

MODELACIÓN MATEMÁTICA DISTRIBUIDA DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN CUENCAS DEL SUR DE LA PROVINCIA DE SANTA FE (ARGENTINA)

Hernán R. Stenta^{1,2}, Gerardo A. Riccardi^{1,2,3}, Pedro A. Basile^{1,2} y Carlos Scuderi^{1,2}

¹Depto. de Hidráulica-Esc. de Ing. Civil, Fac. de Cs Exactas, Ing. y Agrim., Univ. Nac. de Rosario (Santa Fe, Argentina).

²Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Fac. de Cs Exactas, Ing. y Agrim., Univ. Nac. de Rosario (Santa Fe, Argentina).

³Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (Santa Fe, Argentina).

E-mail: hstenta@fceia.unr.edu.ar; riccardi@fceia.unr.edu.ar, pbasile@fceia.unr.edu.ar, cscuderi@fceia.unr.edu.ar

Introducción

La representación de la dinámica del escurrimiento superficial mediante modelación matemática resulta de importancia para sus diversas aplicaciones; tales como utilización en sistemas de alerta de inundaciones, delimitación de zonas de inundación, zonas de riesgo para la vida humana, impacto de obras de infraestructura (carreteras, terraplenes), impacto de desarrollo de ciudades, evaluación y diagnóstico de la situación actual, y estudio e impactos de obras destinadas al saneamiento hídrico.

Se presenta la implementación y puesta en operación de un modelo matemático distribuido, hidrológico-hidráulico físicamente basado, en las cuencas de los Arroyos Seco (410 km²); Frías (224 km²) y Villa Constitución (284 Km²) (sur de la provincia de Santa Fe).

En general se evidencia un severo déficit de información de entrada al modelo, principalmente en lo que se refiere a registros de niveles o caudales y registro de precipitaciones; esta situación hace dificultoso el adecuado ajuste del modelo.

Debido a lo anterior, en las cuencas de los arroyos Frías y Villa Constitución, no se realizó el proceso de calibración de parámetros del modelo por ser ambas cuencas no aforadas. Para el caso de la cuenca del A° Seco, el día 15 de Enero de 2017 ocurrió un evento extraordinario, donde se registraron aproximadamente 320 mm en 10 hs en la parte baja de la cuenca. Se produjo la mayor inundación de la historia de la localidad, con un total de 235 evacuados e innumerables pérdidas materiales. A partir de dicho evento se realizaron una serie de recorridos y búsqueda de información, lo que permitió recopilar principalmente datos de lluvias; niveles de agua en sectores característicos y la estimación de la zona de afectación (mancha de inundación) a partir de los cuales se realizó la calibración del modelo.

Se utilizó el modelo matemático VMMHH 1.0 el cual ha sido implementado en cuencas similares obteniéndose resultados satisfactorios en la reproducción del proceso de transformación lluvia-caudal y tránsito de escurrimiento (Riccardi et al., 2013, Stenta et al., 2017).

A partir de la explotación del modelo matemático en cada cuenca se han obtenidos mapas de zonas de inundación y de zonas con impacto de riesgo a la vida humana para eventos extraordinarios (Recurrencia de 100 años y 500 años) y en el caso de la cuenca del A° Seco se logró reproducir la mancha de inundación del sector urbano para el evento del 15/01/2017.

Estos resultados son un aporte en la planificación territorial de los recursos hídricos en la zona de estudio.

La revisión del estado del arte indica que no se ha realizado un trabajo similar al aquí presentado en las cuencas en estudio.

Objetivos

El objetivo general del trabajo es la descripción del escurrimiento superficial mediante modelación matemática para la determinación de amenazas por inundaciones y su vinculación con la vulnerabilidad de sus habitantes, en sistemas hídricos del sur de la provincia de Santa Fe. Este caso

corresponde a las cuencas de los arroyos Frías; Seco y Villa Constitución. En particular se presentan manchas de inundación y mapas de riesgo de vida humana en las cuencas referidas.

Materiales y métodos

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).

Implementación del modelo

Los pasos realizados para la implementación del modelo matemático en cada cuenca fueron los siguientes: i) Definición del modelo digital del terreno; ii) Modelación del trazado vial y ferroviario; iii) Modelación de la red hídrica y puentes y iv) Condiciones de borde e iniciales. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las características resultantes de la modelación en cada cuenca.

Tabla 1.- Características del modelo en las tres cuencas.

	A° Seco	A° Frías	A° Villa Constitución
Tam. celda [m]	50	50	50
Celdas Valle	158302	86856	110381
Celdas Río	5598	2682	3356
Vinc. VV	309924	168352	215146
Vinc. VR	9391	4580	4707
Vinc. RR	5586	2651	3315
Vinc. Alc./Pte.	43	35	49
Vinc. Terraplén	1568	2368	3173

En la Tabla 1 se indica el tamaño de la grilla de modelación (Tam. Celda) y la cantidad de: celdas valle; celdas río; vinculaciones entre dos celdas valle (Vinc. VV); vinculaciones entre una celda valle y una celda río (Vinc. VR); vinculaciones entre dos celdas río (Vinc. RR); vinculaciones especiales tipo alcantarillas y puentes (Vinc. Alc./Pte) y vinculaciones tipo terraplén (Vinc. Terraplén).

Parámetros del modelo y escenarios modelados

Para las cuencas de los Arroyos Frías y Villa Constitución; debido a la imposibilidad de realizar la calibración por la inexistencia de datos registrados (tanto de precipitaciones pero en mayor medida de registros de niveles y por lo tanto de caudales) es que se realizó la adopción de 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) en función de valores de esos parámetros calibrados en otras cuencas de la región de características similares y en base a los datos reportados en bibliografía específica.

Se utilizaron lluvias de recurrencia 100 años y 500 años, con una duración de la lluvia total de 5 días; con valores de lámina total de 294 mm y 357 mm y valores de lluvia neta de 198 mm y 253.2 mm para R=100 y 500 años, respectivamente.

Para el caso de la cuenca del A° Seco, se utilizó el evento ocurrido del día de 15/01/2017, con un total de 320 mm precipitados en 10 hs.

Resultados

Mediante la explotación del modelo en las tres cuencas fue posible, con este nivel de avance en la investigación, determinar mapas de inundación en la cuenca completa y mapas de riesgo de vidas humanas para $R = 100$ años y 500 años. Adicionalmente, fue posible determinar para la cuenca del A° Seco la mancha de inundación en el sector urbano de la ciudad asociada al evento del 15/01/2017.

A modo de resumen en la Tabla 2 se presentan los valores de porcentajes de área de inundación para diferentes alturas para R=100 años y porcentaje de la cuenca con riesgo de vida humana.

En la cuenca del A° Seco se reprodujo la mancha de inundación (Figura 1). Los resultados indican un valor de área de inundación observada de 3.94 km²; un valor de área de mancha calculado de 3.34 km² y un valor de área de coincidencia entre mancha observada y calculada de 3.24 km², por lo tanto el porcentaje de reproducción de la mancha observada es del 82 % (relación entre el área de coincidencia entre manchas y área de la mancha observada).

Adicionalmente, se realizó la mancha de inundación asociada a un evento estadístico de 500 años de recurrencia y se compararon la mancha observada y asociada al evento estadístico. Se obtuvo como resultado que solo en el tramo del A° Seco entre el FFCC NCA y la RP21 es superior la mancha de R = 500 años respecto a la observada del día 15/01/2017. En el tramo del A° Seco aguas abajo de la RP21 hasta el Río Paraná y en todo el tramo del canal Savoca la mancha observada es mayor a la mancha asociada a R = 500 años. Adicionalmente esta comparación permite definir lo extraordinario del evento ocurrido el 15/01/2017.

Tabla 2.- Resumen de resultados. R = 100 años.

	Cca A° Frías	Cca A° Villa Constitución	Cca A° Seco
% con $H \geq a 0.30$ m	40	35	42
% con $H \geq a 0.80$ m	9	6	6
% con $H \geq a 1.0$ m	6	4	4
% RVH	7	4	5

% con $H \geq a 0.30$ m: Porcentaje del área total de la cuenca con alturas de agua mayores o iguales a 0.30 m; % con $H \geq a 0.80$ m: Idem para $H \geq a 0.80$ m; % con $H \geq a 1.0$ m: Idem para $H \geq a 1.0$ m; % RVH: Porcentaje del área total de la cuenca con riesgo de vida humana.

Conclusiones

Se ha logrado realizar un avance en la modelación en cuencas no aforadas mediante un modelo matemático físicamente basado. El modelo ha sido implementado con resultados satisfactorios en cuencas de características similares, por lo que se asume que los resultados alcanzados son aceptables para el nivel de información utilizada y disponible en las cuencas en estudio.

Los resultados permitieron conocer el comportamiento hídrico superficial de las cuencas de los A° Frías, Seco y Villa Constitución y definir mapas de inundación pudiendo identificar poblaciones que potencialmente se ven afectadas.

Además la explotación del modelo permitió obtener mapas de riesgo de vida humana, para los escenarios considerados que corresponden a recurrencias de 100 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 de los arroyos.



Figura 1.- Manchas de inundación observada y calculada. Ciudad de A° Seco, Santa Fe, Argentina. Evento 15/01/2017.

Cuenca del A° Seco

Se alcanzaron resultados satisfactorios en términos de reproducción de niveles en puntos característicos (cursos de agua y rutas o FFCC) y en la reproducción de la mancha de inundación de los cursos que rodean a la ciudad de Arroyo Seco.

Los niveles de agua se reprodujeron en 4 puntos (Figura 1; 3 pertenecientes al A° Seco y uno al canal Savoca) con diferencias entre los valores observados y calculados de ± 0.20 m.

La mancha de inundación se reprodujo en un 82% de coincidencia respecto a la observada. El área estudiada es entre el FFCC NCA y la desembocadura en el Río Paraná, que incluye al A° Seco y al canal Savoca.

Futuros estudios incorporarán otras cuencas del sur de la Provincia de Santa Fe y la determinación de mapas de permanencias de aguas y tensiones de corte de fondo; por ejemplo para su utilización en la cuantificación de la erosión general a nivel de cuenca.

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.

Agradecimiento

A la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID-UNR: IING 509 y IING 514. Al Ing. Horacio Garzia, por sus datos brindados de lluvias, sectores afectados y recorrida en la cuenca del A° Seco.

Referencias bibliográficas

Riccardi, G., Stenta, H., Scuderi, C., Basile, P., Zimmermann, E., Trivisonno, F. (2013). "Aplicación de un modelo hidrológico-hidráulico para el pronóstico de niveles de agua en tiempo real", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 1, pp. 83-105.

Stenta, H., Riccardi, G., Basile, P. (2017). "Grid size effects analysis and hydrological similarity of surface runoff in flatland basins" *Hydrological Sciences Journal*. Issue 11, 20 pgs. DOI: 10.1080/02626667.2017.1349315.