital con sensoriamiento remoto y almacenamiento automático de la información, lo que permite una discretización de las variables en el tiempo, tanto de las tormentas como de las demás variables meteorológicas registradas.

El registro de las precipitaciones se realiza mediante un pluviómetro digital a cangilones con 0.2 mm de precisión y con la posibilidad de discretizar los pulsos de lluvia cada 1 minuto.

Para la determinación del caudal erogado registrado se utilizó el limnigrama observado y la curva $Q(h)$ definida para el punto de control de la cuenca (Figuras 3.a y 3.b).

Los limnigramas comparados fueron obtenidos por observación directa de las reglas limnimétricas instalada en el punto de control de la cuenca.

Obtención indirecta de hidrogramas

La determinación de los caudales salientes y por ende de los volúmenes netos escurridos por la sección de control o de cierre de la cuenca se realizó en forma indirecta a partir de los limnigramas observados y la definición previa de una relación caudal-tirante.



Figura 3. a) Sección de control utilizada para la calibración; b) Regla limnimétrica instalada para el registro de niveles.

Producto de campañas de batimetría con relevamientos extendidos de la sección de control, en conjunto con mediciones de velocidades superficiales, se logró establecer la curva que relaciona los distintos tirantes en el punto de control con los caudales asociados, obteniéndose así la curva $Q(h)$ que permitió inferir los volúmenes totales erogados para cada tormenta registrada y compararlos con los determinados por el modelo.

Los pasos seguidos para determinar la $Q(h)$ fue:

1. Mediante la utilización de flotadores se registró el tiempo necesario para que los mismos recorran una distancia fija de 7.15m, para distintos niveles de agua en el arroyo.
2. La velocidad superficial fue estimada a partir de la relación $\Delta l/\Delta t$ considerando una distancia recorrida por el flotador de 7.15 m. Los flotadores fueron arrojados de manera tal que su recorrido coincidiera con el *thalweg* (trayectoria a lo largo del cauce que une los puntos de mayor profundidad), por lo que la velocidad determinada corresponde a la máxima velocidad superficial V_{max}^s .
3. La velocidad media integrada en una vertical V_m se estimó a partir de la relación $V_m = 0.857 \times V_{max}^s$ (Basile et al., 2011).
4. El caudal inferido resulto de la multiplicación de V_m por el área mojada en el cauce, establecida mediante el relevamiento planialtimétrico para cada nivel de agua registrado.
5. Finalmente la curva $Q(h)$ fue ajustada a los caudales registrados, mediante una ecuación potencial (Ecuación 1), la cual resulto con una R^2 de 0.99.

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = 6.4001h[m]^{2.3499} \quad (1)$$

Debido a las condiciones de riesgo que presenta el punto de control con el arroyo desbordado, no fue posible realizar mediciones de velocidades en todo el dominio de niveles registrados. El nivel máximo registrado en la totalidad de los eventos es de 2.75 m, mientras que el nivel máximo en el que se pudo realizar mediciones de velocidad certeras es de 2.10 m, recordando que el nivel de desborde del curso en el punto de control es de 1.80 m. La Figura 4 presenta el perfil transversal de la sección de control y los niveles citados anteriormente.

En la Tabla 1 se observan los resultados de las campañas de mediciones superficiales de velocidad y batimetría, mientras que en la Figura 5 se presenta el plot de los caudales inferidos y la curva $Q(h)$ obtenida.

Cabe destacar que las campañas anteriormente descriptas permitieron además calibrar las rugosidades del cauce y el valle de inundación del arroyo donde se ubica la sección de control, los cuales fueron adoptados para todos los otros cursos naturales de agua.

Determinación de sólidos en suspensión

Además de efectuar el aforo de precipitaciones y niveles durante los eventos lluviosos, se realizó la toma de muestras de agua, lo cual permitió determinar la variación del TSD en el seno de la corriente hídrica de descarga de la cuenca a lo largo del desarrollo de las tormentas (Figura 6.a).

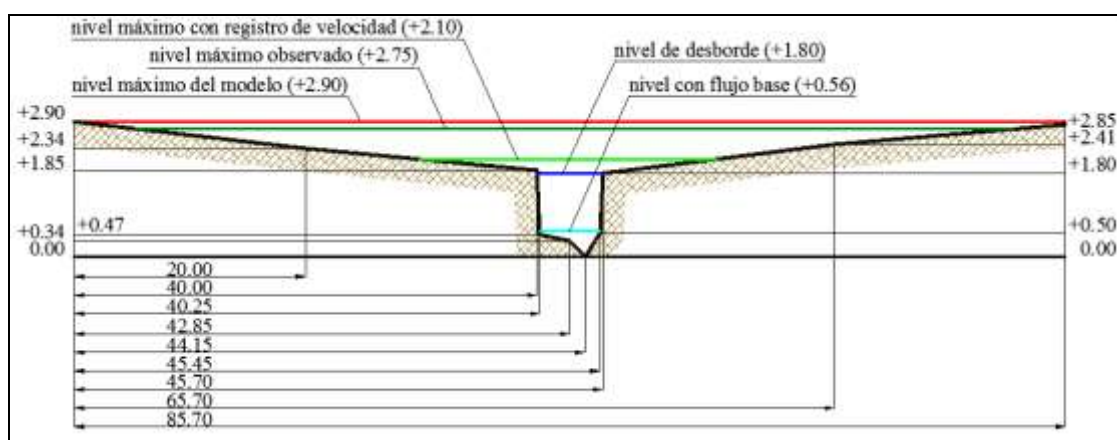


Figura 4. Perfil transversal de la sección de control y niveles máximos con registro.

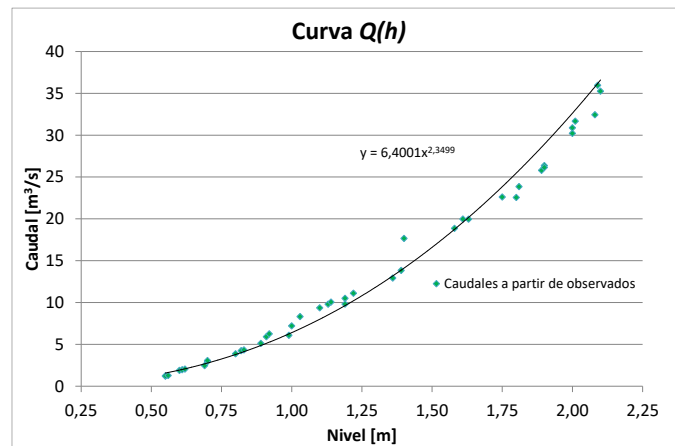


Figura 5. Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.

Tabla 1. Curva de relación altura-caudal en la salida de la cuenca.

Observaciones	nivel	sección	tiempo	velocidad superficial	velocidad media	caudal	curva Q (h)
	[m]	[m²]	[s]	[m/s]	[m/s]	[m³/s]	[m³/s]
cauce sin desbordar	0.55	1.26	6.39	1.12	0.96	1.21	1.57
	0.55	1.26	6.35	1.13	0.97	1.22	1.57
	0.56	1.31	6.32	1.13	0.97	1.27	1.64
	0.60	1.52	4.95	1.44	1.24	1.89	1.93
	0.61	1.58	4.91	1.46	1.25	1.97	2.00
	0.62	1.63	4.87	1.47	1.26	2.05	2.08
	0.69	1.94	4.86	1.47	1.26	2.45	2.68
	0.70	2.05	4.28	1.67	1.43	2.94	2.77
	0.70	2.05	4.10	1.75	1.50	3.07	2.77
	0.80	2.58	4.09	1.75	1.50	3.87	3.79
	0.82	2.63	3.81	1.88	1.61	4.24	4.01
	0.83	2.69	3.80	1.88	1.61	4.33	4.13
	0.89	3.01	3.60	1.99	1.70	5.12	4.87
	0.91	3.17	3.29	2.18	1.87	5.91	5.13
	0.92	3.22	3.16	2.26	1.94	6.25	5.26
	0.99	3.54	3.57	2.00	1.71	6.08	6.25
	1.00	3.65	3.11	2.30	1.97	7.20	6.40
	1.03	3.81	2.81	2.55	2.18	8.32	6.86
	1.10	4.19	2.75	2.60	2.23	9.36	8.01
	1.13	4.30	2.69	2.66	2.28	9.79	8.53
	1.14	4.35	2.66	2.69	2.31	10.05	8.71
	1.19	4.63	2.70	2.65	2.27	10.50	9.63
	1.19	4.63	2.89	2.47	2.12	9.81	9.63
	1.22	4.85	2.67	2.67	2.29	11.11	10.21
	1.36	5.62	2.66	2.68	2.30	12.92	13.18
	1.39	5.73	2.54	2.82	2.41	13.83	13.88
	1.40	5.84	2.16	3.53	3.03	17.66	14.11
	1.58	6.84	2.22	3.22	2.76	18.86	18.75
	1.61	7.01	2.15	3.32	2.85	19.97	19.60
	1.63	7.07	2.17	3.30	2.83	19.96	20.17
	1.75	7.80	2.12	3.38	2.90	22.60	23.84
cauce desbordado	1.80	8.08	2.20	3.26	2.79	22.56	25.47
	1.81	8.16	2.10	3.41	2.92	23.85	25.81
	1.89	8.71	2.07	3.45	2.96	25.79	28.57
	1.90	8.87	2.06	3.47	2.97	26.37	28.92
	1.90	8.87	2.08	3.44	2.95	26.14	28.92
	2.00	10.34	2.10	3.41	2.92	30.21	32.63
	2.00	10.34	2.05	3.48	2.99	30.87	32.63
	2.01	10.56	2.04	3.50	3.00	31.67	33.01
	2.08	12.10	2.29	3.13	2.68	32.44	35.78
	2.09	12.32	2.10	3.40	2.92	35.95	36.18
	2.10	12.54	2.18	3.28	2.81	35.25	36.59

Los registros de niveles y tomas de muestra se realizaron inicialmente con intervalos de 1 hora, y una vez finalizo el escurrimiento por exceso de precipitación, cada 12 hs aproximadamente. Esto metodología se utilizó debido a dos factores: (i) dada la imposibilidad de acceder al punto de control de la cuenca durante la noche; (ii) debido a que una vez restituido el flujo base en el arroyo, el mismo evidenciaba un alto contenido de TSD.

Para realizar el análisis de las muestras de agua se recurrió a una metodología ampliamente utilizada por el Laboratorio de Hidráulica y el CURIHAM de la FCEIyA-UNR. La misma consta en determinar la cantidad de TSD mediante el secado en horno de las muestras de agua, según el procediendo detallado a continuación:

1. Por cada muestra de agua se debe pesar, en un balanza de precisión, tres recipientes resistentes al calor, limpios y numerados, de aproximadamente 300 ml de capacidad.
2. De las muestras de agua originales, las cuales poseen un volumen aproximado de 1 litro, se separan tres submuestras de aproximadamente 150 ml, en los recipientes citados anteriormente.

3. Se pesan las submuestras obteniendo el valor corresponde a la suma de peso del recipiente, el agua propiamente dicha y el total de material solido (Figura 6.b).

4. Se produce el secado de la muestra en horno a 180 °C, durante 24 h.

5. Una vez enfriada la muestra se la pesa obteniendo el peso del recipiente más el total de sólidos (Figura 6.c).

6. El TSD de cada submuestra se determina en función a la Ecuación 2 según:

$$TSD = \frac{Ps - Pr}{P_{total} - Pr} \cdot 1.000.000 [ppm] \quad (2)$$

Donde: Pr: peso del recipiente seco; Ps: peso del recipiente más sólidos secos; Ptotal: peso del recipiente más la muestra total (agua y sólidos).

7. Finalmente es necesario realizar un análisis estadístico de manera de descartar aquellas submuestras que posean valores atípicos. El TSD de la muestra resultara del promedio de los valores de sus respectivas submuestras. En la Tabla 2 se presenta un ejemplo de cálculo del TSD para una muestra de agua.



Figura 6.a) Muestras de agua recogidas durante la tormenta del 19-nov-2013; b) Submuestra de agua en balanza de precisión; c) Submuestra ya secada.

Tabla 2. Ejemplo de cálculo TSD. Muestra N°1 del 19-nov-2013.

Muestra	Submuestra	Pr	Ptotal	Ps	Ptotal-Pr	Ps-Pr	Concentración	
		[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[gr]	[ppm o mg/l]	
1	"1-1"	43.8121	184.0741	43.8427	140.2620	0.0306	218	185
	"1-2"	41.0512	190.4354	41.0772	149.3842	0.0260	174	
	"1-3"	39.9740	185.8181	39.9976	145.8441	0.0236	162	

RESULTADOS

En la campaña de mediciones se alcanzaron los registros de un total de 10 eventos pluviográficos, los cuales se detallan en la Tabla 3.

Los registros utilizados en esta instancia, poseen las siguientes características:

- Los limnigramas comparados fueron obtenidos con lecturas cada 1 hora.
- Los hietogramas registrados presentan intervalos de tiempo de 5 minutos.
- Todos los eventos poseen registro de las ramas ascendentes y descendentes de los limnigramas.
- Los eventos fueron caracterizados con distintas humedades antecedentes según la metodología propuesta por Chow et al. (1994).
- En todos los eventos se realizaron tomas de muestra de agua para evaluar TSD asociado a cada registro de nivel de agua.

En las Figuras 7 a 16 se exhiben los hietogramas y curvas masa registrados para cada evento, como así también los polutogramas de TSD y los caudales inferidos a través de los limnigramas registrados.

Seguidamente, en la Tabla 4 se exhibe un resumen de los parámetros registrados, como así también los

caudales máximos y volúmenes de escurrimiento líquido y sólido inferidos a través de los registros.

Realizando un breve análisis de los resultados, en la Tabla 5 se presentan los valores mínimo, medio y máximo de los parámetros registrados y aquellos inferidos. En la misma puede observarse rangos relativamente amplios de registros, los que cubren un significativo espectro de valores.

Por otro lado, a partir de los valores presentados en la Tabla 4 fue posible construir una relación gráfica entre la producción total de sedimentos por evento observada y la precipitación en exceso. En las Figuras 17 y 18 se exhiben, en el eje "x" la precipitación en exceso o escorrentía en milímetros registrada en los 10 eventos con registros de TSD, mientras que en el eje "y", se presenta el total de sedimentos erogado por la cuenca resultante de la integración de los polutogramas registrados e hidrogramas inferidos a través de los limnigramas registrados.

La Figura 17 presenta el ploteo y la tendencia de la relación para eventos de 5 a 44 mm de lluvia neta, la cual exhibe una buena densidad de puntos. Mientras que la Figura 18 incorpora el evento extraordinario del 1-ene-2015 con 126 mm de precipitación en exceso.

Tabla 3. Características de las tormentas con registros.

Evento N°	Fecha	Humedad antecedente	Precipitación total	Duración	Intensidad media	Intensidad máxima en 5 min
	[dd-mm-aa]		[mm]		[mm/h]	[mm/h]
1	19-nov-13	II (media)	44.4	6	7.4	43.2
2	11-ene-14	II (media)	31.6	7	4.5	24
3	20-feb-14	II (media)	77.4	11	7	48
4	09-abr-14	I (seco)	41.4	9	4.6	28.8
5	04-may-14	II (media)	38.6	10	3.9	38.4
6	19-jul-14	II (media)	58.0	12	4.8	40.8
7	06-oct-14	II (media)	53.8	14	3.8	33.6
8	31-oct-14	III (húmedo)	41.8	11	3.8	33.6
9	30-nov-14	I (seco)	127.0	23	5.5	69.6
10	01-ene-15	III (húmedo)	160.0	12	13.3	86.4

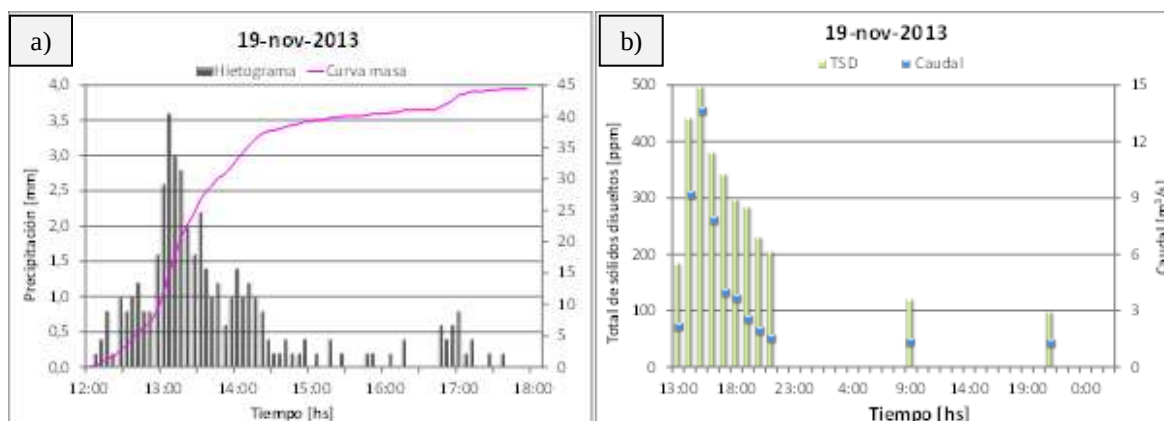


Figura 7. Registros 19-nov-2013. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

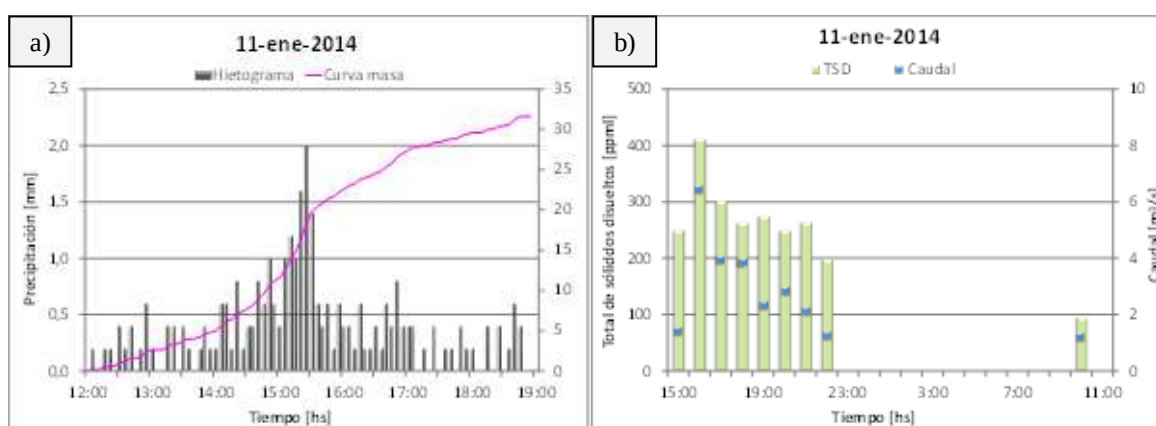


Figura 8. Registros 11-ene-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

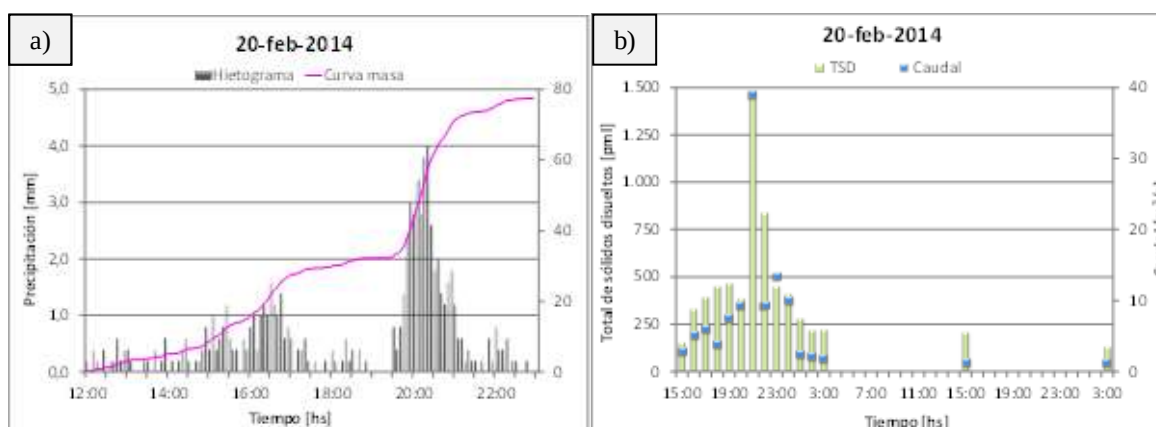


Figura 9. Registros 20-feb-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

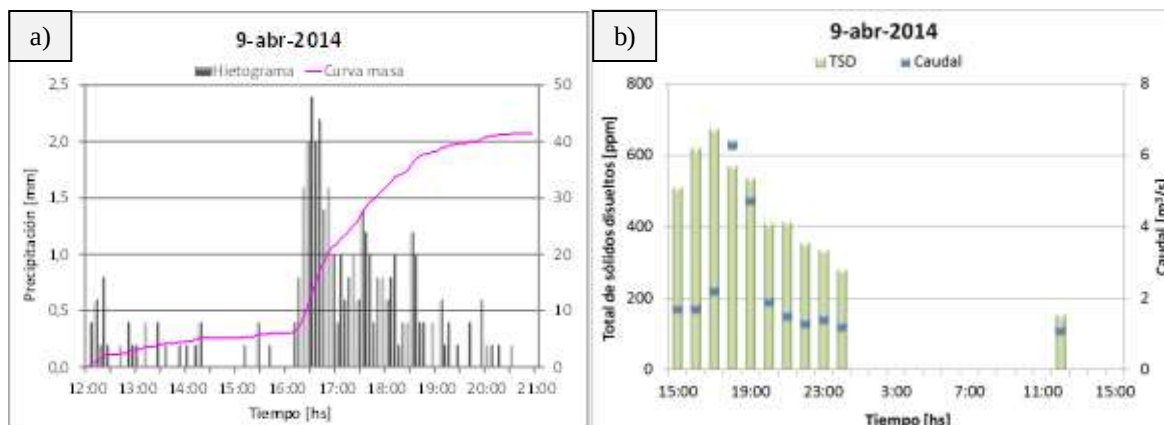


Figura 10. Registros 9-abr-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

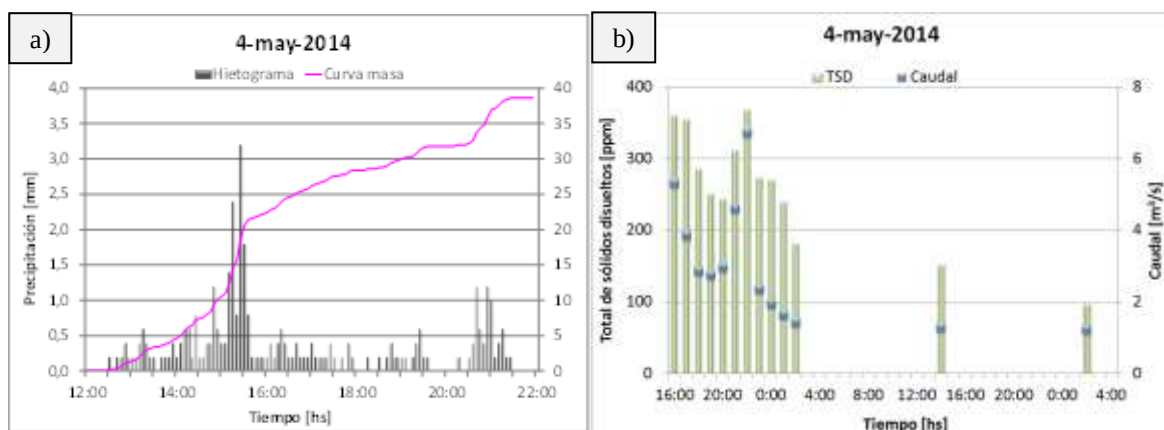


Figura 11. Registros 4-may-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

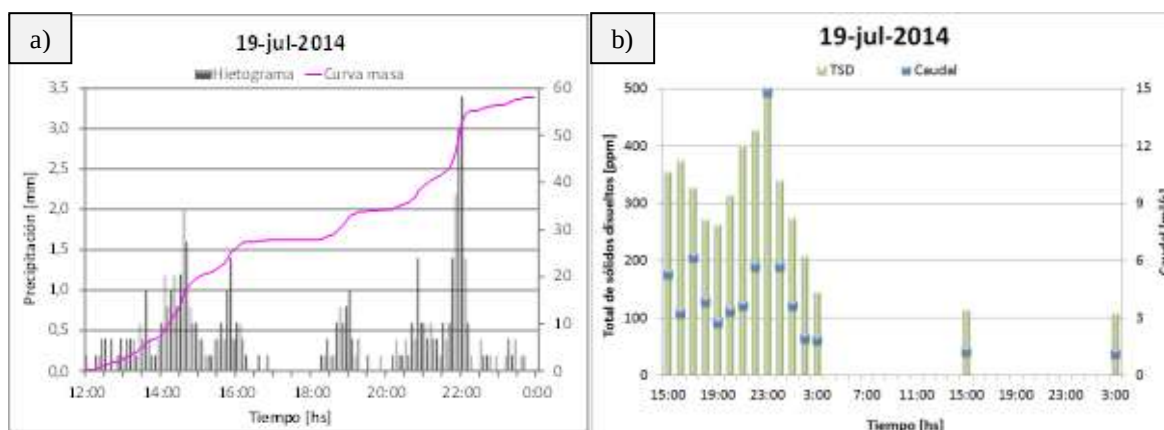


Figura 12. Registros 19-jul-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

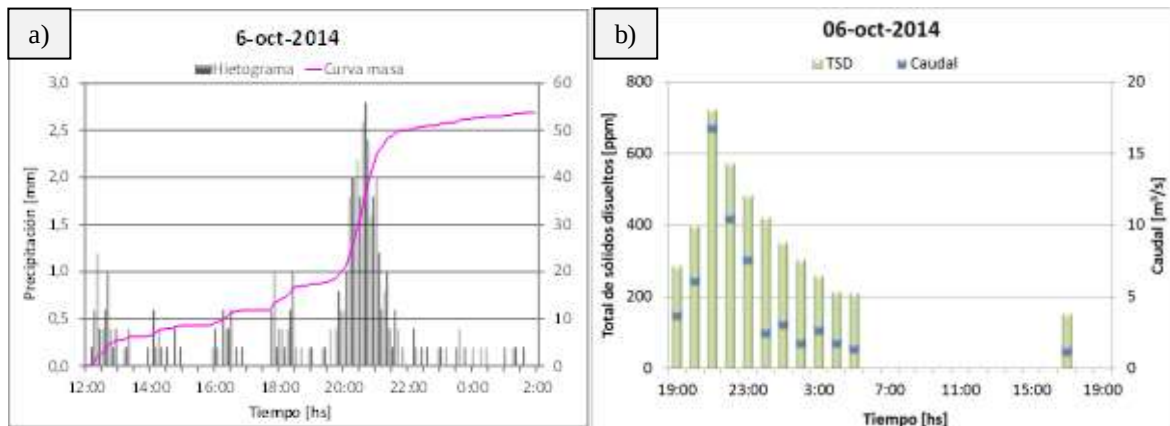


Figura 13. Registros 6-oct-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

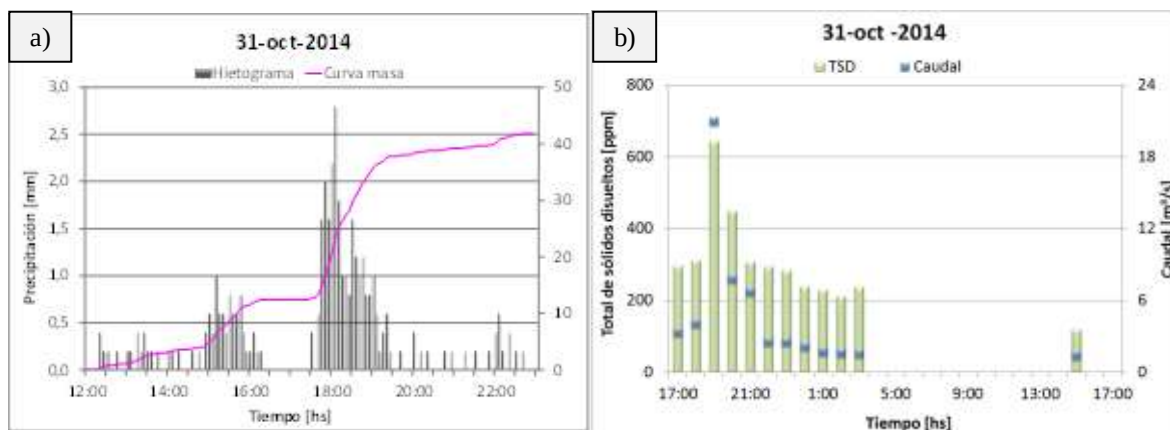


Figura 14. Registros 31-oct-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

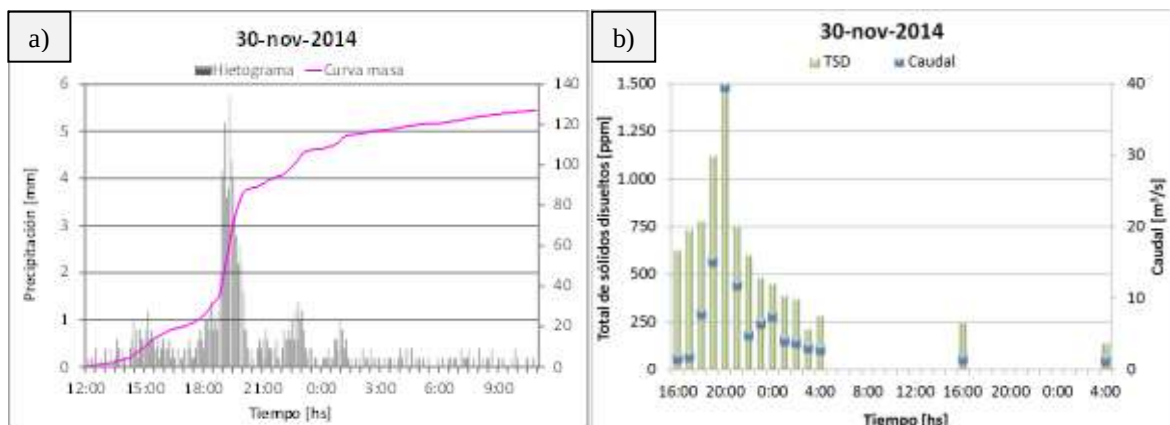


Figura 15. Registros 30-nov-2014. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

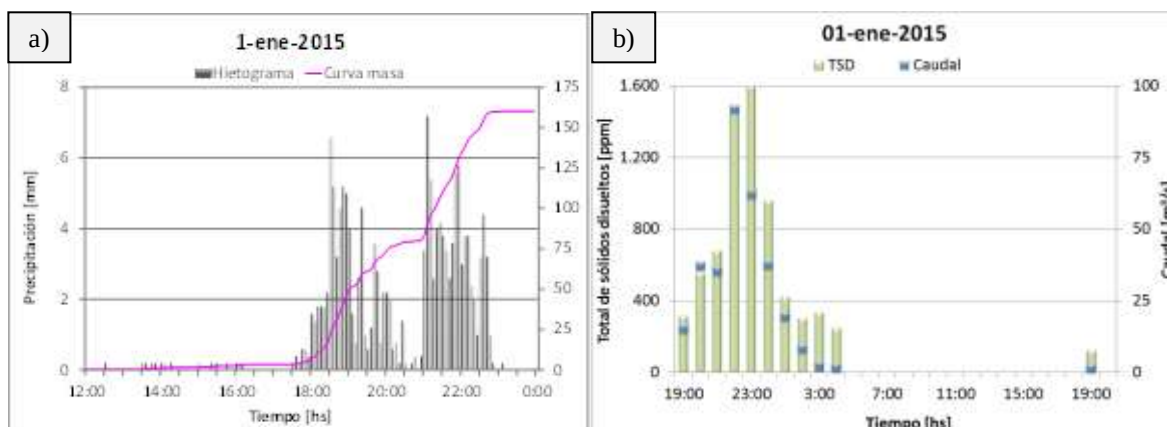


Figura 16. Registros 1-ene-2015. a) Hietograma y curva masa; b) TSD y caudales.

Tabla 4. Resumen de las mediciones realizadas.

Evento	[-]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lluvia total	[mm]	44.4	31.6	77.4	41.4	38.6	58	53.8	41.8	127	160
Lluvia neta	[mm]	13.6	5.2	38.0	4.6	8.5	17.5	17.6	17.2	37.2	107.5
Duración	[hs]	6	7	11	9	10	12	14	11	23	12
Humedad previa	[-]	II	II	II	I	II	II	II	III	I	III
Nivel máximo	[m]	1.44	1.03	2.26	1.02	1.05	1.50	1.60	1.81	2.27	2.75
Caudal máximo	[m³/s]	15.1	6.9	43.5	6.7	7.2	16.6	19.3	25.8	43.9	69.0
Volumen líquido	[m³]	132635	51031	371055	45018	83165	170478	172212	167656	363353	1049644
Concentración máxima	[PPM]	498	412	1475	675	369	496	723	645	1453	1602
Producción total de sedimentos	[T]	89	37	386	52	64	107	132	114	426	1129

Tabla 5. Rango de los parámetros registrados.

Parámetro		Mín.	Medio	Máx.
Lluvia total	[mm]	31.6	67.4	160
Lluvia neta	[mm]	4.6	26.7	107.5
Duración	[hs]	6	11.5	23
Humedad previa	[-]	I	II	III
Nivel máximo	[m]	1.02	1.67	2.75
Caudal máximo	[m³/s]	6.7	25.4	69.0
Volumen líquido	[dm³]	45018	260625	1049644
Concentración máxima	[PPM]	369	835	1602
Producción total de sedimentos	[T]	37	254	1129

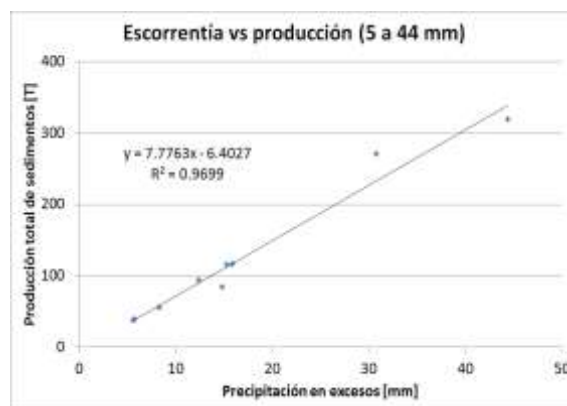


Figura 17. Relación precipitación en exceso vs producción total de sedimentos para eventos de 5 a 44 mm de lluvia neta.

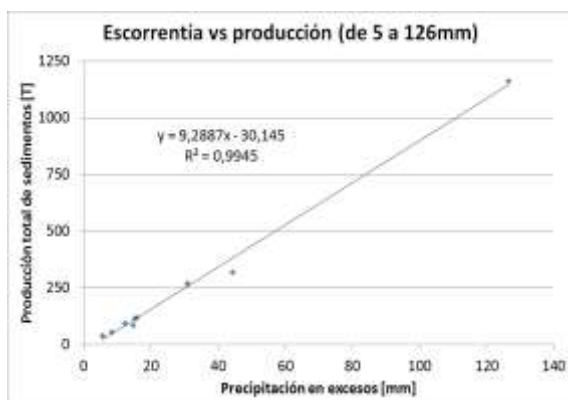


Figura 18. Relación precipitación en exceso vs producción total de sedimentos para eventos de 5 a 126 mm de lluvia neta.

En la Figura 17 y Figura 18 puede observarse tendencia a relación lineal con R^2 cercano a la unidad, representando un buen ajuste.

Finalmente, realizando una comparación entre los caudales máximos y concentraciones de sólidos máximos registrados para cada evento, la misma presenta un mejor ajuste para una ecuación de tipo polinómica, con un R^2 de 0.995 (Figura 19).

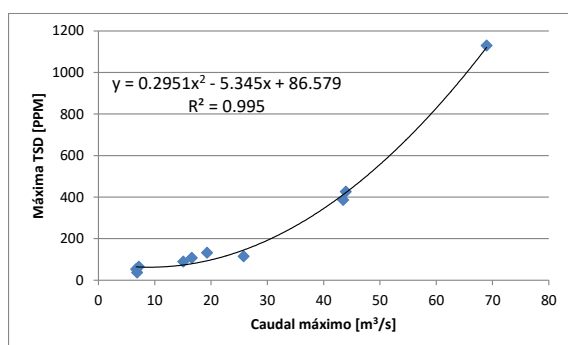


Figura 19. Relación caudales máximos vs concentraciones máximas.

CONCLUSIONES

La implementación de mediciones de caudal líquido y sólido en la cuenca Mbotaby de la ciudad de Oberá, ha posibilitado avanzar en el estudio de los recursos hídricos superficiales de cuencas urbanas de zona serrana de Misiones.

Si bien 10 tormentas pueden resultar escasas para un proceso de calibración-validación, la medición en campo de cada uno de los eventos implicó un verdadero desafío para el equipo de trabajo del autor, dado que las mismas presentan como una

metodología innovadora en la región, desarrolladas generalmente bajo situaciones ambientales adversas.

Las referidas mediciones posibilitarán la calibración y validación de modelos hidrosedimentológicos, permitido así el desarrollo de modernas herramientas de gestión de los desagües pluviales con innumerables aplicaciones futuras.

Como recomendaciones del presente trabajo, surge la necesidad de continuar con los registros durante los eventos pluviográficos a fin de alcanzar la máxima variedad de tormentas posibles de ser evaluadas, considerando la variación de los parámetros de respuesta del sistema en función tanto de la lámina total precipitada como de la distribución temporal de la misma. Un mayor número de tormentas evaluadas permitirá no solo mejorar las técnicas de adquisición y análisis de datos, sino también la calibración-validación de los modelos implementados.

Se considera que las metodologías de medición implementadas en la cuenca Mbotaby, resultan factible de proyectar a otras cuencas urbanas de la ciudad de Oberá y localidades con características fisiográficas y de usos del suelo similares. La medición sistemática de diferentes cuencas piloto en la región, permitiría la concreción de una base de datos disponible para una gestión integral del recurso en la región.

Líneas de trabajo a futuro cercano

Avanzar en el mejoramiento de la determinación de los campos de velocidades del escurrimiento superficial dentro del dominio espacial de la cuenca, para lo cual se estima la técnica PIV (Particle Image Velocimetry) como pertinente para la medición simultánea dentro del dominio espacial de trabajo y en las condiciones de borde.

Si bien los trabajos de mediciones de producción de sedimentos han sido numerosos e inéditos en la región, se necesita proseguir con tales mediciones dentro del dominio espacial, específicamente en puntos de control internos representativos de los distintos usos y ocupaciones del suelo.

Avanzar hacia una sistematización de las mediciones de escurrimiento líquido y sólido en conjunto con otros organismos universitarios y gubernamentales a fin de aportar más certeza a la descripción de los mecanismos hidrosedimentológicos dominantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Compañía Argentina de Relevamiento Topográfico y Aerofotogramétrico (CARTA) (1964). Hoja 2754-25-2D3. Buenos Aires.
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia. Mc Graw-Hill.
- Basile, P., Garcia, M. y Riccardi, G. (2011). Calibración de funciones para desagregar en vertical velocidad y concentración de sedimentos en suspensión en el Río Paraná. *Memorias del Quinto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Santiago del Estero, Argentina. ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM).
- Dunne, T. (1986). Urban hydrology in the tropics: problems, solutions, data collection and analysis. en: Urban climatology and its applications with special regard to tropical areas (Proc. WMO technical conference, Mexico DF, November 1984. WMO N° 652, WMO, Geneva, Switzerland.
- Google Earth © (2017). Imagen de 11 de diciembre de 2017. www.googleearth.com.
- Grupo Multidisciplinar de Modelación de Flujo (GMMF) (2005). Manual del usuario del SWMM 5.0 vE. Universidad Politécnica de Valencia. 244p.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) Cerro Azul 2013, Comunicación Interna.
- Maksimović, Č. (1992). Local floods in urban areas - natural disaster or lack of proper mitigation. *First international conference on disaster prevention in urban areas*. Tehran, Iran.
- Olinuk, J. (1998). El clima en la localidad de Cerro Azul, período 1967 – 1996. Estación experimental agropecuaria INTA Cerro Azul. Informe técnico N° 68, ISSN 0326-0135. Posadas, Misiones. 73p.
- Rodriguez, T. (2018). Estudio de dinámica de los excedentes hídricos superficiales en cuencas urbanas de alta pendiente y sus implicancias en los procesos erosivos. Caso de estudio región urbana de Oberá, Misiones. (Tesis doctoral). Facultad de Ciencia Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. 259p.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2018). Boletín climatológico – Anual, Vol. XXIX. ISSN 2314-2332, CABA. 31p.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO:

- Rodriguez, T. y Sanchez, J. (2018). Mediciones de caudal líquido y sólido en cuencas urbanas de zona serrana de Misiones. *Cuadernos del CURIHAM*. 24, 37-50. DOI: 10.35305/curiham.v24i0.127

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Trabajo recibido el 10/07/2018 y aprobado para su publicación el 17/10/2018.

LAS OBRAS DE ARTE FERROVIARIAS, SU DINÁMICA Y LOS EFECTOS EN LA ACTUALIDAD EN SANTA FE

Raúl Navarro^(*), Patricia Ruggeri, Belén Alonso, Carla Pagani, Pablo Bussi, Julieta Marcón y Federico Derman

Dirección General de Proyectos, Secretaría de Recursos Hídricos (SRH), Ministerio de Infraestructura y Transporte (MIyT), Provincia de Santa Fe, Argentina.

(*)e-mail: rnavarro@santafe.gov.ar - diepros@santafe.gov.ar

RESUMEN

Los terraplenes ferroviarios fueron diseñados respetando los pasos de agua naturales según puede observarse en la ubicación de sus obras de arte. Conjuntamente y motivado por la baja pendiente que las vías requerían dada la gran carga acarreada y las potencias de las máquinas empleadas, tales terraplenes generaron en muchos casos barreras al escurrimiento. Las obras de arte construidas hace un siglo, en muchos casos están desactivadas y es dificultoso detectarlas, esto se ha debido a que el desarrollo posterior no respetó aquellos lineamientos. Las obras de arte fueron desactivadas por falta de limpieza o eliminación debido a la falta de control y a la consecuente falta de conciencia social. En otros casos, las rutas paralelas a las vías, no copiaron los desagües pluviales generando tapones. Así es que pueden detectarse muchos casos en los cuales los lotes de aguas abajo de un terraplén ferroviario, en coincidencia con una obra de arte, no tienen marcada la línea de escurrimiento de salida y los lotes de aguas arriba muestran la presencia de una laguna. Este trabajo presenta algunas problemáticas hídricas de importancia, originadas por la metodología explicada arriba y detectadas durante los años de gestión del equipo de trabajo del Área Proyectos Rosario de la Secretaría de Recursos Hídricos del Ministerio de Infraestructura y Transporte de la Provincia de Santa Fe. Se concluye sobre la necesidad de dar un giro en los paradigmas y comenzar a trabajar con la naturaleza y no contra ella.

Palabras clave: hidrología superficial, terraplenes ferroviarios, obras de arte, buenas prácticas

ABSTRACT

Railways were designed in accordance with natural water streams as can be seen in the locations of its work of arts. Low railway slopes due to high weight transported by the convoys were the origin of artificial barriers to the natural flow. Traveling the campaign it can be seen many problems of natural runoff interrupted by locations of work of arts. In many cases, works of art were deactivated by obstruction of its hydraulic section due to lack of cleaning or intentional cut off. It is considered that this fact occurs due to the urban and rural development not has had the same respect to the nature that has had the railways constructors. In other cases, the parallel routes built, not copied the existing drains. So are detected many cases of batches of downstream of a work of art that does not have marked the line upstream runoff observed the presence of a lagoon. This work presents different water issues of importance due to the methodology explained above detected by professionals of the Rosario City Project Area of the Water Resources Secretary depending on Infrastructure and Transport Ministry of Santa Fe Province, Argentina. It is concluded on the need for a shift in paradigms and begins to work with nature and not against it.

Keywords: surface hydrology, railway barriers, work of arts, good practices

INTRODUCCIÓN

Cuando los ferrocarriles se diseñaron en el siglo XIX, sus proyectistas pensaron a los escurrimientos naturales como una realidad a respetar, lo cual se evidencia en los registros que muestran la ubicación de las obras de arte.

Esta concepción original puede consultarse en la invaluable información que brindan, hoy día, las Cartas Topográficas confeccionadas en la primera mitad del siglo XX por el Instituto Geográfico Militar, hoy Nacional (IGN).

Si comparamos esta documentación con imágenes satelitales de cualquier período desde su aparición, y contrastamos con el inventario de problemáticas hídricas presentes en la Provincia de Santa Fe, veremos que muchas de ellas coinciden geográficamente con la ubicación original de aquellas obras de arte.

Ahora bien, si concurrimos al sitio donde se indica la existencia de una obra de arte determinada, en muchos casos nos será dificultoso detectarla y en otros, imposible.

Esto es debido a que el desarrollo que sucedió a la implantación de los ferrocarriles no tuvo el mismo respeto a los lineamientos básicos mencionados arriba. En muchos casos donde la obra de arte era de pequeña magnitud, debido a su cuenca de aportes o al uso del suelo de la época en que fueron diseñadas, la misma fue lentamente desactivada mediante maniobras de falta de limpieza, favorecimiento del crecimiento de vegetación o cegado o su eliminación. La falta de control sobre las actividades en el territorio favoreció la pérdida de la conciencia social necesaria para entender que de esta manera se estaba perjudicando a propios y vecinos.

En otros casos, la presencia de rutas importantes paralelas a las vías, a medida que fueron siendo pavimentadas, no copiaron los desagües pluviales ferroviarios, habilitaron más aún la modificación de los escurrimientos y en algunos casos dejaron perturbaciones al tránsito del agua demostrando la desaprensión a la problemática hidráulica.

Así es que se detectan muchos casos de lotes ubicados aguas abajo del terraplén ferroviario en coincidencia con una obra de arte indicada en las cartas topográficas que no tienen marcada la línea de

escurrimiento que permita el tránsito de los caudales hacia aguas abajo y como contraparte, se puede observar aguas arriba la presencia de una laguna.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es poner en consideración una problemática que aunque es muy conocida, no es normalmente enfrentada mediante un planteo que conduzca a la corrección de los efectos negativos que ella acarrea.

Se intenta poner en discusión un criterio de vuelta a las concepciones primigenias mediante las cuales se demostraba respeto por la naturaleza y equidad frente a los inconvenientes que presenta a un propietario la presencia de un bajo natural en su propiedad, el cual también afecta a aquel de aguas arriba como a aquel de aguas abajo.

CASOS

En la Figura 1 se puede observar la indicación de la presencia de una alcantarilla bajo la vía ferroviaria en una Plancheta (Instituto Geográfico Nacional, 1930). Dicha alcantarilla está ubicada en correspondencia con el bajo que se observa bien marcado por las curvas de nivel cóncavas cuyo nivel va bajando hacia el noreste.

En la Figura 2 se puede observar el funcionamiento hidráulico del bajo en la actualidad, registrado en una imagen satelital (Google Earth, 27/02/2016–04/05/2017).

Este caso salió a la luz motivado por una denuncia efectuada por los perjudicados de aguas arriba. El análisis de la problemática puso en evidencia irregularidades en la resolución de los drenajes del mencionado bajo.

En la imagen satelital se puede observar que el bajo proveniente desde aguas arriba está muy marcado y que al llegar a la vía férrea forma un área de almacenamiento mostrada por la zona de coloración más oscura y vegetación irregular.

Hacia aguas abajo no se observa la continuación del bajo. Una aproximación de la imagen permitiría detectar un canal paralelo a la vía del ferrocarril que conduce las aguas hacia una alcantarilla ubicada en un cruce a nivel de un camino comunal.

Como complemento puede indicarse que en la continuidad del bajo hacia aguas abajo, se ha ubicado una zona desarrollada la cual seguramente será afectada por el agua en eventos extremos.

Estas condiciones muestran una evidente inequidad entre los lotes de aguas arriba y aguas abajo. Los primeros se

ven perjudicados en mayor medida que lo que lo serían si la obra de arte funcionase adecuadamente y los de aguas abajo reciben un beneficio tal que hasta tienen la posibilidad de poder asentar un área desarrollada con menores riesgos que aquellos naturales que hubiesen tenido, esto a pesar que existen leyes que indicarían la imposibilidad de tal uso del suelo.

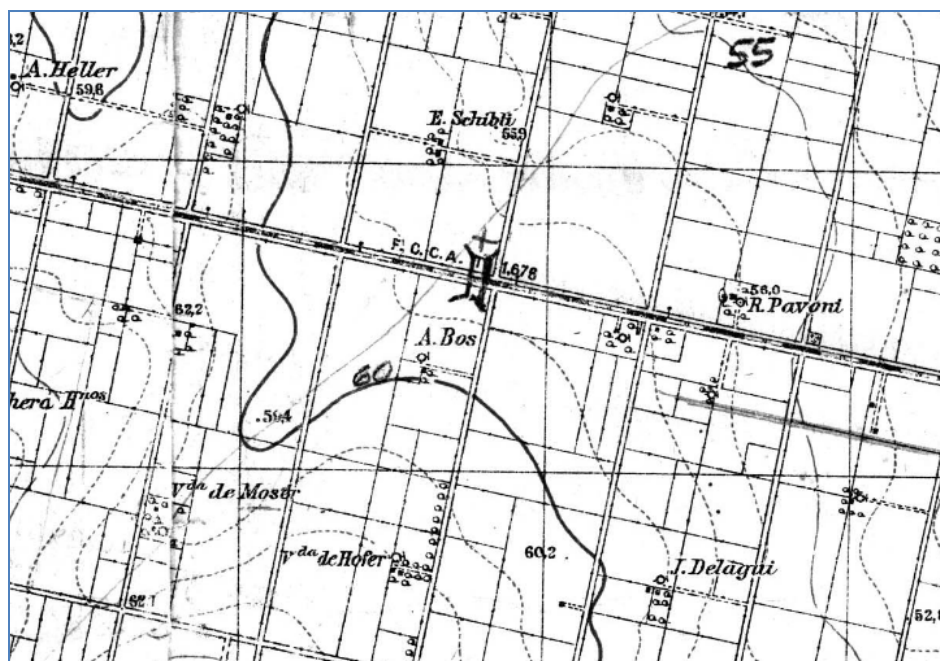


Figura 1. Alcantarilla en Plancheta Carcarañá (IGN, 1930)



Figura 2. Alcantarilla en imagen satelital actual (Google Earth, 27/02/2016 – 04/05/2017)

El agravante es que la instalación ubicada aguas abajo fue generada por el Estado Nacional.

Seguramente, estos hechos se producen por una conjunción de acciones e inacciones tanto a nivel público como privado que se pueden clasificar en falta de limpieza ex profeso de los servicios de drenaje o por abandono o acciones de taponamiento de obras de arte o falta de reconstrucción de las mismas cuando fallaron por el solo paso del tiempo

Como ya se mencionó, el desarrollo ubicado aguas abajo, en este caso en particular, fue realizado por el Estado Nacional hace tiempo o en su defecto fue movilizadado por el mismo. La ubicación elegida demuestra la falta de consideración de la legislación del Código Civil Argentino (Congreso de la Nación Argentina, 2015).

En dicho Código, el artículo 1975 que se refiere a los obstáculos al curso de las aguas, regula que *los dueños de inmuebles linderos a un cauce no pueden realizar ninguna obra que altere el curso natural de las aguas o modifique su dirección o velocidad, a menos que sea meramente defensiva; y agrega que si alguno de ellos resulta perjudicado por trabajos del ribereño o de un tercero, puede remover el obstáculo, construir obras defensivas o reparar las destruidas, con el fin de restablecer las aguas a su estado anterior, y reclamar del autor el valor de los gastos necesarios y la indemnización de los demás daños. Si el obstáculo se origina en un caso fortuito, el Estado sólo debe restablecer las aguas a su estado anterior o pagar el valor de los gastos necesarios para hacerlo.*

El Código Civil fue modificado en 2015 pero su texto anterior proveniente del siglo XIX rezaba algo similar sobre esta temática.

Este tipo de hechos son muy comunes de encontrar.

En la Figura 3 (Google Earth, 2010) se puede observar otro caso paradigmático en el cual la línea de escurrimiento está canalizada aguas arriba de un camino. Entre dicho camino y la ruta nacional que le sigue aguas abajo y que es paralela a una línea ferroviaria, se observa una mancha de suelo húmedo que indica el almacenamiento que se produce por falta de canalización y de obra de arte de paso. Al encontrarse el agua con la falta de una obra de paso bajo la ruta nacional y bajo el ferrocarril, los

escurrimientos se dirigen por las cunetas de dicha ruta y de dicho ferrocarril hasta el cuerpo receptor, que es el Arroyo Ludueña, en una longitud de 3.5 kilómetros aproximadamente encharcándose un tramo de ruta de más de 1.5 kilómetros en eventos por encima de la media y hasta llegándose a cortar por un tiempo del orden del día en los eventos extraordinarios, generando situaciones de sumo riesgo para el tránsito. Siendo esta la principal ruta nacional de comunicación norte sur de la región sur de la provincia, puede tenerse una idea de la magnitud del perjuicio social y económico que genera.

Los dos casos anteriores involucran a una misma empresa concesionaria ferroviaria que tiene importantes intereses económicos regionales y por lo cual cuenta en sus oficinas con personal de la ingeniería civil idónea que conoce la importancia de la problemática y con quien se tiene una relación fluida que permite llegar a soluciones acordadas.

La Dirección Nacional de Vialidad también cuenta con personal idóneo comprometido con la temática pero las decisiones de inversiones al momento de plantearse la necesidad de modificación de las obras de arte pasan por escritorios lejanos en distancia y en afectación y por lo tanto las acciones requeridas tardan mucho más en llegar.

En ambos casos mostrados, si se aplicara la ley provincial N° 11730 (Legislatura de la Provincia de Santa Fe, 2000), de Bienes en Áreas Inundables, se definiría una franja a ambos lados de la línea de escurrimiento dentro de la cual las actividades de desarrollo estarían limitadas y si se aplicase el Código Civil de la República Argentina debería restituirse el paso natural de las aguas bajo la ruta nacional y bajo el ferrocarril.

De las imágenes puede concluirse que los lotes de aguas arriba tienen mayores limitaciones de uso que los de aguas abajo desde el punto de vista productivo. Este hecho es puro y exclusivamente antrópico.

Estas situaciones, totalmente comunes en nuestra región, son de muy difícil modificación, fundamentalmente porque los propietarios que durante muchas décadas han sido beneficiados por estos hechos, consideran que es un derecho adquirido e irrevocable.



Figura 3. Interrupción de una línea de escurrimiento (Google Earth, 22/03/2010)

No solamente para los de los lotes ubicados inmediatamente aguas abajo de la barrera sino para todos aquellos ubicados hacia aguas abajo en la línea de escurrimiento, la idea de modificar esta situación es impensable e inadmisibles.

Existen también casos en los que los estamentos provinciales tomaron medidas para mejorar el funcionamiento del bajo natural

Uno de ellos corresponde a un cruce de un bajo natural bajo una vía ferroviaria y bajo un camino comunal existente entre las localidades de Godoy y Rueda en el Departamento Constitución. El bajo natural pertenece a la cuenca del Arroyo Pavón.

Previo a la ejecución de una alcantarilla más grande bajo el camino podía observarse la siguiente situación mostrada en la Figura 4 (Google Earth, 2017).

La figura precedente permite observar como las zonas afectadas por el desborde hacia aguas arriba del bajo natural, ocasionado por la sección hidráulica y las características de diseño de los cabezales de las obras de arte ferroviaria y vial, se

extiende hacia el noreste dirigiéndose hacia la localidad de Rueda.



Figura 4. Área de desbordes (Google Earth, 2017)

En la Figura 5 se puede observar el detalle de la planimetría de la alcantarilla vial mencionada y la gran profusión de vegetación arbórea existente en una larga franja a ambos lados del bajo. Esta situación también es muy común de encontrar ya que la humedad casi permanente de la zona de bajo permite el crecimiento de árboles los cuáles son de costoso mantenimiento si se los pretendiese podar, más aún cuando se encuentran alejados de las zonas

urbanas y además son propiciados por los propietarios de aguas abajo a quienes benefician por su control sobre los escurrimientos.



Figura 5. Detalle de alcantarilla (Google Earth, 2017)

La Figura 6 (Google Earth, 2019) muestra los resultados al haberse construido una nueva alcantarilla de mayores dimensiones y con mejores características del diseño hidráulico.

Se observa una reducción en la expansión de la mancha de desborde de aguas arriba de las vías de comunicación.

Sin embargo, no se ha obtenido la mejor respuesta a la acción tomada ya que también se requiere la realización de acciones sobre la alcantarilla ferroviaria y sobre la vegetación arbórea.

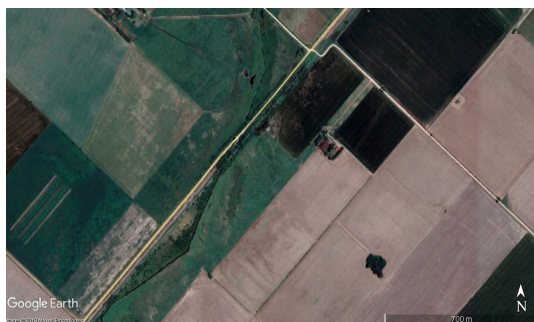


Figura 6. Área de desbordes (Google Earth, 2019)

En la Figura 7 (Google Earth, 2019) puede observarse la magnitud de la ampliación que se llevó a cabo sobre la alcantarilla vial.

En dicha figura puede observarse el ensanche de la luz de la obra de arte y su diseño siguiendo el ángulo de cruce del bajo natural.

La renuencia a socializar los efectos negativos de los desbordes es muy fuerte y debería intentarse vencer la resistencia mediante una presencia más activa de

las entidades de control público así como de la toma de medidas correctivas en cada uno de los proyectos de obra que se requieran.

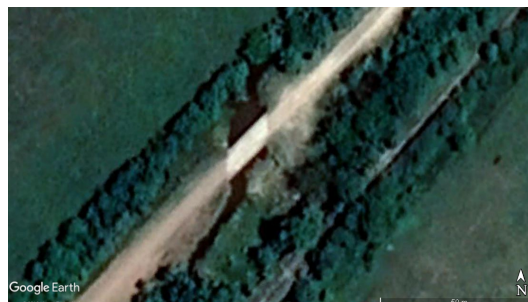


Figura 7. Detalle de alcantarilla (Google Earth, 2019)

No se descarta la posibilidad de conducir caudales de bajas recurrencias por cunetas de caminos que disminuyan los efectos negativos sobre las producciones agropecuarias, pero tales acciones siempre deberían tener en cuenta que los aportes de los eventos extraordinarios deberían tomar los caminos que la naturaleza ha marcado antes que el hombre desarrollara su egoísmo en la tierra.

CONCLUSIONES

La propuesta de este trabajo es concientizar a los tomadores de decisión y planificadores del estado de la necesidad de dar un giro en los paradigmas y comenzar a trabajar con la naturaleza y no contra ella.

Es necesario accionar sobre las barreras que ponen los conceptos tácitos, aplicados para el tratamiento de los problemas de drenajes, que nos separan y modificarlos poco a poco para tornarlos en otros que nos unan y nos ayuden a vivir mejor pensando en el otro.

Hay que empezar por proponerse aplicar las leyes existentes lo cual permitirá detectar la necesidad de ampliarlas o modificarlas de acuerdo a la dinámica que imponen los paradigmas actuales.

Se deben quebrar las inercias que vienen desde décadas atrás y que nos estancan como sociedad.

Hay que atreverse a enfrentar las barreras mentales y favorecer la amplitud de pensamiento.

La conciencia social, bien de difícil acceso en estos momentos, tal vez no nos apoye en la tarea pero el dictado de leyes, su discusión y la puesta en boca de nuevos conceptos pueden a la larga dar algún fruto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Congreso de la Nación Argentina (2015). Código Civil y Comercial de la Nación.
Instituto Geográfico Nacional (1960). Cartas Topográficas.
Legislatura de la Provincia de Santa fe (2000). Ley N° 11730. “Bienes en Áreas Inundables”.
Ministerio de Infraestructura y Transporte (2019). Gobierno de la Provincia de Santa Fe. Centro de Documentación. Secretaría de Recursos Hídricos.

REGISTRO BIBLIOGRÁFICO:

Navarro, R., Ruggeri, P., Alonso, B., Pagani, C., Bussi, P., Marcón, J. y Derman, F. (2018). Las obras de arte ferroviarias, su dinámica y los efectos en la actualidad en Santa Fe. Cuadernos del CURIHAM. 24, 51-57. DOI: 10.35305/curiham.v24i0.128

Tipo de Publicación: NOTA TÉCNICA.

Trabajo recibido el 22/10/2018 y aprobado para su publicación el 02/12/2018.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES**INTRODUCCION**

La Revista CUADERNOS DEL CURIHAM es una publicación de periodicidad anual (publica cada diciembre) editada por el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Argentina.

La revista tiene como objetivo la divulgación de trabajos de investigación básica y aplicada, como así también innovaciones tecnológicas en el campo concerniente a la disciplina hidroambiental. Además, esta publicación puede incluir resultados de investigaciones de campo, estudios interdisciplinarios como así también trabajos acerca de estado del arte en la temática.

Las temáticas comprendidas son: Hidráulica Fundamental, Fluvial e Hidrodinámica; Hidrología Superficial y Subterránea; Hidrología Urbana; Estocástica; Planeamiento y Manejo de Recursos Hídricos; Evaluación Ambiental; Contaminación y Calidad de aguas; Política y Legislación de Aguas; Gerenciamento Hidroambiental Regional; Obras Hidráulicas, Métodos y Técnicas Constructivas; y todos aquellos temas relacionados con las ciencias hidroambientales. El contenido de la revista está dirigido a investigadores, docentes, estudiantes de posgrado y grado y profesionales de las áreas afines a la temática de la misma.

Los artículos y notas técnicas que se propongan para su publicación en CUADERNOS DEL CURIHAM deberán ser originales y no haber sido publicados previamente, y no estar simultáneamente propuestos para tal fin en otra publicación. La responsabilidad del contenido, originalidad y autenticidad de los artículos o notas técnicas corresponde a los autores.

Los autores no pagan ningún costo por el procesamiento; envió y publicación de los artículos y notas técnicas a la revista.

Ante cualquier consulta comuníquese a revistac@fceia.unr.edu.ar o curiham@fceia.unr.edu.ar.

CLASIFICACION DEL TRABAJO

•**Artículo:** documento científico inédito que trata y comunica por primera vez los resultados de una investigación o innovación exitosa, cuyas contribuciones aportan e incrementan el conocimiento actual en materia hidroambiental. Máximo 25 páginas (incluido tablas, gráficos y figuras).

•**Nota Técnica:** documento inédito en donde se realiza una revisión de un tópico específico o una aplicación de una técnica estándar o trabajos derivados de la práctica profesional en el campo hidroambiental. Máximo 10 páginas (incluido tablas, gráficos y figuras).

GENERAL

Los artículos y notas técnicas serán sometidos a arbitraje por un Consejo Revisor.

El artículo deberá ser escrito preferentemente en su forma definitiva en español, portugués o inglés.

Los trabajos y toda correspondencia deberán ser remitidos mediante correo electrónico a revistac@fceia.unr.edu.ar con copia a curiham@fceia.unr.edu.ar

El archivo debe tener formato de página A4 (210 mm x 297 mm) con márgenes. Superior: 4 cm; Inferior: 3.7 cm ; Izquierdo: 3 cm; Derecho: 2.5 cm; Encabezado 3 cm; Pie de Página: 2.3 cm.

La fuente será Times New Roman 10 con interlineado simple.

Primera página: una columna. Páginas siguientes: 2 Columnas de ancho: 7.5 cm con espacio de 0.5 cm.

El autor cuenta con una plantilla para el formato del trabajo.

ESTRUCTURA DEL TEXTO

Utilizar Microsoft Word del paquete de Office 2007 o superior, a espacio simple, y doble cuando intervengan fórmulas.

Se recomienda utilizar como separador decimal el punto en el cuerpo del texto, tablas, figuras, ecuaciones, etc. Se marcará la división entre millares con un espacio en blanco.

Los párrafos del texto deberán contar con alineación justificada y comenzarán sin tabulado o sangrado.

No utilizar el encabezado y/o el pie de página para indicar referencias o notas.

Títulos

Título primario: deberá escribirse en mayúsculas y negrita dejando dos líneas en blanco por arriba, una por debajo y alineado a la izquierda.

Título Secundario: deberá escribirse en minúsculas y negrita dejando una línea en blanco por arriba, una por debajo y alineado a la izquierda.

Título Terciario y sucesivos: deberán escribirse en minúsculas y negrita dejando una línea en blanco por arriba, ninguna por debajo y alineado a la izquierda.

Primera Página

Título del trabajo (en inglés y en español). Máximo 2 renglones. Mayúsculas y negrita con alineación centrada.

Datos del/los autor(es). Nombre y Apellido completos, filiación institucional, Ciudad, Nacionalidad, correo electrónico.

Resumen no mayor a 200 palabras, en su forma definitiva y en inglés (si el trabajo está en inglés el resumen debe realizarse en inglés y en español).

Palabras claves en ambos idiomas (máximo 5).

Páginas siguientes

El trabajo tendrá, en lo posible, la siguiente estructura: Introducción; Objetivos; Materiales y Métodos, Resultados, Conclusiones y Referencias bibliográficas. No se admiten anexos.

Formato de Figuras, Tablas, Fotos, Mapas

Las tablas, imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberán adaptarse al espacio disponible respetando 1 ó 2 columnas en su ancho.

Enumerar los objetos (figuras, tablas, fotos, mapas, etc.) en el orden en cual se hacen referencias en el texto, ej. Figura 1, Figura

2, etc. No está permitido el uso de enumeración como Figura 1a; o Tabla 2a.

Las tablas deben presentarse con tipografía Times New Roman 9 PT. Deben estar en blanco y negro o escala de grises con contrastes bien definidos. Deben estar con bordes delimitados con línea continua.

Los enunciados, nombres y numeración de las tablas, gráficos, fotos, mapas, figuras, etc., deberán estar en Times New Roman 8 PT, en negrita y centrado. Para las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberá ubicarse abajo del objeto. Para las Tablas deberá ubicarse arriba de la misma.

Las tablas no deben ser imágenes, sino texto editable.

En la versión enviada para papel, las imágenes, fotos, gráficas, mapas y figuras deben estar pegadas en el texto como imagen de metarchivo mejorado; en blanco y negro o escala de grises con contrastes bien definidos.

Para la versión en línea, las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deberán tener una resolución de 300 dpi en color (tamaño no menor a 13X18 cm) y debe ser un solo elemento por figura. Las imágenes, fotos, gráficas, figuras y mapas deben ser remitirlas en archivo aparte (formatos JPG o TIFF).

En ambos casos (figuras en versión impresa y en versión digital), los textos dentro de las figuras deben estar en Times New Roman equivalente a un tamaño 8 o 9 PT en su tamaño definitivo.

Formato de las ecuaciones

Las ecuaciones deben numerarse consecutivamente tal como sean citadas en el texto, con números arábigos y deben ser referenciadas de la siguiente forma: ecuación (3). Deben dejarse espacios arriba y debajo de cada ecuación. Las ecuaciones deberán estar formadas con el editor de ecuaciones de word, otros formatos de ecuaciones serán rechazados.

Agradecimientos

Se incluirán después del texto y antes de las referencias.

Citas y Referencias bibliográficas

Para las citas y las referencias se usarán las Normas APA (American Psychological Association) 6º edición.

Citas:

Dentro del texto se usará el sistema de citación Autor-Fecha. Todas las citas deben corresponderse con una referencia bibliográfica. Por otro lado, no debe incluirse en la lista bibliográfica ninguna fuente que no aparezca referenciada en el texto.

Referencias bibliográficas

La lista bibliográfica se hace por orden alfabético de los apellidos de los autores y se le coloca sangría francesa.

En caso de que el mismo autor o mismos autores tengan más de un trabajo en la lista de referencias, se procederá a ordenar por el año de la publicación comenzando por los más antiguos.

En caso de que el mismo autor o mismos autores tengan más de un trabajo en la lista de referencias con el mismo año de publicación, se procederá a ordenar por el título del trabajo. Se usarán las letras a, b, c,... después del año dentro del paréntesis, para su diferenciación (2010a, 2010b, etc.).

Libro: Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Libro con editor: Apellido, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad, País: Editorial.

Libro electrónico: Apellido, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www...>

Libro electrónico con DOI: Apellido, A. A. (Año). Título. doi: xx

Capítulo de libro: únicamente en los casos de libros compilatorios y antologías donde cada capítulo tenga un autor diferente y un compilador o editor: Apellido, A. A., y Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Publicaciones periódicas formato impreso: Apellido, A. A., Apellido, B. B., y Apellido, C. C. (Fecha). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp.

Publicaciones periódicas con DOI: Apellido, A. A., Apellido, B. B. y Apellido, C. C. (Fecha). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp. doi: xx

Publicaciones periódicas online: Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen(número), pp-pp. Recuperado de <http://www...>

Artículo de periódico impreso: Apellido A. A. (Fecha). Título del artículo. Nombre del periódico, pp-pp. O la versión sin autor: Título del artículo. (Fecha). Nombre del periódico, pp-pp.

Artículo de periódico online: Apellido, A. A. (Fecha). Título del artículo. Nombre del periódico. Recuperado de <http://www...>

Tesis de grado: Autor, A. (Año). Título de la tesis (Tesis de pregrado, maestría o doctoral). Nombre de la institución, Lugar.

Tesis de grado online: Autor, A. y Autor, A. (Año). Título de la tesis (Tesis de pregrado, maestría o doctoral). Recuperado de <http://www...>

Referencia a páginas webs: Apellido, A. A. (Fecha). Título de la página. Lugar de publicación: Casa publicadora. Recuperado de <http://www...>

Fuentes en CDs: Apellido, A. (Año de publicación). Título de la obra (edición) [CD-ROM]. Lugar de publicación: Casa publicadora.

Foros en internet, lista de direcciones electrónicas y otras comunidades en línea: Autor, (Día, Mes, Año) Título del mensaje [Descripción de la forma] Recuperado de <http://www...>

CARTA DE ORIGINALIDAD

Es indispensable remitir la Carta de originalidad firmada por todos los autores del trabajo. Enviar a: revistac@fceia.unr.edu.ar y a curiham@fceia.unr.edu.ar.

DATOS DE LOS AUTORES

Los autores del trabajo deben enviar los datos de filiación completa, dirección postal, dirección de e-mail, especialidad o área de conocimiento, cargos actuales y títulos (Ingeniero, Magister, Doctor. Mención completa y entidad de otorgamiento). Enviar a: revistac@fceia.unr.edu.ar y a curiham@fceia.unr.edu.ar.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD DEL TRABAJO ESCRITO.

Lugar y Fecha:.....

Sra. Editora Responsable
Adelma Mancinelli
Revista CUADERNOS DEL CURIHAM
Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario

Por medio de la presente CERTIFICO que el artículo/nota técnica titulado:

.....
.....

que presento a la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM, editada por el Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario no ha sido publicado previamente y me comprometo a no someterlo a consideración de otra publicación mientras este en proceso de evaluación en la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM ni posteriormente en caso de ser aceptado para su publicación.

Declaro que el artículo es original y sus contenidos son producto de mi directa contribución intelectual.

Declaro que todos los materiales están libres de derechos de autor y me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la Universidad Nacional de Rosario.

En el caso de que sea aprobado el artículo, autorizo de manera ilimitada en el tiempo a la Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales para que incluya el texto en la Revista CUADERNOS DEL CURIHAM y pueda reproducirlo, editarlo, distribuirlo, exhibirlo y comunicarlo tanto en el país como en el extranjero por medios impresos, electrónicos, CD, internet, o cualquier otro medio conocido o por conocer.

Nombre y Apellido

Firma

|

L

|

L

CUADERNOS DEL CURIHAM

Volumen 24

Procesado gráfico integral

UNR Editora

Editorial de la Universidad Nacional de Rosario

Secretaría de Extensión Universitaria

Urquiza 2050 - S2000AOB - Rosario - República Argentina

www.unreditora.unr.edu.ar / editora@sede.unr.edu.ar

Edición de 100 ejemplares

Año 2021

|

L

|

L

