

MODELACIÓN HIDROLÓGICA HIDRÁULICA CON INFORMACIÓN DE ACTORES SOCIALES EN LA CUENCA DEL ARROYO LAS TURBIAS. SANTA FE. ARGENTINA

HYDROLOGICAL HYDRAULIC MODELING WITH INFORMATION FROM SOCIAL ACTORS IN THE ARROYO LAS TURBIAS BASIN. SANTA FE. ARGENTINA

Morresi, M.¹; Marcus, R.¹; Gardiol, M.² y Biancotti, E.¹

Resumen

Al delinear políticas de planificación territorial, en sectores que presentan cursos hidrográficos, es necesario estimar los caudales de dichos cursos y delimitar el grado de afectación hídrica producida por la variabilidad y cambios climáticos actuales. Y como consecuencia proyectar, construir o modificar obras hidráulicas o viales que contribuyan a disminuir el riesgo hídrico en el aspecto social y territorial. La mayoría de los cursos principales que integran las cuencas hidrográficas de la provincia de Santa Fe presentan registros hidrológicos sistemáticos sólo en secciones de control con obras hidráulicas importantes (puentes) que generalmente corresponden a las proximidades de la desembocadura de la cuenca. Sin embargo, esta situación no ocurre en los cursos secundarios, lo que imposibilita establecer con certeza caudales especialmente en los sitios intermedios y es en estos casos cuando la habilidad del modelista lo lleva a buscar otras fuentes de información de registro no regular. En efecto, existen registros fotográficos, documentos escritos e informes orales de diferentes crecidas producidas en varias localidades y regiones, los cuales podrían ser utilizados para establecer niveles de desbordes (bankfull), magnitud y grado de afectación de las crecidas. Este trabajo es parte de los resultados de la investigación realizada durante el desarrollo del Proyecto CAI+D 2011: "Aplicación de procesos fotogramétricos terrestres en cuencas hidrográficas sin registros hidrológicos sistemáticos, en el contexto de la variabilidad climática", de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral. El propósito del estudio fue calibrar los parámetros de los modelos hidrológico e hidráulico tomando como datos de referencia registros no sistemáticos de las crecidas. Se presentan los resultados de la calibración simultánea de los modelos considerando como datos observados, las cotas del pelo de agua y anchos de planicie de inundación medidas y obtenidas por procesos topográficos y fotogramétricos en algunas secciones del arroyo. Se simuló tormentas reales ocurridas en los meses de diciembre de 2012 y agosto de 2015 y los resultados de la investigación muestran una concordancia aceptable entre las cotas del nivel de agua observadas y simuladas en diferentes puntos intermedios de control del tramo de propagación seleccionado. Las secciones con estructuras hidráulicas presentaron errores superiores al 1 %. Se destaca la valiosa información de los actores locales, especialmente los productores que hicieron posible la generación de datos de referencia considerados para la calibración de los parámetros de los modelos en los escenarios meteorológicos seleccionados.

Palabras Clave: Modelación hidráulica, calibración, crecidas, actores.

Abstract

When delineating spatial planning policies, in sectors with major streams, it is necessary to estimate the flows of these streams and delimit the degree to which the current climatic variability and change may affect those flows. And, as a consequence, to plan, construct or modify hydraulic structures or roads that contribute to reducing the water risk in the social and territorial aspects. Most of the main streams that make up the watersheds of the province of Santa Fe only have systematic hydrological records in control sections with important hydraulic structures (bridges) that generally correspond to the vicinity of the mouth of the basin. Nevertheless, this situation does not occur in secondary streams, making it impossible to establish with certainty flow rates, especially at intermediate sites, and it is in these cases when the modeler's training leads him to look for other sources of non-traditional records or measurements. Indeed, there are photographic records, written documents and oral reports of different floods produced in several localities and regions that could be used to establish overflows (bankfull), magnitude and degree floods damage. This work comprises part of the results of the research carried out during the development of the CAI+D 2011 project: "Application of terrestrial photogrammetric processes in watersheds without systematic hydrological records, in the context of climatic variability", Faculty of Engineering and Water Sciences, Litoral National University. The purpose of the study was to calibrate the parameters of the hydrological and hydraulic models taking non-systematic records of floods as reference data. The results of the simultaneous calibration of the models are presented, considering as observed data, the water levels and the floodplane widths measured and obtained by topographic and photogrammetric processes in some sections of the stream. Real December 2012 and August 2015 Storms were simulated and the results of the investigation show an acceptable concordance between the water level observed and simulated in different intermediate control points of the of the chosen stream routing. The sections with hydraulic structures presented errors higher 1%. It highlights the valuable information of the local actors, especially the agricultural producers who made it possible to generate reference data considered for the calibration of the model parameters in the selected meteorological scenarios.

Keywords: Hydraulic modeling, calibration, floods, actors.

1 Departamento Hidrología.

2 Departamento Cartografía y Agrimensura. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Universidad Nacional del Litoral. Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000). Santa Fe, Argentina.
Tel: (+54)(0342)4575233/34. Fax: (+54)(0342)457-5224, mariadelvallemorresi@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Los modelos matemáticos se utilizan para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca, mediante la representación de las condiciones topográficas e hidráulicas de la realidad.

El desarrollo de paquetes de software para simulación hidrológica es muy amplio, disponiéndose en la actualidad de muchos modelos de aplicación universal, con validez internacional y algunos de versión libre. Los más reconocidos son desarrollados por grupos de Ingeniería Hidrológica como HEC (Hydrologic Engineering Center, United States Army Corps of Engineers), MIKE (Danish Hydraulic Institute), SWMM (Storm Water Management Model, EPA), SWAT (Soil y Water Assessment Tool, Texas A&M University, USA), y ISIS FLOW (Halcrow Group).

Una de las preocupaciones más frecuentes de los hidrólogos es la calibración de los modelos y el problema es la carencia de datos observados. Los datos para calibrar los parámetros de los modelos matemáticos generalmente provienen de las mediciones hidrológicas sistemáticas.

Cuando no hay mediciones el gran desafío es encontrar opciones para estimar datos de referencia para calibrar los parámetros de esos modelos y luego verificarlos o validarlos. Estas estimaciones surgen de la interrelación de diferentes técnicas e equipamientos (fotogrametría, teledetección, laser aerotransportados, levantamientos topográficos con GPS, estación total, etc.), como se presentan en los trabajos de Wenchao (2010), Chandler et al. (2008), Wackrow et al. (2008) y Samad et al. (2010).

De acuerdo a Palacio et al. (2010), los modelos numéricos deben ser calibrados y verificados antes de ser puestos en funcionamiento. No hay un procedimiento ampliamente aceptado para llevar a cabo esta tarea ya que la calibración depende de varios aspectos como la disponibilidad de datos, las características del cuerpo de agua y sobre todo de la percepción, opinión y experiencia de los modeladores. La combinación de complejidad en los parámetros numéricos y físicos, así como la misma estructura del modelo hidrodinámico y los errores en las mediciones de campo, son factores que condicionan la confiabilidad de los resultados.

Cuando hay carencia de registros sistemáticos el hidrólogo debe recurrir a otras alternativas para calibrar y validar los modelos, que permitan disminuir la incertidumbre de los resultados. Especialmente la definición de las condiciones de borde de los modelos hidrodinámicos requiere de información precisa de cotas hidrométricas y de la topografía del tramo. Para determinar niveles de inundación los hidrólogos usualmente recurren a rastros de niveles máximos alcanzados por las crecidas recopilan datos de lugareños y recaban datos de niveles junto

a propietarios afectados, baqueanos de la zona y personal de los organismos públicos. (CFI, 2001; MASPyMA, 2009; SIPFE, 2007).

En la República Argentina, el Ministerio de Planificación Federal de la Nación (2008), detalla que son preocupantes los indicios del cambio climático y se están haciendo sentir sobre los recursos hídricos.

Calcagno et al (2000) especifican que en la República Argentina no existe un banco de datos y sistema de información integral sobre los recursos hídricos, tanto a nivel nacional como en las provincias, que coordine el acceso a las informaciones existentes, de las distintas jurisdicciones, dé sustento a la gestión y facilite la comunicación. Detallan que en realidad, no se dispone de una red sino de un conjunto de estaciones de medición con fines sectoriales o locales operados por diversos organismos no coordinados que recogen información sobre los recursos hídricos y en donde en muchas provincias las capacidades de inspección, mantenimiento y operación de estaciones y de la información son limitadas.

En el informe del taller nacional organizado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2007a) y el Consejo Hídrico Federal (COHIFE) para formular un Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos, los informes de las distintas jurisdicciones del país manifestaron como uno de los problemas que requiere soluciones es la falta de redes de información básica.

Específicamente en el informe realizado en la provincia de Santa Fe, para formular el Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, 2007b) se destaca que para lograr un plan de gestión integrada de los recursos hídricos provinciales es necesario implementar una red de monitoreo. Esta situación se confirma al intercambiar opinión con diferentes profesionales relacionados a los recursos hídricos que desempeñan su actividad en diferentes organismos públicos, los cuales manifiestan que en muchas oportunidades se realizan estimaciones de caudales y cálculos hidráulicos con escasos datos hidrométricos.

Ante esta problemática, se generó un proyecto de investigación que utilice información no sistemática (fotografías, alturas y anchos de afectación, etc.) proporcionada por actores sociales (productores, intendentes, representantes técnicos, instituciones intermedias, etc.) para la calibración de modelos matemáticos. En este trabajo se muestran los resultados de la calibración simultánea de los modelos hidrológico e hidráulico contando como datos observados, las cotas del pelo de agua y anchos de planicie de inundación medidas en campo y las obtenidas por topografía y fotogrametría en algunas secciones del arroyo. Se utilizaron las tormentas reales ocurridas en diciembre de 2012 y agosto de 2015.

METODOLOGÍA

Descripción del lugar de estudio e información oficial disponible

El arroyo Las Turbias es un afluente del arroyo Carrizales-Monje, tiene una longitud de 81 km y la cuenca hidrográfica ocupa una superficie aproximada de 1000 km². Abarca los departamentos Belgrano (distritos, Las Rosas y Bouquet), Iriondo (distrito Clason), San Jerónimo (distritos San Genaro y Díaz) y San Martín (distritos María Susana y Los Cardos), entre 61°55'48" y 61°09'54" de longitud oeste y 32°27'18" y 32°16'00" de latitud sur, como muestra la Figura 1 (Morresi et al, 2014).

En su extremo aguas arriba, -cuenca alta-, el arroyo recibe las aguas de una importante red de canales y bajos naturales (paleocañadas) correspondientes principalmente a los distritos de María Susana, Bouquet y Las Rosas. Esta zona se caracteriza,

además, por su escasa pendiente (menor al 1%), a lo que se le suma, la presencia de una amplia red vial que juegan un rol muy importante en el sistema de drenaje ya que, por un lado interrumpen el escaso escurrimiento debido a los altos terraplenes (esto ocurre en general en las rutas principales) y en otras ocasiones hacen de conductores por encontrarse a igual o menor cota que los terrenos lindantes (en general los caminos comunales).

La zona media de la cuenca (comprendida entre las rutas provincial N° 13 y nacional N° 34 aproximadamente), por el contrario, tiene pendientes importantes, que llegan en algunas zonas al 3% y no posee los rasgos fisiográficos mencionados para la alta cuenca, por lo que no presenta problemas de anegamiento. Se han contabilizado por lo menos 21 cruces viales en este tramo, incluyendo la ruta nacional N° 34, el ferrocarril y la traza vieja de la ruta nacional N° 34. (Palman, 2012).

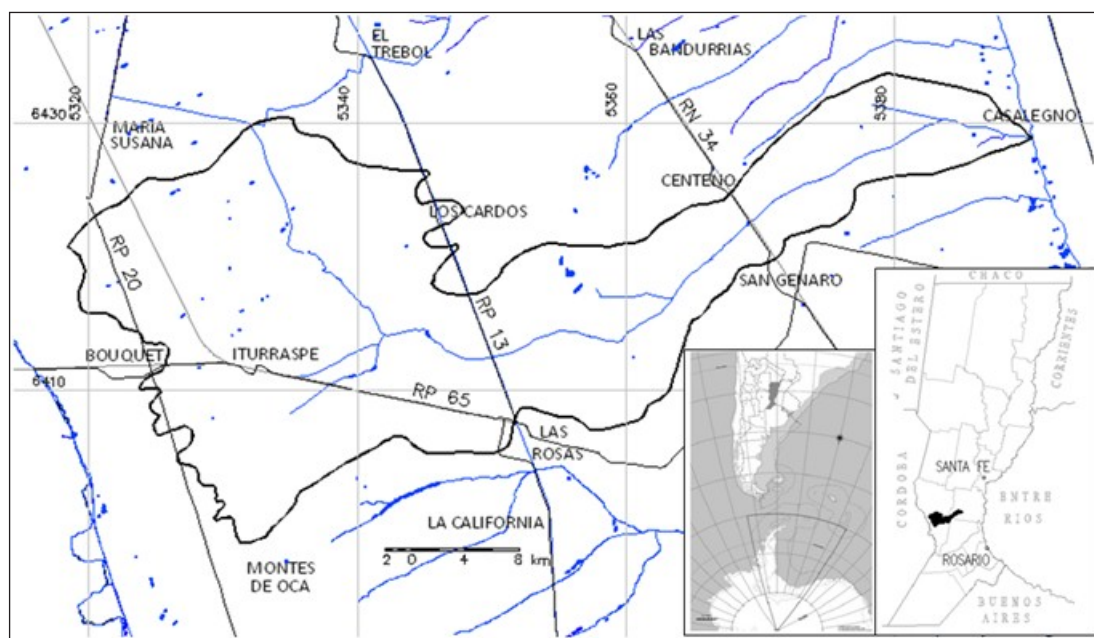


Figura 1.Ubicación cuenca del Arroyo Las Turbias

La zona baja de la cuenca, comprendida entre la ruta nacional N° 34 y la desembocadura en la Cañada Carrizales, es también una zona con bajas pendientes, aunque no inferiores a las de la alta cuenca. Presenta bajos de importantes dimensiones (anchos y largos) que van paralelos al cauce principal en algunos casos y en otros han sido canalizados hacia el este. Esta zona, debido a los procesos de hidromorfismo, presenta suelos de menor calidad para la agricultura.

La cuenca no posee registros históricos en ninguna sección del arroyo. Solamente en el mes de septiembre del año 2003 y como producto de un Proyecto de Extensión de Interés Social (FICH-UNL, 2002-2004): "Minimización del impacto de las inundaciones y sequías en la cuenca del Arroyo Las Turbias", se instaló un limnógrafo ubicado aguas

arriba de la ruta nacional N° 34 que cuenta con registros -casi continuos- desde el 5/5/2004 hasta el 22/2/2008, con faltante de datos debido a fallas en el mecanismo de registro. También se cuenta con algunos aforos en aguas bajas. Posteriormente el Comité de Cuenca del arroyo Las Turbias lo reemplazó por un instrumento digital, pero hasta diciembre 2016 no había personal preparado para operar este instrumento.

Como base cartográfica se utilizó un mapa digital que contiene las localidades, rutas principales y secundarias, caminos comunales, límites políticos, ferrocarriles, topónimos, hidrografía, límite de cuenca y subcuencas. Dicha información fue obtenida en el Servicio de Catastro e Información Territorial (SCIT) y en el Ministerio de Infraestructura y Transporte (MIT) (ex. Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y

Medioambiente, MASPyMA) de la provincia de Santa Fe, que fue contrastada con las cartas topográficas confeccionadas por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en escala 1:50000 (Morresi et al, 2014).

Se dispuso de perfiles topográficos transversales y longitudinales con obras de arte, distanciados entre 400 m y 1200 m, relevados por la Secretaría de Recursos Hídricos del MIT en planos formato papel y formato digital desde la progresiva 0 m en la confluencia del arroyo Las Turbias y el arroyo Carrizales-Monje hasta la progresiva 68626 m próxima a la laguna de Bossio, al sur de la ruta provincial N° 44-S.

Modelación matemática de la cuenca del arroyo Las Turbias

Para implementar el modelo hidrodinámico HEC-RAS V4.1 (United States Army Corps of Engineers, 2014) se seleccionó el tramo comprendido entre las progresivas aguas arriba (AA) 68626 m (última progresiva con perfil transversal relevado topográficamente) y las progresivas aguas abajo (aa) 14400 m, para no tener influencias de remanso del arroyo Carrizales-Monje.

Debido a la carencia de registros en las condiciones de borde y secciones del tramo, para implementar el modelo hidrodinámico, se generaron hidrogramas de referencia con el modelo hidrológico HEC-HMS V 4.0 (United States Army Corps of Engineers, 2014), en las progresivas mencionadas y en intermedias del tramo como aportes de cuencas laterales al curso principal.

La calibración de los parámetros de los modelos contempló un proceso iterativo simultáneo con ambos modelos (hidrodinámico e hidrológico).

En los puntos de control para la calibración se tuvo en cuenta distintos tipos de información (marcas de aguas, anchos de inundación, fotografías) obtenidas de diferentes fuentes (productores, instituciones agropecuarias, medios de prensa). Toda la información fue medida topográficamente para obtener las cotas de referencias. En algunos casos, donde se disponía de varios valores altimétricos en un mismo lugar o progresiva, se contrastaron los mismos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tormentas seleccionadas para calibrar y validar los modelos

Se dispuso de información pluviométrica diaria histórica de distintas fuentes oficiales y particulares. De instituciones oficiales se recopiló información de: Agricultores Federados Argentinos (AFA), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y Dirección de Provincial de Comunicaciones (DPC).

Como fuente de información privada se relevó en territorio la percepción de los productores acerca de las características y efectos de los últimos

fenómenos intensos que ocasionaron problemas de inundaciones en toda la cuenca y algunos brindaron información pluviométrica de registros propios como también registros fotográficos u otra información que contribuya con la selección de los eventos meteorológicos.

La información pluviométrica de los productores permitió completar la información oficial y modificó sensiblemente la distribución espacial de la precipitación en la cuenca y arrojaron un aceptable análisis de consistencia (Biancotti et al, 2015). La elección de los eventos reales a simular se vinculó a la cantidad y calidad de información de las crecidas significativas registradas por los productores e instituciones locales. Como característica regional las Figuras 2 y 3 muestran las isohietas mensuales de agosto de 2015 y diciembre de 2012 obtenidas con la precipitación de las estaciones intervinientes en la cuenca. Para el cálculo y trazado de las isohietas se utilizó una técnica de interpolación de diferencia finita iterativa. Es, esencialmente, una técnica de spline de lámina delgada discretizada del programa computacional ArcGIS en la versión 10.2.1, generando una capa de ubicación de estaciones sobre un modelo digital de terreno (DEM) del mismo software.

Si se analizan las Figuras 2 y 3, donde las isohietas muestran el monto mensual precipitado, el escenario de 2012 fue más húmedo, de características de precipitación continua, dado que en la cuenca llovía desde el mes de octubre, por lo tanto, la humedad antecedente fue mayor en este caso. En el escenario de agosto de 2015 no se registraron precipitaciones antecedentes por lo que la cuenca poseía una condición más seca al momento de ocurrir la tormenta. Para la calibración de los parámetros de los modelos se seleccionó la tormenta del 5 al 14 de agosto de 2015, porque fue posible ir a campo y disponer de mediciones topográficas de las alturas de agua y anchos de planicie inundada, datos observados necesarios para el modelo hidrodinámico. Para validar los modelos se utilizó la tormenta del 14 al 20 de diciembre de 2012.

Las Figuras 4 y 5 muestran los hietogramas de las estaciones oficiales y de productores ingresados como series de tiempo y ponderados por el método de Thiessen en el modelo hidrológico HEC-HMS. Se observa que los mayores montos pluviométricos de la tormenta de agosto de 2015 se concentran entre el 8 y el 10 de agosto. No hubo registros pluviométricos en las estaciones Bouquet y Montes de Oca, siendo las precipitaciones máximas diarias menores en promedio de 20 mm respecto de las del escenario 2012.

Mientras que para la tormenta de diciembre de 2012 los mayores montos pluviométricos se concentran entre el 16 y 20 de diciembre y según la información de los diferentes productores consultados, la altura de agua máxima alcanzada ocurrió entre el 19 y 20 de diciembre.

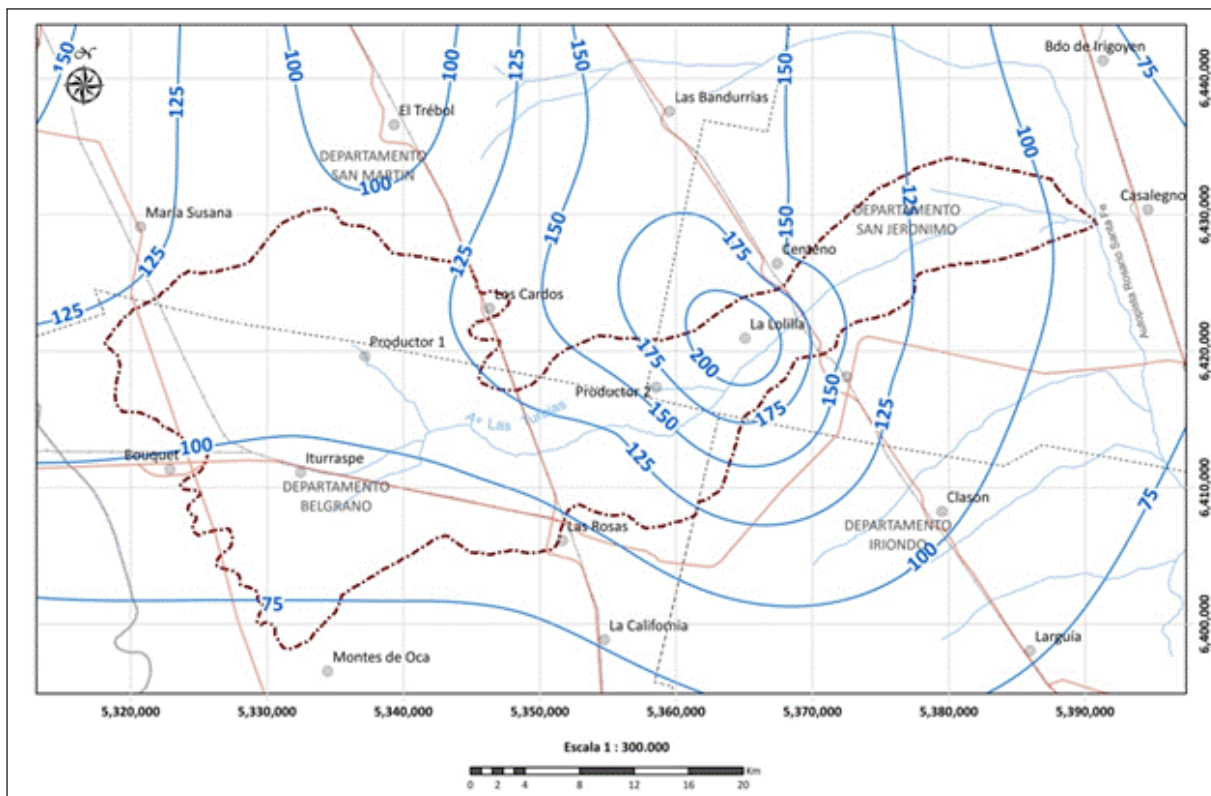


Figura 2. Isohietas (mm) del mes de agosto de 2015

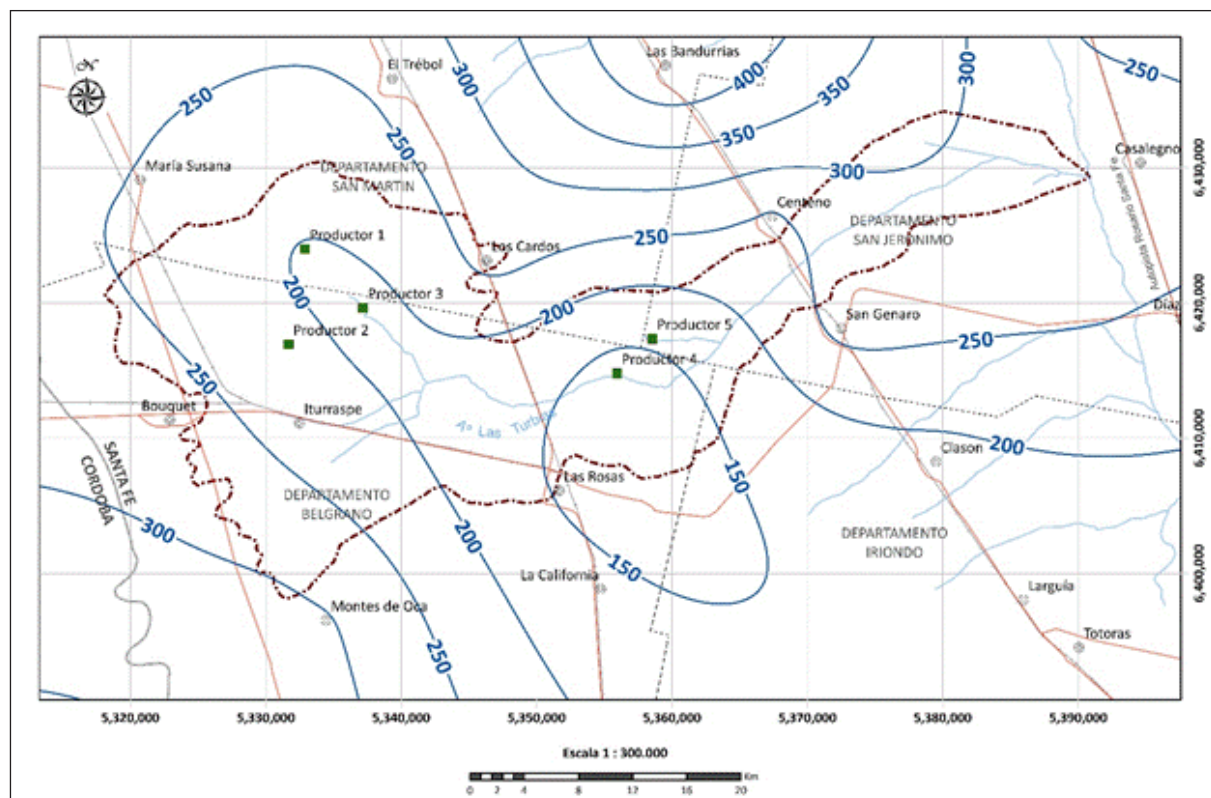


Figura 3. Isohietas (mm) del mes de diciembre de 2012

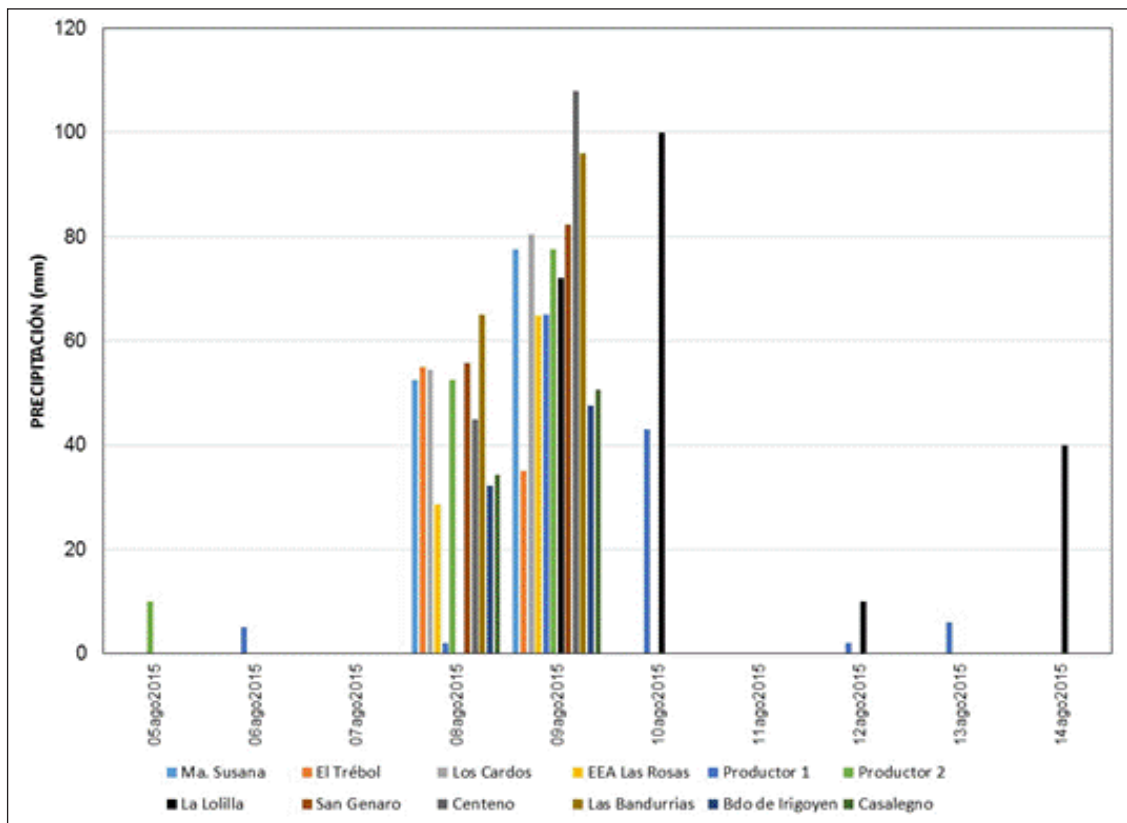


Figura 4. Hietogramas (mm) de las estaciones. Tormenta agosto 2015

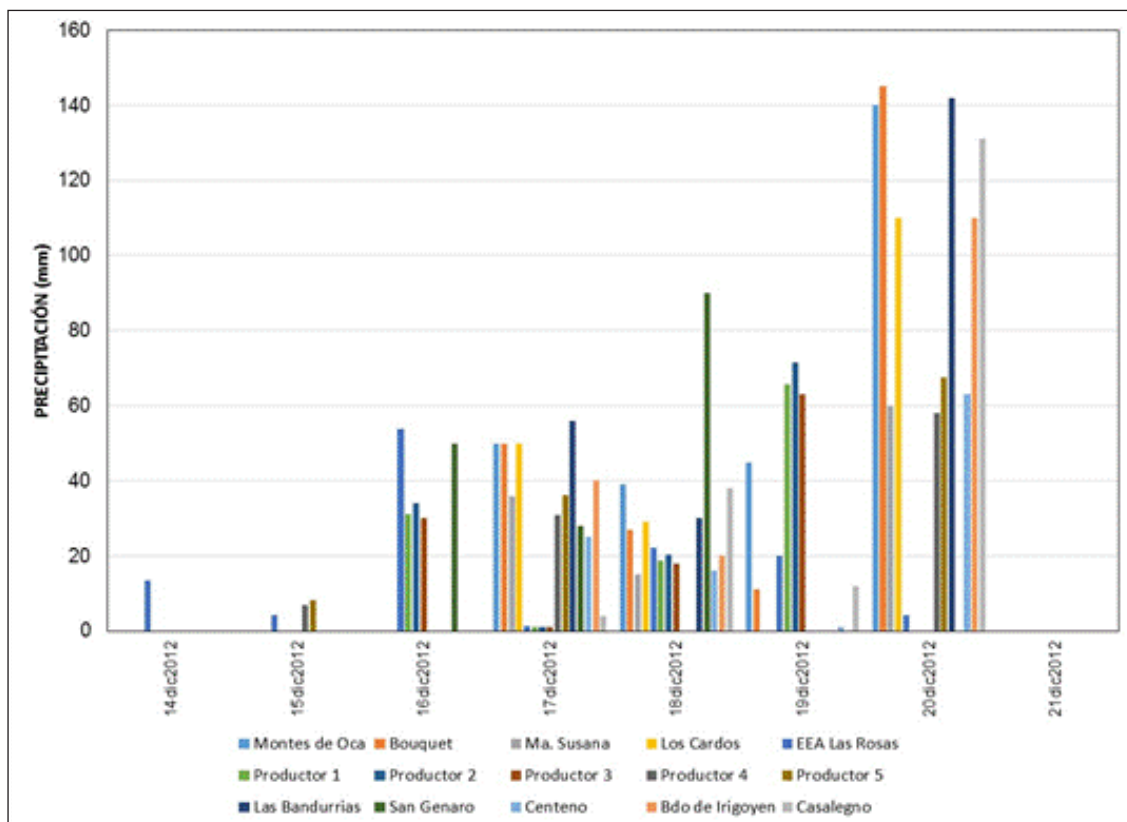


Figura 5. Hietogramas (mm) de las estaciones. Tormenta diciembre 2012

Modelación hidrológica con HEC-HMS

Para la discretización de la cuenca se consideraron los paleocauces extendidos al oeste de la cuenca superior que representaron la trayectoria del escurrimiento natural, resultando subcuencas más alargadas que en las cuencas media y baja, principalmente en la margen derecha del arroyo. La Figura 6 muestra la topología de la cuenca del arroyo

Las Turbias utilizada para implementar el modelo hidrológico.

Para la subdivisión de la cuenca además de las características hidrológicas del escurrimiento de la cuenca se tuvo en cuenta la localización de información disponible para definir los puntos de control empleados en la calibración.

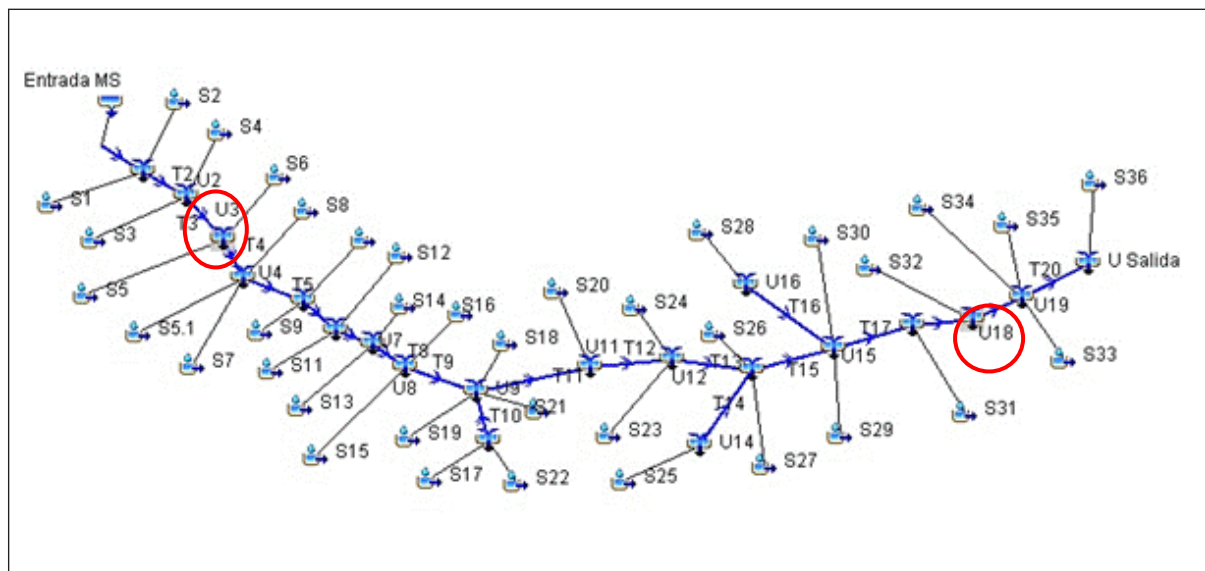


Figura 6. Topología de la cuenca en el modelo HEC- HMS

Las características físicas de las subcuencas se calcularon de la base cartográfica disponible en formato digital, a través de un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD), que permite trazar longitudes de escurrimiento y medir distancias, superficies, entre otras dimensiones.

Las pendientes medias de las subcuencas se calcularon promediando las pendientes de los diferentes recorridos del agua según la topografía superficial.

Para calcular el tiempo de concentración de las subcuencas se promediaron diferentes métodos: Kirpich, Témez, Giandotti, Dooge (Vélez Upegui y Botero Gutiérrez, 2010; Dooge, 1973; Chow, 1994), que tienen en cuenta la longitud de escurrimiento, pendiente o desnivel y el área de la subcuenca.

La Tabla 1 presenta las características físicas de las 36 subcuencas y 20 tramos de propagación.

La simulación matemática hidrológica se realizó adoptando del HEC-HMS los siguientes algoritmos:

- Modelo meteorológico: calcula el hietograma medio mediante la ponderación por polígonos de Thiessen.
- Pérdidas por infiltración: Método de Curva Número (CN) del S.C.S.

- Transformación lluvia-caudal por el método del hidrograma unitario de Clark.
- Propagación en tramos de cauce: Método de Muskingum Cunge.

Los datos de entrada son diarios y el paso de tiempo de simulación del modelo es $dt = 1$ h.

Para propagar por el método de Muskingum Cunge se poseían los datos de perfiles transversales del cauce principal, relevados por el MIT. En el caso de afluentes los perfiles se reconstruyeron con las curvas de nivel de la base cartográfica disponible.

Parámetros del modelo hidrológico – Condición inicial

La simulación hidrológica generó los hidrogramas de referencia iniciales del tramo de propagación seleccionado para el modelo hidrodinámico y corresponden a las uniones U3 que es la condición de borde de AA y la U18 como condición de borde de aa (Figura 6). El hidrograma de entrada al tramo (en U3) para el escenario 2012 se muestra en la Figura 7 y la Figura 8 presenta el hidrograma de salida del tramo (U18) para la tormenta de agosto de 2015.

Tabla 1. Características físicas de las cuencas y de los tramos

Subcuenca	Área [km ²]	Pendiente media	Tiempo de concentración [hs]	Tramo	L (km)	Δh [m]	Pendiente
1	28,920	0,00124	11,23	T1	2,62	1,94	0,0007
2	7,192	0,00167	4,86	T2	1,72	0,79	0,0005
3	36,382	0,00086	10,07	T3	2,97	1,33	0,0004
4	9,050	0,00105	6,12	T4	3,26	1,45	0,0004
5	38,928	0,00083	11,06	T5	1,54	0,54	0,0003
5.1	3,508	0,00203	3,09	T6	2,66	2,60	0,0010
6	17,684	0,00084	8,80	T7	2,13	2,05	0,0010
7	48,135	0,00080	9,21	T8	1,84	1,84	0,0010
8	17,592	0,00050	9,96	T9	1,61	1,57	0,0010
9	1,208	0,00185	2,49	T10	0,97	1,45	0,0015
10	19,540	0,00095	8,52	T11	5,73	4,44	0,0008
11	27,554	0,00141	7,90	T12	3,12	4,33	0,0014
12	26,699	0,00088	6,88	T13	10,80	18,17	0,0017
13	25,962	0,00132	8,29	T14	10,30	30,00	0,0029
14	3,435	0,00149	3,21	T15	4,43	4,39	0,0010
15	46,469	0,00115	9,48	T16	5,04	6,89	0,0014
16	17,174	0,00164	4,48	T17	8,28	7,20	0,0009
17	31,431	0,00184	8,00	T18	9,58	9,49	0,0010
18	4,174	0,00347	3,35	T19	6,99	1,42	0,0002
19	4,188	0,00395	3,46	T20	6,78	14,50	0,0021
20	24,669	0,00385	5,24				
21	0,885	0,00671	2,28				
22	68,209	0,00216	9,82				
23	70,288	0,00233	10,29				
24	3,374	0,01010	1,85				
25	23,834	0,00258	5,59				
26	22,088	0,00544	6,24				
27	20,321	0,00453	5,05				
28	54,850	0,00407	6,77				
29	45,838	0,00489	5,78				
30	22,951	0,00182	6,17				
31	54,758	0,00175	8,53				
32	41,459	0,00185	8,19				
33	18,153	0,00055	9,30				
34	40,888	0,00115	10,03				
35	19,382	0,00027	9,21				
36	24,141	0,00286	5,79				
Área Total (km ²)	971,312						

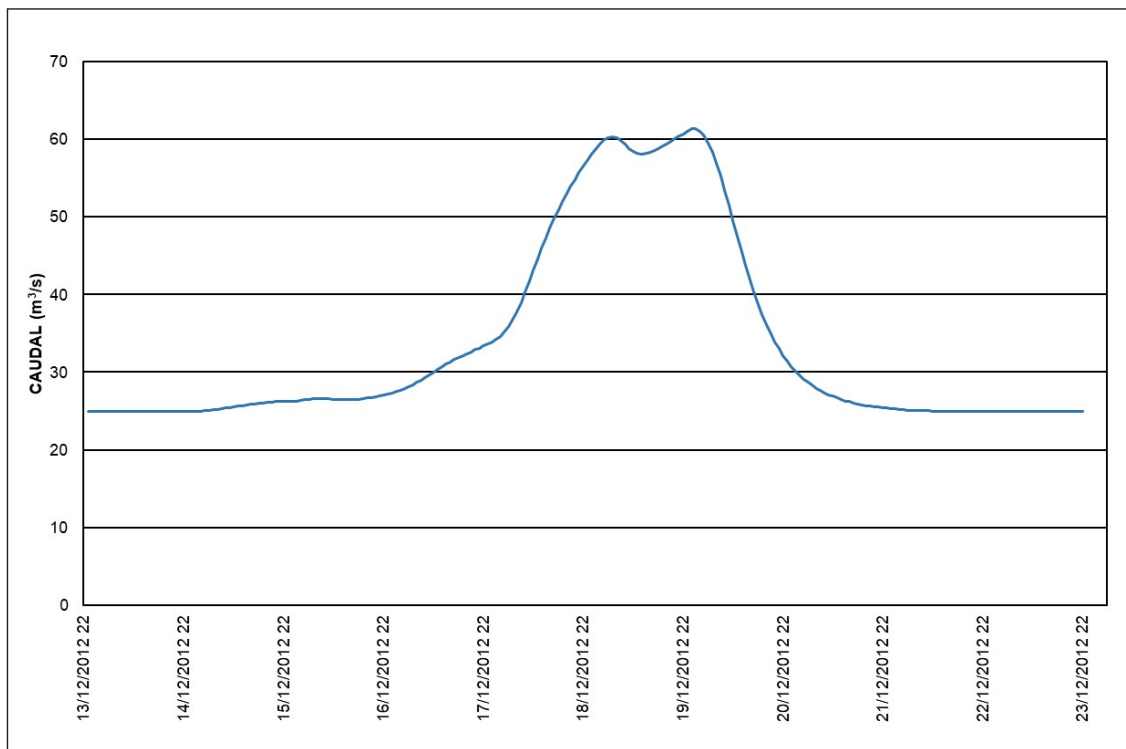


Figura 7. Caudal (m³/s) de entrada al tramo en U3. Diciembre de 2012

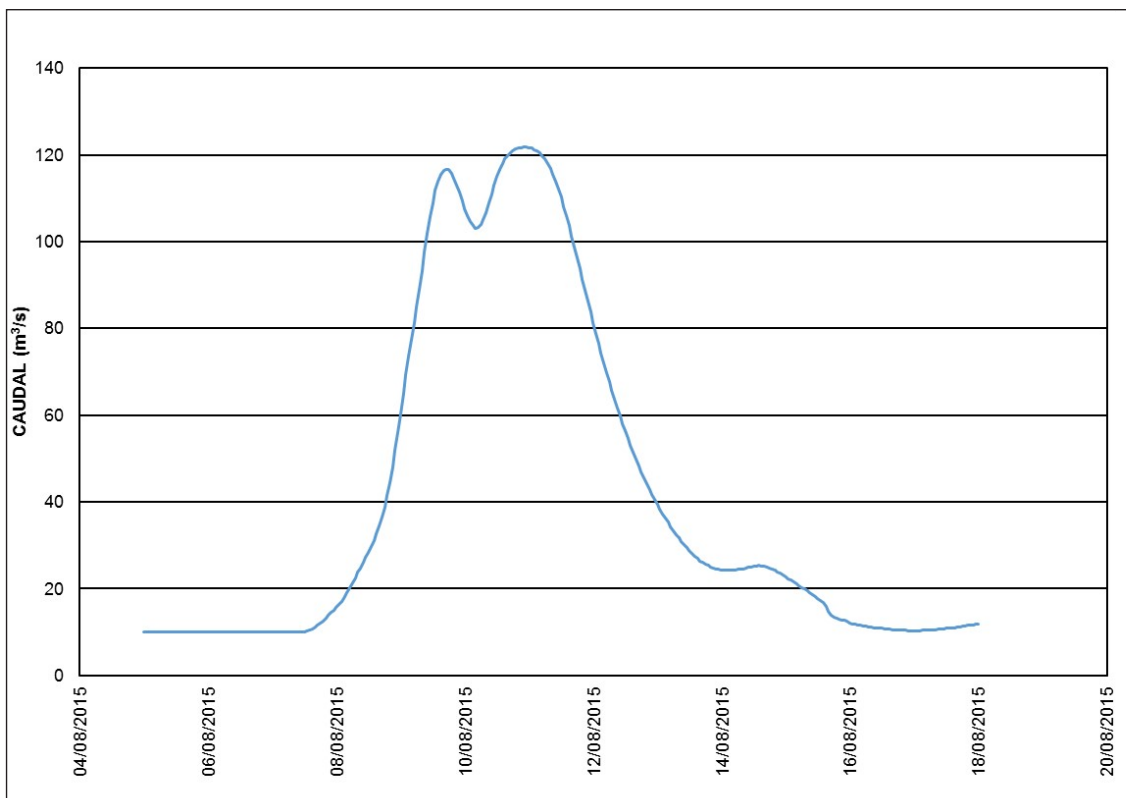


Figura 8. Caudal (m³/s) de salida del tramo en U18. Agosto de 2015

Los valores de CN se adoptaron inicialmente entre 55 y 62 ponderando entre pasturas y un porcentaje de praderas con tipo de suelo B (tasa de infiltración media) para el escenario de 2015 y cambiando al suelo de tipo D (tasa de infiltración muy baja y alto potencial de escurrimiento) con un aumento en valores de CN del 10 a 20% promedio para el escenario de

2012. Los coeficientes de almacenamiento R de Clark se consideraron entre 1 y 1,5 veces el tiempo de concentración. Las rugosidades de cauce n_c y de planicie n_p para los perfiles de Muskingum Cunge del método de propagación fueron de 0,035 y 0,08 respectivamente. Las mismas rugosidades iniciales se utilizaron en los perfiles del tramo en el modelo HEC-RAS.

Para el escenario de 2012 se consideró un caudal de entrada de la cuenca superior a la altura de la localidad de María Susana de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ como aporte hídrico aguas arriba que corresponde a una recurrencia entre 2 años y 5 años según el informe técnico de Siri (2015), porque desde el mes de octubre en la región ocurrieron fenómenos de precipitación generalizados que generaron condiciones de humedad antecedentes y anegamientos previos a la fecha del evento de validación seleccionado.

Modelación hidráulica con HEC-RAS

Como se mencionó anteriormente el arroyo Las Turbias no posee registros de series hidrométricas continuas, por lo que se decidió recurrir a productores y otras instituciones intermedias para recolectar información de diferentes características como marcas de niveles máximos de agua, anchos de planicie inundada, fotos, relatos que permitan

determinar las cotas hidrométricas para reproducir las crecidas de 2012 y 2015 y calibrar los parámetros de los modelos (Morresi et al, 2014).

Para implementar el modelo hidrodinámico lo más importante es disponer de buena calidad de la topografía (perfiles transversales del tramo). Con respecto a este punto es necesario aclarar que los perfiles transversales medidos y proporcionados por el MIT en promedio abarcaban un ancho de 20 m, insuficiente para propagar las crecidas seleccionadas. Al no disponerse de mediciones topográficas laterales al arroyo, los anchos de planicie de inundación de los perfiles transversales se extendieron hacia ambos lados del cauce alcanzando un ancho total promedio de 1000 m, interpolando entre las curvas de nivel regionales de la base cartográfica disponible. La Figura 9 muestra un perfil representativo del tramo de propagación desde margen izquierda (MI) a margen derecha (MD).

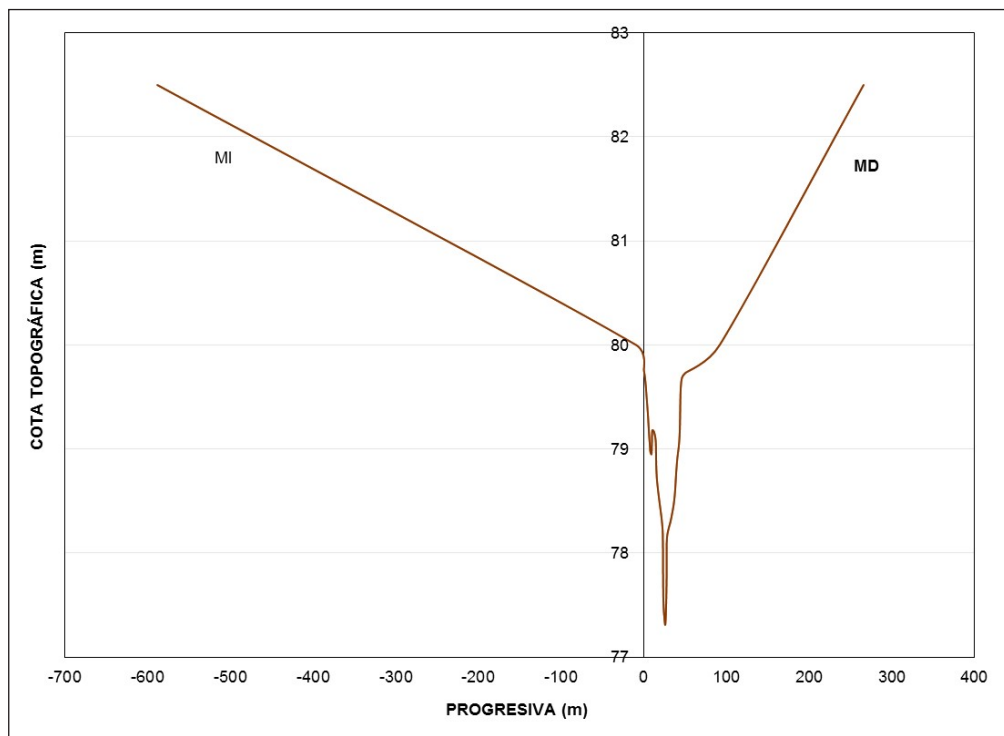


Figura 9. Sección transversal cauce y planicie.

Los perfiles transversales y las características estructurales de las obras hidráulicas existentes (alcantarillas y puentes) se representaron en el modelo geométrico del HEC-RAS en las progresivas correspondientes del tramo de propagación. La geometría del tramo requirió la interpolación de perfiles cada 100 m (Figura 10), que el modelo realiza automáticamente y denota con un asterisco (*) para diferenciarlos de los perfiles reales (datos).

Con las condiciones de borde AA (progresiva 68626 m), de aa (progresiva 14400 m) y laterales a lo largo del tramo de propagación (aportes laterales) obtenidos como hidrogramas de referencia con el modelo HEC-HMS, se corrió el modelo hidrodinámico, adoptando inicialmente rugosidades de Manning de 0,035 para cauce (n_c) y de 0,08 para planicie de inundación (n_p).

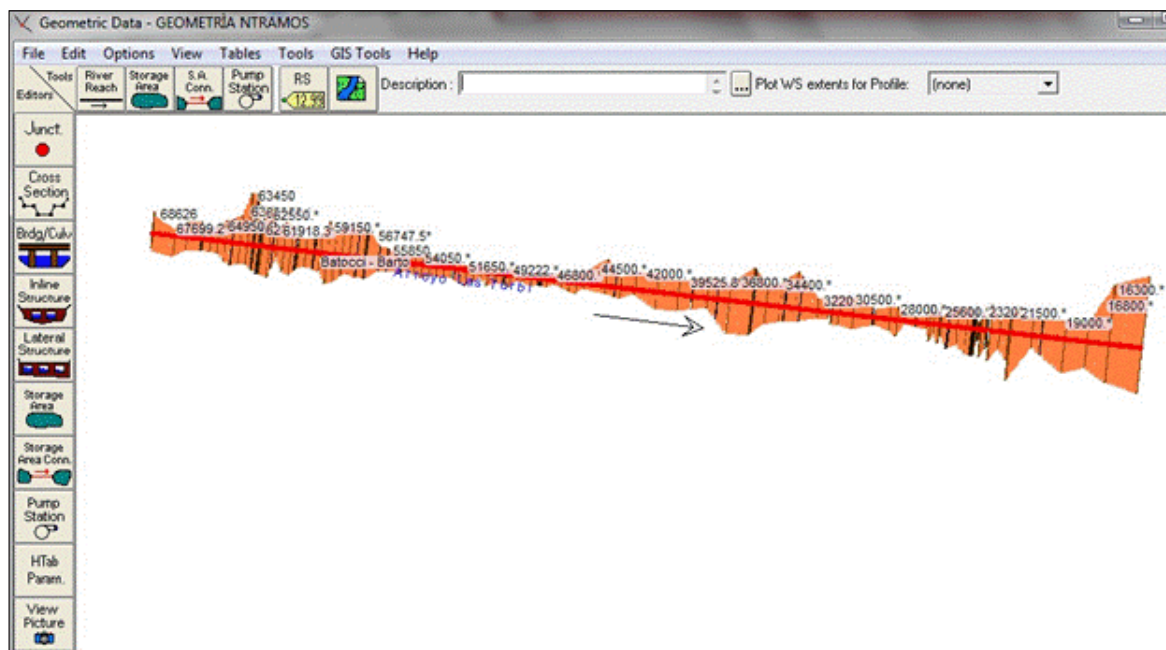


Figura 10. Tramo de propagación. Modelo HEC-RAS

Los datos hidrológicos de entrada son diarios, el tiempo de simulación del modelo HEC-RAS fue de 1 hora ($dt=1h$). La propagación en el tramo se realizó en la condición de “unsteadyflow”, es decir flujo impermanente. Debido a problemas de inestabilidad numérica del modelo, la condición de borde aguas abajo se modificó a la condición de profundidad normal con pendiente media del tramo.

Calibración y verificación de los modelos

Para la etapa de calibración se consideró el escenario de agosto 2015 dado que se pudo recorrer la cuenca y relevar información de interés próxima al pico de la crecida. Con los datos de las fotografías, marcas máximas de agua e información cualitativa brindada por los productores y las mediciones topográficas realizadas en campo se determinaron las cotas hidrométricas máximas y anchos de planicies inundadas en algunas progresivas intermedias del tramo. Debido a la incertidumbre de datos de los anchos de planicies de inundación de los perfiles transversales, la calibración de los parámetros del modelo HEC-RAS se realizó respecto de las cotas hidrométricas de inundación (cotas del pelo de agua) consideradas como únicos datos observados confiables.

La calibración de los modelos, se realizó un proceso iterativo de ajuste simultáneo. El proceso de ajuste por prueba y error comienza por el modelo hidráulico, las modificaciones de los parámetros se introducen en el modelo hidrológico, generando otros hidrogramas de referencia que son las nuevas condiciones de borde AA, aa y laterales en el modelo hidráulico repitiéndose el proceso hasta lograr el ajuste aceptable de las cotas hidrométricas simuladas en el modelo hidráulico con las observadas. La rugosidad

de planicie np fue modificada por tramos, siendo el parámetro de calibración más sensible por ser predominante respecto de la rugosidad de cauce nc . En el método de propagación del modelo HEC-HMS se consideraron las mismas modificaciones de np de los perfiles transversales ajustados en HEC-RAS. El CN se modificó para complementar la variación de los caudales generados por las subcuencas en los puntos de control seleccionados, comparándolos con los caudales calculados en el modelo hidrodinámico.

Los valores de CN luego de la calibración son en promedio 55 para el escenario de simulación 2015 y se corresponden con humedad antecedente en Condición II (suelos con capacidad de campo) y Grupo Hidrológico B con potencial de escurrimiento medio, variando la cobertura vegetal entre cultivo en hileras, pastizales y praderas. Para el escenario 2012, los valores de CN se aumentaron entre 70 y 75 que corresponde a la Condición III (saturado) (USDA, 2004; Fatorelli y L Fernández, 2011).

Los coeficientes de rugosidad luego de la calibración para planicies de inundación están en el rango de 0,05 a 0,13. Los valores de np mayores a 0,1 son coeficientes que representan planicies de inundación con árboles y vegetación densa y corresponden a los tramos cercanos a los puentes principales de las rutas provincial N° 13 (RP 13) y nacional N° 34 (RN 34), (Arcement y Schneider, 1989).

La verificación se realizó para el escenario de diciembre de 2012, utilizando la misma geometría en ambos modelos y realizando el mismo proceso iterativo. En este escenario debieron aumentarse los valores de CN debido a la condición más húmeda de la cuenca por precipitaciones antecedentes. Las Tablas 2 y 3 muestran los errores de la calibración y validación del modelo hidrodinámico, calculados respecto a las cotas del pelo de agua observadas.

Tabla 2. Resultados de la calibración. Escenario agosto de 2015

Progresiva (m)	Cota pelo agua observada (m)	Cota pelo agua calibrada (m)	Error cota (m)	Error relativo cota (%)
65850	100,93	101,04	-0,11	-0,11
63850	100,13	100,74	-0,61	-0,61
62250	99,46	99,28	0,18	0,18
54994	92,31	92,31	0	0,00
51035	88,22	88,45	-0,23	-0,26
47485 RP 13	84,9	86,22	-1,32	-1,55
37678	68,82	68,69	0,13	0,19
33167	62,86	62,78	0,08	0,13
29149	59,45	59,42	0,03	0,05
23657 RN 34	56,09	55,89	0,20	0,36
22856	53,57	53,66	-0,09	-0,17
17300	48,94	48,88	0,06	0,12

Tabla 3. Resultados de la validación. Escenario diciembre de 2012

Progresiva (m)	Cota pelo agua observada (m)	Cota pelo agua calibrada (m)	Error cota (m)	Error relativo cota (%)
65850	101,18	101,26	-0,08	-0,08
63850	100,077	100,73	-0,65	-0,65
63152	99,28	100,03	-0,75	-0,76
51035	88,36	88,69	-0,33	-0,37
47485 RP 13	87	86,54	0,46	0,53
43265	79,65	78,57	1,08	1,36
41100	75,06	74,98	0,08	0,11
39069	72,26	72,31	-0,05	-0,07
23657 RN 34	55,8	56,58	-0,78	-1,40
22200	53,54	53,49	0,05	0,09
15300	46,41	46,58	-0,17	-0,37

Algunas progresivas del escenario de validación (2012) son diferentes del escenario de calibración (2015) ya que depende de los puntos de control de los que se disponía de datos observados.

Los errores de las cotas hidrométricas varían entre 0 m y 1,32 m para el escenario de calibración 2015 mientras que para el escenario de validación 2012 el rango de errores fue entre 0,05 m y 1,08 m, tomados en valor absoluto.

En la crecida de 2015 la RP 13 presenta el mayor error respecto de las demás progresivas analizadas

(mayor al 1 %) y en la RN 34 el error fue de 20 cm. En el escenario 2012 los errores mayores se presentaron en la RN 34 y en la progresiva 43265 (mayor al 1 %) y en RP 13 de 46 cm.

Si se adopta una tolerancia de diferencia aceptable de 20 cm, el escenario 2015 presenta 9 progresivas con ajuste aceptable sobre un total de 12 puntos de control (75 %), mientras que el escenario 2012 arrojó el 50 % de ajuste aceptable. En la Tabla 4 se presentan los parámetros hidráulicos en las progresivas de control para el escenario de simulación agosto de 2015.

Tabla 4. Características hidráulicas de simulación del HEC-RAS. Agosto de 2015

Progresiva (m)	Caudal (m ³ /s)	Pendiente Energía	Velocidad (m/s)	Ancho (m)	Nº Froude
65850	57,32	0,0002	0,53	501,54	0,13
63850	73,61	0,000035	0,27	1066,72	0,06
62250	78,34	0,00061	1,13	694,44	0,25
54994	125,46	0,000056	0,39	621,73	0,08
51035	125,05	0,000524	1,35	244,83	0,25
47485	127	0,000184	0,9	487,85	0,15
37678	119,02	0,000732	1,01	2101,54	0,26
33167	122,69	0,000045	0,4	1524,03	0,07
29149	126,04	0,000809	1,29	542,44	0,28
23657	121,96	0,000135	0,71	1301,03	0,12
22856	124,53	0,001308	1,68	461,05	0,33
17300	123,26	0,001344	1,67	1230,05	0,35

La Figura 11 muestra el perfil longitudinal del pelo de agua del tramo en el escenario 2012, donde puede

apreciarse que en las secciones de obras hidráulicas se destacan los desniveles del pelo de agua.

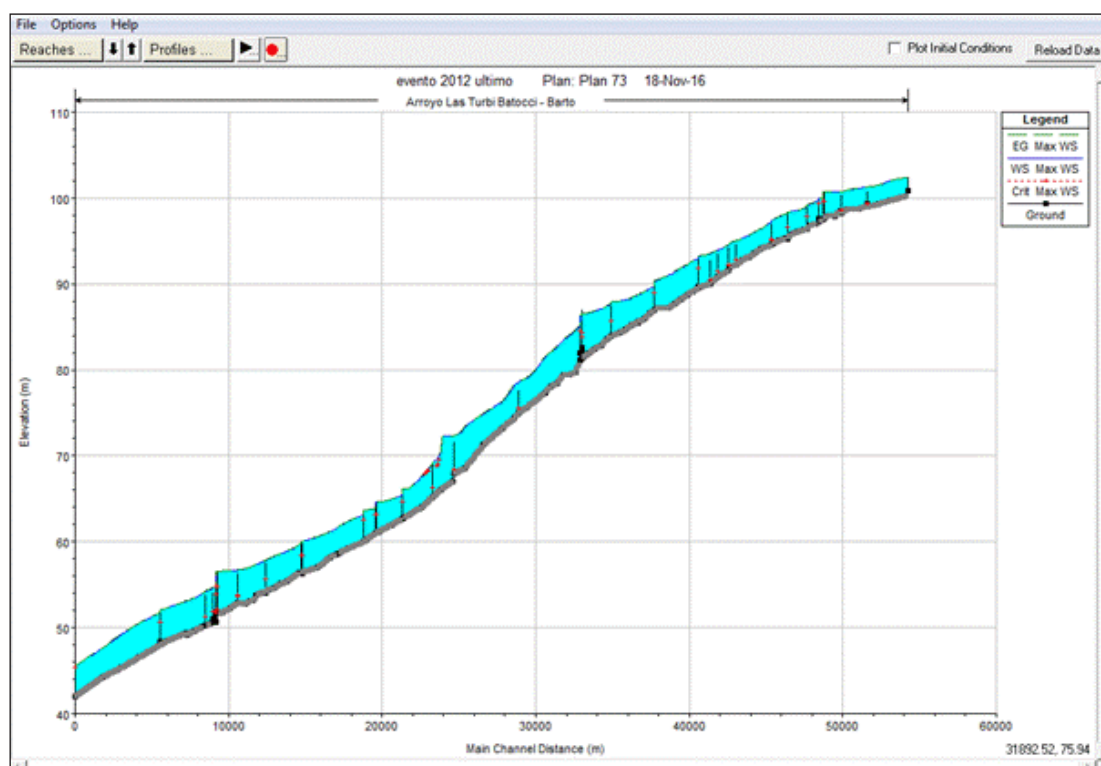


Figura 11. Perfil longitudinal de inundación. Crecida diciembre de 2012

En la Tabla 4 se observa que el régimen de escurrimiento es subcrítico, condición adecuada del flujo para la simulación con onda dinámica y respecto a los anchos de inundación se observa que en algunas progresivas supera los anchos medidos en campo (promedio de 400 m). El promedio de velocidad en el canal es cercano a 1 m/s.

CONCLUSIONES

La calibración de los modelos fue posible principalmente gracias a la información proporcionada por los productores de la cuenca por lo que es importante incorporar estos datos a la información oficial. Los datos proporcionados por los productores e instituciones fueron considerados confiables.

El empleo conjunto de dos modelos matemáticos permitió complementar el proceso de calibración simultánea en casos donde no se dispone de una serie de registros históricos oficiales.

La propagación de las crecidas simuladas desbordó el cauce principal y el comportamiento hidráulico predominante en el movimiento del flujo es el de la planicie de inundación, siendo sus características los influyentes principales en el movimiento del flujo.

Los valores de los parámetros obtenidos en los resultados de la calibración, se encuentran dentro del rango aceptable brindado por la bibliografía en cuencas rurales.

Los errores de las cotas hidrométricas en las distintas progresivas y las correspondientes a las rutas principales (RP 13 y RN 34) en los diferentes escenarios simulados, superan la tolerancia adoptada.

Una de las causas puede fundamentarse en que el modelo unidimensional no representa adecuadamente los efectos de la contracción de sección en el pelo de agua por la existencia de obras hidráulicas.

Se evidencia incertidumbre de datos en las planicies de inundación en diferentes perfiles transversales del tramo que generó diferencias significativas respecto de los anchos de planicie promedios medidos en campo.

En los últimos años en la cuenca se han realizado trabajos de canalización que pudieron haber influido en la modificación de la topografía de los perfiles transversales originales implementados en el modelo hidráulico.

Se destaca la necesidad de que los organismos públicos pertinentes realicen mediciones más detalladas y extensas en las planicies de inundación así como el control de la dinámica antrópica de la cuenca.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los productores por la valiosa información ofrecida y la buena predisposición para colaborar en la localización de los lugares más afectados. A las instituciones intermedias AFA por brindar información y realizar gestiones para posibilitar los encuentros con productores. A las autoridades gubernamentales locales de Las Rosas, Los Cardos, San Genaro y Centeno. y

Al Ministerio de Infraestructura y Transporte de la provincia de Santa Fe y al Servicio de Catastro e Información Territorial por la información técnica y básica suministrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arcement, G. J. y Schneider, V.R. 1989. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. U.S. Geological

Survey Water-Supply Paper 2339. Denver: United States Government Printing Office. Recuperado de: <http://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf> (23/05/17).

Biancotti, E., Marcus, R., Morresi, M. y Gardiol, M. 2015. Análisis pluviométrico de estaciones oficiales y particulares. Influencia en la determinación de hietogramas: 11.CONAGUA 2015. Paraná, Entre Ríos.11 pág. Libro de Resúmenes: p. 108.ISBN 978-987-27407-4-0.

Calcagno, A.; Mendiburo, N. y Novillo, M. 2000. Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Argentina. World Water Vison. <http://www.eclac.cl/drni/proyectos/samtac/inar00200.pdf>.

Chandler, J., Wackrow, R., Sun, X., Shiono, K. y Rameshwaran, P. 2008. Measuring Dynamic and flooding river surface by close range digital Photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008.

Chow, Ven T.; Maidment, D. y Mays, L. 1994. Hidrología Aplicada. Santa Fe de Bogotá Colombia: McGraw-Hill Interamericana. ISBN: 958-600-171-7.

Consejo Federal de Inversiones, (CFI). 2001. Estudios hidrológicos e hidráulicos del evento ocurrido en Cañada de Gómez el 22/11/2000. Reporte de Gioria R., Santa Fe.

Dooge, J. 1973. Linear Theory of Hydrologic Systems. Technical Bulletin No. 1468 of the Agricultural Research Service, U.S.D.A. Washington, D.C., U.S.A.: p. 339.

Fatorelli, S. y Fernández, P. 2011. Diseño hidrológico. 2º Edición en español. Edición digital. ISBN: 978-987-05-2738-2. WASA-GN. Recuperado de: http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf (24/10/2014).

Ministerio de Aguas, Servicios Públicos y Medioambiente (MASPyMA). 2009. Reacondicionamiento del canal Pilar, obras de arte y camino comunal. Departamento Las Colonias. Provincia de Santa Fe. Subsecretaría de Planificación y Gestión.

Ministerio de Planificación Federal (2008). Argentina. Plan Nacional Federal de los Recursos Hídricos. Buenos Aires: Ediciones Gráficas Especiales SA, 1º edición, ISBN 978-987-23585-3-2.

Morresi, M., Gardiol, M., Marcus, R. y Biancotti, E. 2014. Georreferenciación de la información topográfica e hidrológica de la cuenca del arroyo Carrizales-Monje. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe, Argentina, ISSN N° 978-987-692-039-1. CDD: p. 551

Palacio, C., García, F. y García, U. 2010. Calibración de un modelo hidrodinámico 2d para la bahía de Cartagena, Medellín. DYNA, Año 77, Nro. 164:pp. 152166. ISSN 00127353.

Palman, L. 2012. Reacondicionamiento del canal principal arroyo Las Turbias. Informe preliminar del

Proyecto final de carrera de grado. FICH. UNL Santa Fe: p. 39.

Samad, M., Ahmad, A., Hashim, K. y Ishak, N. 2010. Assessment of digital camera for mapping stream using close range photogrammetric technique. 6th International Colloquium on Signal Processing y Its Applications (CSPA):pp. 207-211.

Subsecretaría de Proyectos de Inversión y Financiamiento Externo. (SIPFE). 2007. Readecuación de las obras de mitigación contra inundaciones y estabilización de barrancas en la zona este de la ciudad de San Javier. Planteo de alternativas de anteproyecto. Ministerio de Hacienda y Finanzas de la provincia de Santa Fe.

Siri, J. 2015. Informe sobre el análisis y estudio parcial del proyecto de reacondicionamiento y extensión del canal del arroyo "Las Turbias". Informe Técnico: p. 23.

Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación, 2007a. Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos – Informe del Taller Nacional. Ciudad de Buenos Aires. <http://www.hidricosargentina.gov.ar/InfTallerNac.pdf>

Subsecretaria de Recursos Hídricos de la Nación, 2007b. Plan Nacional Federal de Recursos Hídricos – Informe Taller en provincia de Santa Fe. Santa Fe. Consejo Hídrico Federal, Ministerio de Asuntos Hídricos de la provincia de Santa Fe. http://www.hidricosargentina.gov.ar/TALLER_SANTA_FE.pdf

United States Army Corps of Engineers. (USACE). 2014. Software HEC- HMS V. 4.0 Y HEC-RAS, V. 4.1 Downloads: <http://www.hec.usace.army.mil/software/>
United States Department of Agriculture (USDA). 2004. *Hydrologic Soil-Cover Complexes*. Chapter 9. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook (NEH). Natural Resources Conservation Service. Recuperado de: [https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba.\(21/2/2017\)](https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17758.wba.(21/2/2017))

Vélez Upegui, J. y Botero Gutiérrez, A. 2010. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis, Manizales. Dyna, Año 78, Nro. 165: pp. 58-71. Medellín, Colombia. Recuperado de: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25640/39138> (20/02/2017).

Wachrow, R.; Chandler, J. y Gardner, T. 2008. Minimising systematic errors in DEMs caused by an inaccurate lens model. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing. 2008.

Wenchao, S., Hiroshi, I. y Bastola S. 2010. Towards improving river discharge estimation in ungauged basins: calibration of rainfall-runoff models based on satellite observations of river flow width at basin outlet. Hydrology and Earth System Sciences Discussions.