

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).

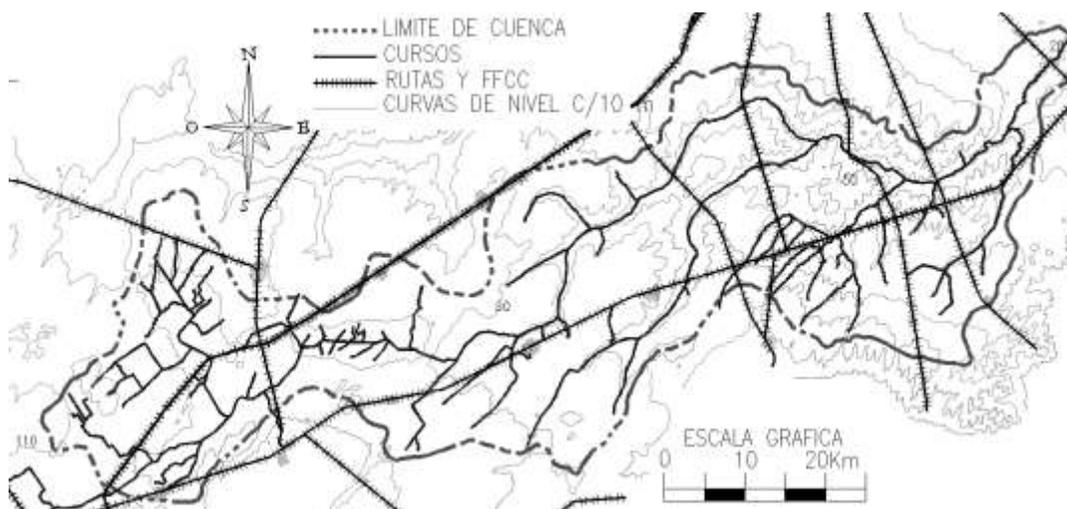


Figura 1: Cuenca del arroyo Pavón.

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 las 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.

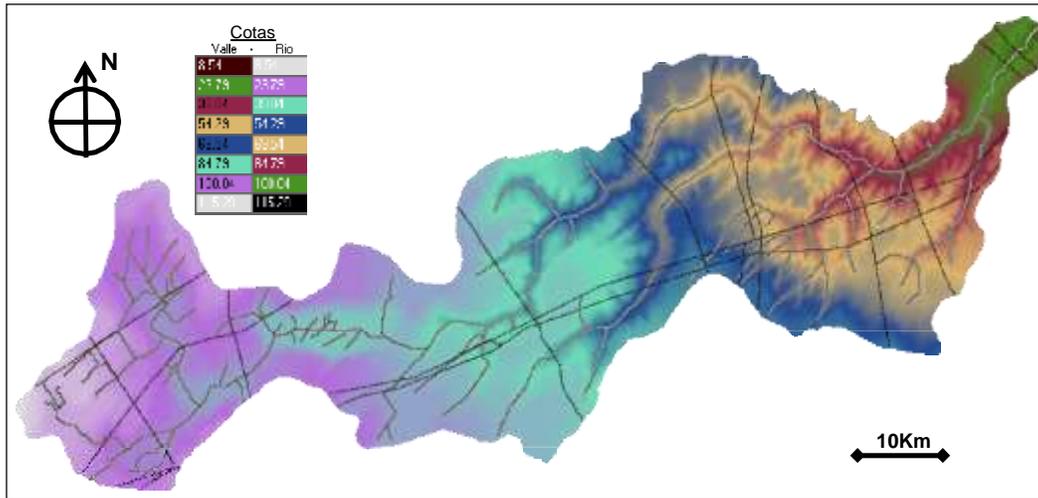


Figura 2: Modelo matemático de la Cuenca del arroyo Pavón. Tamaño de celda: 150 m x 150 m.



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 s/m^{1/3}; la rugosidad en valle se ajustó en el rango entre 0.08 - 0.12 s/m^{1/3} y las características geométricas de la sección trasversal 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							

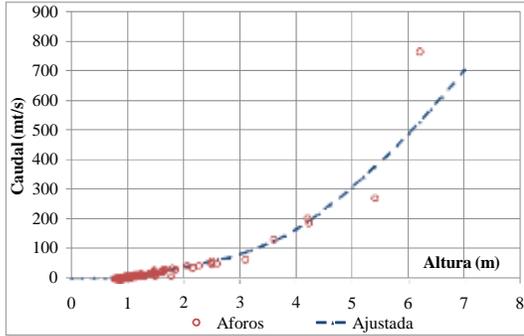


Figura 4: Aforos y curva H-Q ajustada, SSRRHH Nación (2014)

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

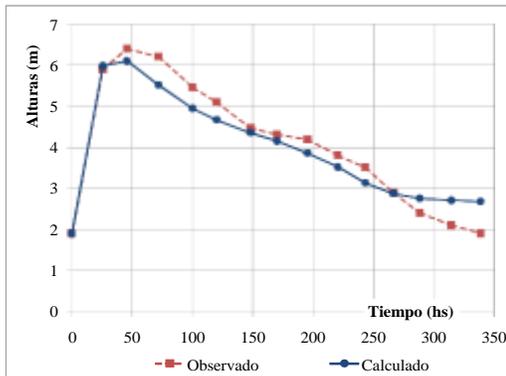


Figura 5: Limnigramas observado y calculados.

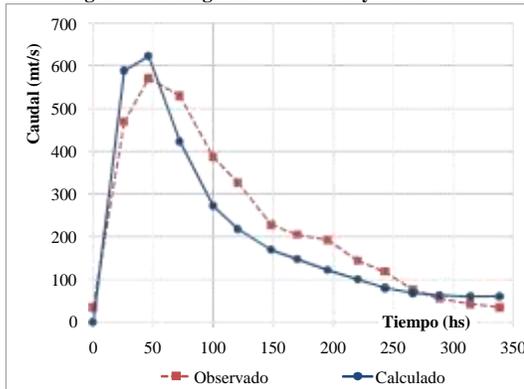


Figura 6: Hidrogramas observado y calculado.

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.

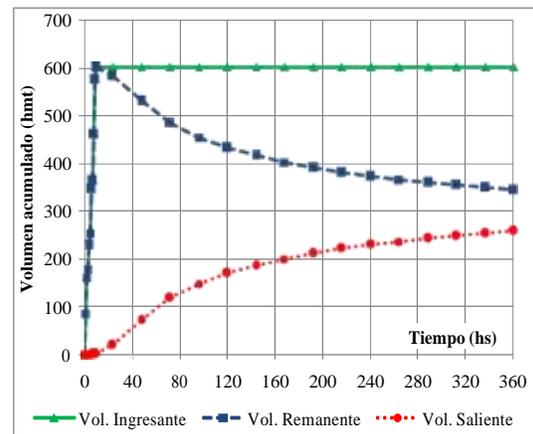


Figura 7: Variación temporal de volúmenes acumulados.

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								
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								
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								
Alto Riesgo	371	11.8	415	13.2	447	14.2	532	16.9	501	15.9

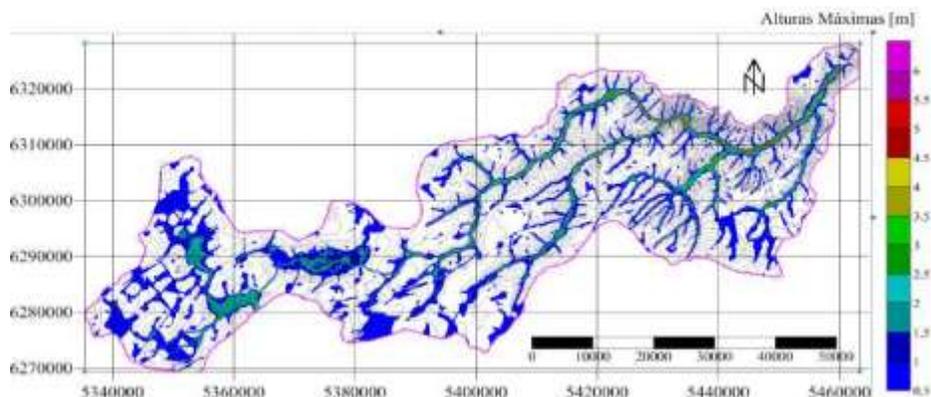


Figura 7. Mapas de alturas máximas para Escenario R = 20 años.

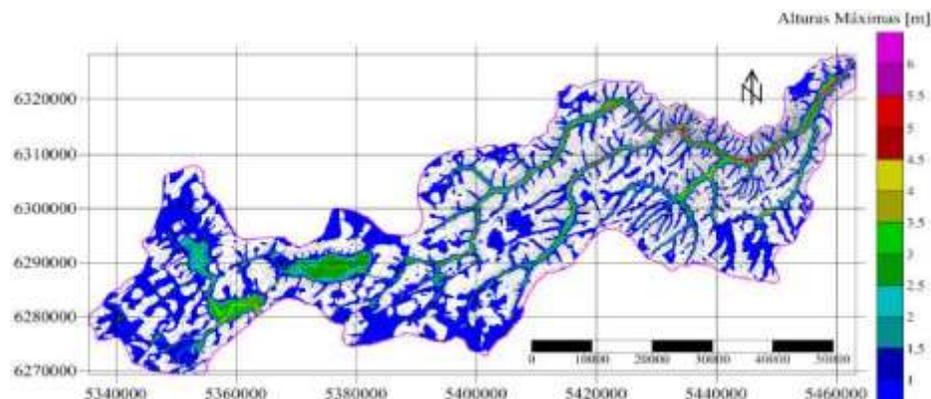


Figura 8. Mapas de alturas máximas para Escenario R = 500 años.

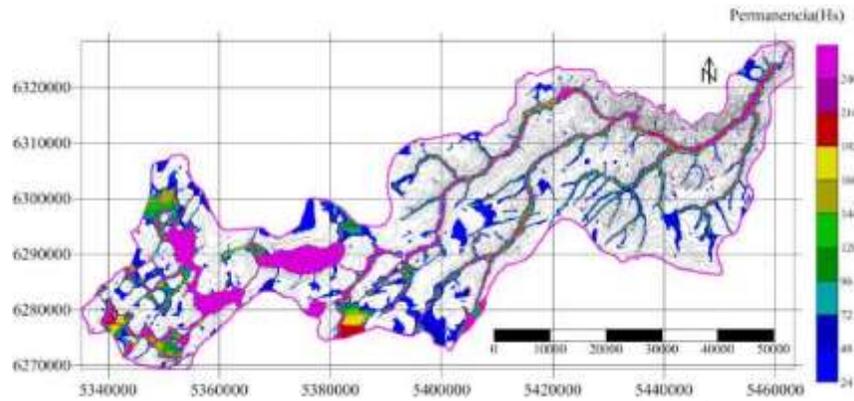


Figura 9. Mapas de permanencia de agua para Escenario R = 20 años.

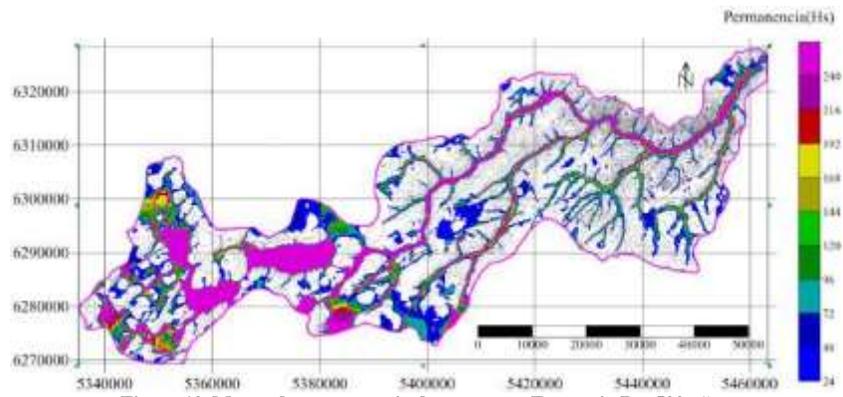


Figura 10. Mapas de permanencia de agua para Escenario R = 500 años.

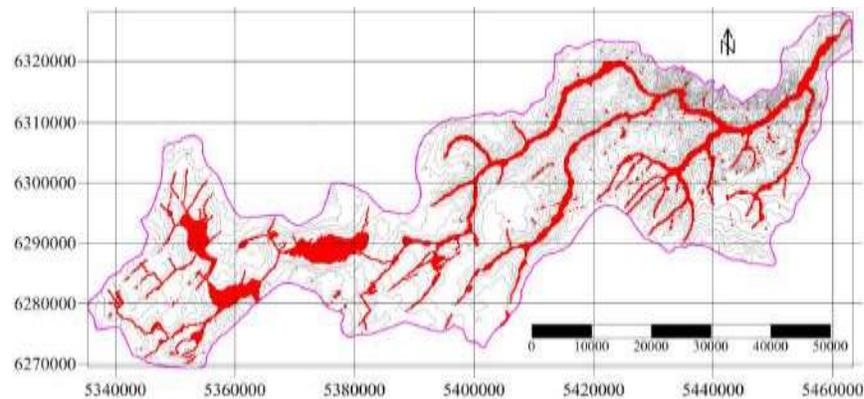


Figura 11. Mapas de riesgo humano para Escenario R = 20 años.

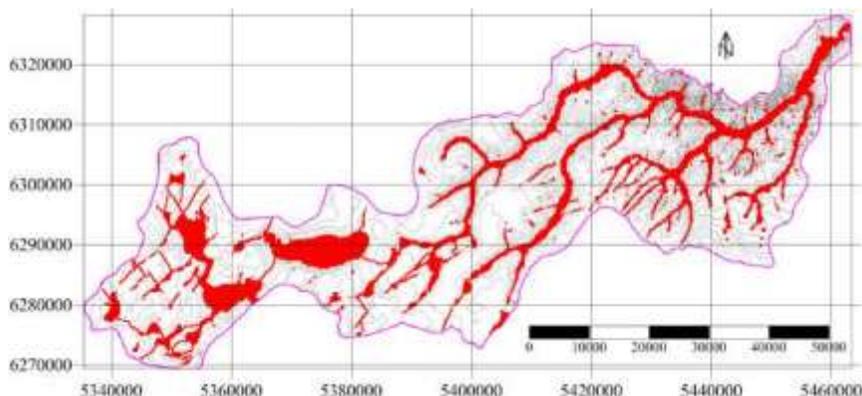


Figura 12. Mapas de riesgo humano para Escenario R = 500 años.

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 travase 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 Zacañas, 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-Carcaraña. *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
- Stenta, Hernán; Gerardo Riccardi; Pedro Basile; Carlos Scuderi, 2022, "Datos de: Modelación matemática hidrológica-hidráulica del escurrimiento superficial en la cuenca del A° Pavón (Santa Fe, Argentina)", <https://doi.org/10.57715/UNR/THC0KS>, RDA UNR.

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.