

MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL DE LOS DESBORDE EL CHAÑARAL Y LA GARRAPATA DEL RÍO PILCOMAYO

TWO-DIMENSIONAL MODELING OF PILCOMAYO RIVER EL CHAÑARAL AND LA GARRAPATA OVERFLOWS

Testa Tacchino, Alejo J. S^{1,2,3,4}; Gyssels, Paolo^{2,3}; Corral, Mariano^{2,3}; Pagot Mariana^{2,3}; Vargas, Constanza^{2,3,4,5}; Farías, Héctor D.⁶; Rodríguez, Andrés^{1,2,3}

Resumen

Este trabajo pretende obtener los caudales de desborde de El Chañaral y La Garrapata del Río Pilcomayo. Para lograr este objetivo se realizó una modelación numérica bidimensional permanente a fondo fijo y sin transporte de sedimentos de la hidráulica del tramo. La zona de estudio se localiza en la zona que se conoce como Pilcomayo Superior, parte de la cuenca baja del río Pilcomayo, 13 km al noroeste de la localidad Santa Victoria en la provincia de Salta Argentina. Para realizar la modelación se han analizado imágenes satelitales, hidrogramas, aforos durante crecidas, topografías e imágenes de radar SRTM.

En una primera etapa se analizó la topografía e imágenes SRTM para elaborar el modelo digital del terreno, posteriormente se seleccionaron las condiciones de contorno del modelo con la ayuda de imágenes satelitales y series hidrométricas, y finalmente se evaluaron los resultados de las simulaciones numéricas para determinar los caudales que desbordan y los que continúan aguas abajo por el Río Pilcomayo.

Con los resultados del modelo se pudo obtener una aproximación de los caudales que activan los desbordes y los caudales desbordados.

Palabras claves: Río Pilcomayo, Modelación hidráulica bidimensional, Desbordes.

Abstract

This work aims to obtain the flow rates of El Chañaral and La Garrapata overflows of the Pilcomayo River.

This article presents a stationary two-dimensional model with fixed bed and no sediment transport in the overflow reach of El Chañaral and La Garrapata, located in the Upper Pilcomayo, part of the lower basin of the Pilcomayo River, in order to approximate the flow that activates the overflows.

To achieve the proposed objective it has been analyzed satellite imagery, hydrographs, gauging during floods, topographies and SRTM radar images.

In a first stage the topography and images SRTM were analyzed to develop the digital terrain model, then the boundary conditions model were selected with the help of satellite images and hydrometric series, and finally the results are evaluated to determine flow rates that overflows as well as those which continue downstream in the Pilcomayo River. Subsequently the results of the modeling are superimposed on satellite images available for the studied flows.

It could be determined with this information an approximation to the flows that activate the overflows and those that overflows.

The result obtained showed a good agreement with previous work.

Key words: Pilcomayo River, Two-dimensional hydraulic modeling, Overflow.

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Pilcomayo abarca una superficie de 288.360 km² y es una de las mayores subcuencas de la gran cuenca del Plata. Su cuenca se divide en dos, la cuenca alta de montaña con cota hasta 5700 m sobre el nivel del mar (m s. n. m.) y una longitud de 500 km, y la cuenca baja de llanura con cota desde 400 m s. n. m. hasta 50 m s. n. m y con una longitud de 785 km.

El Río Pilcomayo es un río trinacional con sus nacientes en Bolivia y que luego recorre como límite entre los países Argentina y Paraguay. El Río Pilcomayo desborda todos los años como consecuencia de las crecidas, cuyo caudal supera la capacidad de encauzamiento del río. Los desbordes ocurren aguas abajo de Villamontes, Bolivia (VM)

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IDIT-CONICET,UNC)

² Laboratorio de Hidráulica (L.H.), Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEyFN), Universidad Nacional de Córdoba (UNC)

³ Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), FCEyFN, UNC

⁴ Instituto Superior de Estudios Ambientales, (ISEA), UNC

⁵ Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT), UNC

⁶ Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT UNSE

Recibido: 02/08/2016

Aceptado: 01/12/2016

cuando el río entra en su cuenca baja, en lo que se ha denominado Pilcomayo Superior. En particular, los desbordes El Chañaral y La Garrapata desbordan hacia lado argentino en la provincia de Salta.

Las aguas de desbordes son importantes para la alimentación de bañados, recarga de acuíferos y el sector agropecuario, pero perjudiciales para las poblaciones que sufren inundaciones con las consecuentes pérdidas materiales, aislamiento, debido a la rotura de infraestructura vial, o anegamiento de los ingresos además de la pérdida de terreno para cultivo por enlame, encharcamiento y erosión de barrancas.

En el Río Pilcomayo las inundaciones o desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. El tramo de río dónde desborda El Chañaral y La Garrapata posee un cauce de tipo "colgado", sus llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes, estos desbordes tienen el comportamiento de surcos de derrame digitado (como dedos de una mano) normalmente asociados a roturas de albardones (Cafaro y Ramonell, 2007). Al sobrepasarse el nivel de las márgenes durante las crecidas, el agua escurre por la llanura de inundación con velocidades bajas, al retirarse el agua, ya sea porque regresa al río, sigue su camino aguas abajo o después de unas semanas se infiltra y evapora, quedando depositado sobre el suelo sedimento muy fino, a este proceso se lo conoce como enlame. El enlame trae como consecuencias la elevación de la cota de llanura de inundación.

Para el estudio de los caudales que arriban a La Garrapata y el Chañaral se poseen los datos de la estación de aforo de Villamontes (Tarija, Bolivia), 138 km aguas arriba del Chañaral y para los caudales que continúan se encuentra la estación de aforos de Misión La Paz (Salta, Argentina), 51,2 km aguas abajo. En el tramo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz ocurren cinco desbordes principales: La Puerta y Pozo Hondo, que desbordan hacia Paraguay y La Garrapata, El Chañaral y La Gracia, que desbordan hacia Argentina (Figura 1).

El Río Pilcomayo presenta numerosas particularidades que obligan el estudio de una posible avulsión (cambio repentino del cauce), entre ellas encontramos el retroceso de su cauce, la elevada cantidad de desbordes, la alta tasa de transporte de sedimentos y material vegetado, las bajas pendientes en la cuenca baja, el cauce colgado. El Chañaral es uno de estos puntos críticos con posibilidad de avulsión. Actualmente no se cuenta con mediciones de caudales de desborde en El Chañaral, debido a la imposibilidad de acceder durante crecidas.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS DESBORDES EN ESTUDIO

El desborde denominado el Chañaral es el más importante en magnitud del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia Argentina. Está localizado aproximadamente a los 22° 10' de Latitud Sur y 62° 47 ' de Longitud Oeste sobre margen derecha del río, en la provincia de Salta, República Argentina. Una vez activado predomina el sentido longitudinal en dirección N-SE. Es un desborde cuyas aguas no vuelven al cauce del Río Pilcomayo (Testa Tacchino, 2015). Este desborde rodea la ciudad de Santa Victoria, que cuenta con un anillo de defensa. Otras poblaciones afectadas por este desborde son: Pozo El Tigre, La Ovejera, Monte Cristo, Chañares Altos, Ambers y Campo Largo.

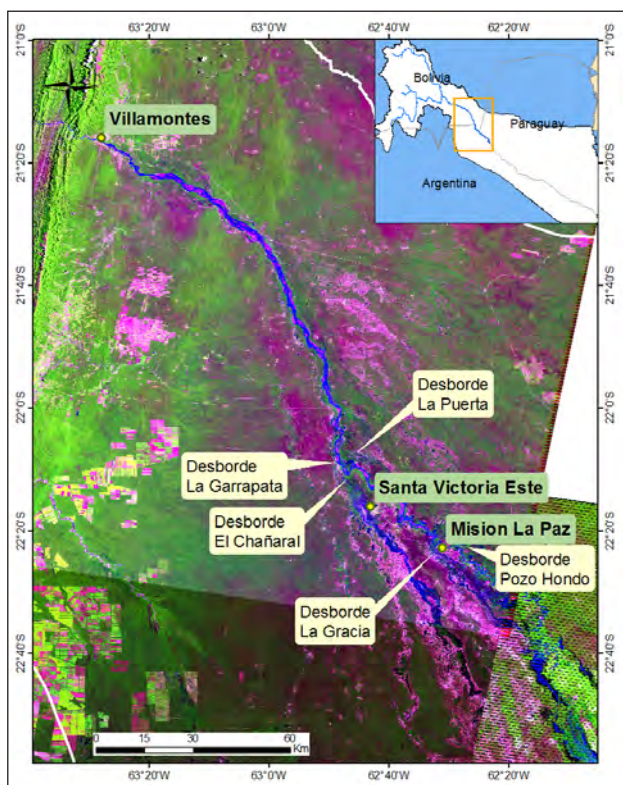


Figura 1.- Localización de desbordes entre Villamontes y Misión La Paz (Img. Landsat 1/2/2008 Bandas:5-4-3).

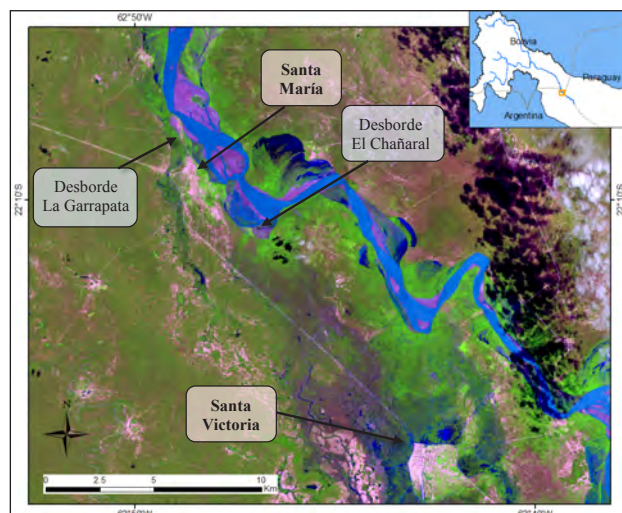


Figura 2.- Desbordes La Garrapata y El Chañaral. (Img. Landsat 5/2/2014 Bandas: 5-4-3).

El Chañaral es el primero en activarse de los desbordes principales que se localizan aguas arriba de Misión La Paz. Este desborde se activa para caudales de 2700 m³/s en Villamontes, que equivale a una lectura de escala de 4,40 m en esta estación (Testa Tacchino, 2015).

El desborde La Garrapata, está localizado 6 km aguas arriba del desborde El Chañaral y afecta a la localidad de Santa María, la cual actualmente posee terraplenes de defensa que desvían el desborde hacia el oeste. El desborde la Garrapata se activa para caudales mayores que los que activan El Chañaral y posee dirección preponderante N-S. Parte de las aguas que desbordan en La Garrapata se unirían a las de El Chañaral. La Figura 2 presenta la localización de los desbordes en estudio.

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es la obtención de un modelo hidráulico bidimensional a fondo fijo y con régimen permanente para el análisis de los desbordes La Garrapata y El Chañaral que permita estimar los caudales que activan los desbordes así como los caudales que abandonan el río.

4. METODOLOGÍA

El Río Pilcomayo es un sistema fluvial de régimen muy variable y no regulado, con una de las tasas de transporte de sedimentos en suspensión más altas del mundo con 125 millones Tn/año (Dirección Ejecutiva, 2014). Al salir de su tramo de montaña cercano a la ciudad boliviana de Villamontes, el río se caracteriza por altas tasas de sedimentación que aumentan hacia aguas abajo. Este trabajo se plantea como una primera fase en el cálculo de caudales de desbordes del tramo y no contempla los efectos de sedimentación/erosión, ni transporte de sedimentos, que se irán incorporando en trabajos posteriores.

Para la determinación de caudales que activan los desbordes se utilizaron dos metodologías diferentes: por un lado se recopilaban imágenes satelitales del período entre 2009 y 2015 y a partir de hidrogramas de crecida de Villamontes se pudieron relacionar caudales estacionarios con las manchas de desborde; por otro lado se realizó un análisis hidrológico de probabilidad de excedencia, analizando caudales en Villamontes y Misión la Paz de los más de 40 años de registro determinando diferencias de caudales por percentiles.

El modelo hidráulico bidimensional se realizó con el Software Delft-3D (Deltares, 2010). Se utilizó como modelo digital de terreno datos obtenidos de imágenes SRTM (USGS, 2014) que han sido mejorados incorporando modificaciones en la topografía, como la inclusión de terraplenes que en el momento del levantamiento no existían y la profundización del cauce donde escurre el agua y donde el SRTM no puede detectar la batimetría.

El coeficiente de rugosidad de Manning se obtuvo de la modelación hidráulica unidimensional del tramo Villamontes – Misión La Paz presentada en Testa Tacchino (2015). El valor del n de Manning utilizado fue de 0,032 (m^{1/3}/s). El ancho del lecho y terrazas se obtuvo a partir de imágenes satelitales, contrastada con el modelo digital de terreno de SRTM y la cota de fondo a partir del modelo hidráulico unidimensional, considerando la pendiente media de un tramo de río que incluye la zona de estudio de este trabajo. La llanura de inundación se obtuvo a partir de los archivos SRTM y se incorporaron las defensas y rutas a partir de información topográfica.

Las cotas de desbordes se definieron a partir del modelo digital del terreno. Para determinar las condiciones de borde aguas abajo y así calibrar el modelo bidimensional se utilizaron: a) las manchas de desbordes obtenidas a partir de imágenes satelitales b) los datos de caudales correspondientes a imágenes satelitales de desborde incipiente y desborde activo, c) los hidrogramas de Villamontes.

5. MODELO DIGITAL DEL TERRENO

La Figura 3 presenta el modelo digital de terreno obtenido a partir de la integración de información de SRTM, topografía e imágenes Landsat. En la imagen ha sido necesario añadir las defensas de Santa María y corregir la topografía en el cauce debido a que el SRTM no detecta la cota de fondo por debajo del agua. Se adoptó una resolución de malla numérica es de 30 m x 30 m consistente con la resolución de la información satelital y de radar disponible (Figura 4).

Como condiciones de borde se adoptó un caudal de ingreso en la sección aguas arriba, identificado como Q_{ingreso} en la Figura 4 y dos condiciones de borde aguas abajo, que consisten en los niveles de la superficie de agua en las secciones aguas abajo de los desbordes y aguas abajo del tramo de río, identificados como H_{Desborde} y H_{Cauce} en la Figura 4. Las condiciones de borde adoptadas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de borde.
Niveles de agua en las secciones aguas abajo (η_{out} , aguas abajo en el cauce, η_{desb} , aguas abajo en la zona de desbordes) para diferentes caudales de ingreso al tramo (Q_{in}).

Condiciones de borde			
$\eta_{\text{out}(+)}$		$\eta_{\text{desb}}(-)$	
Q_{in}	h	Q_{in}	h
0	270	0	270
400	272	100	270.5
1000	274	300	271
2000	276	1000	272
3800	278	2000	273
		3800	275

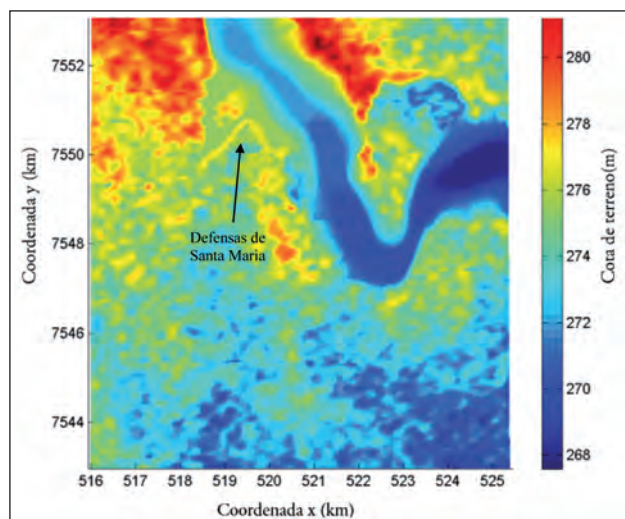


Figura 3.- Modelo digital de terreno de la zona de Estudio

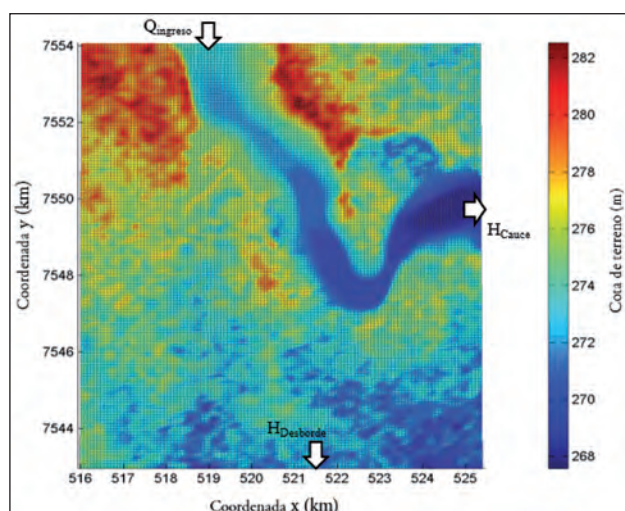


Figura 4.- Malla de cálculo con interpolación del MDT en zona de estudio y condiciones de borde.

6. ESCENARIOS MODELADOS Y RESULTADOS

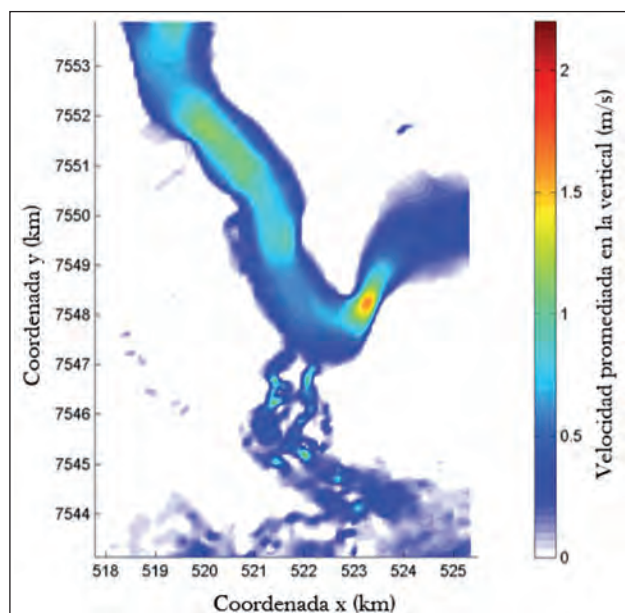


Figura 5.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=2500\text{m}^3/\text{s}$.

Con el modelo digital de terreno y la malla definidos, se procedió a realizar las corridas del modelo. Se ensayaron caudales de diferente magnitud, con el objetivo de ver que caudales activan los desbordes de La Garrapata y El Chañaral, así como para ver las velocidades del desborde a medida que aumenta el caudal evacuado. En este trabajo se presentan los resultados para caudales de $2500\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 5), $3000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 6), $3500\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 7), $4000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 8) y $5000\text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 9).

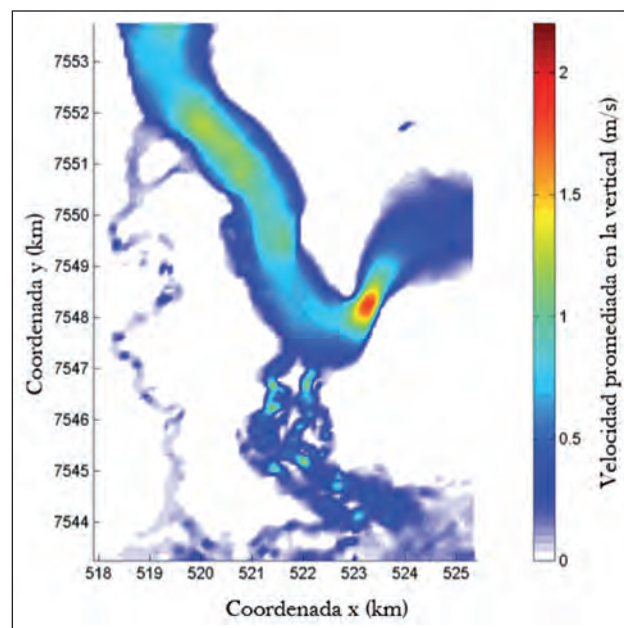


Figura 6.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3000\text{ m}^3/\text{s}$.

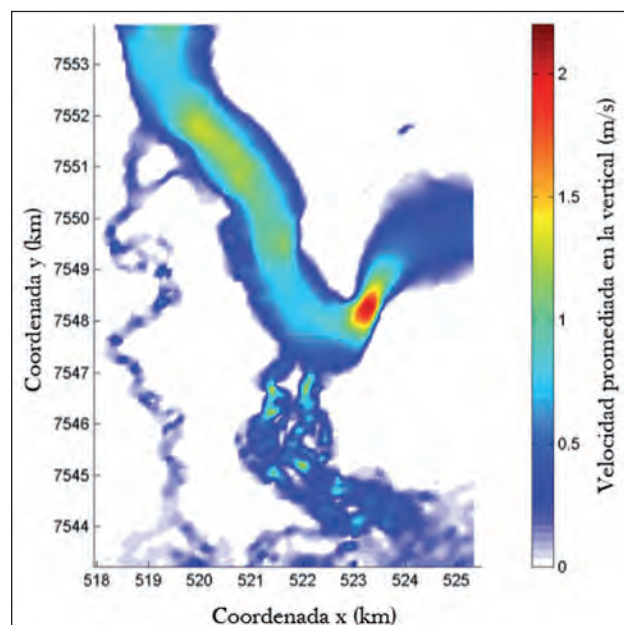


Figura 7.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3500\text{ m}^3/\text{s}$.

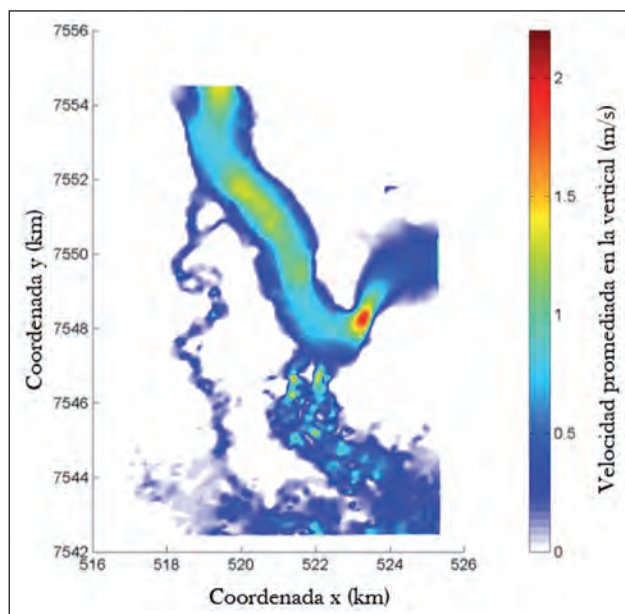


Figura 8.- Velocidad promediada en la vertical $Q=4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

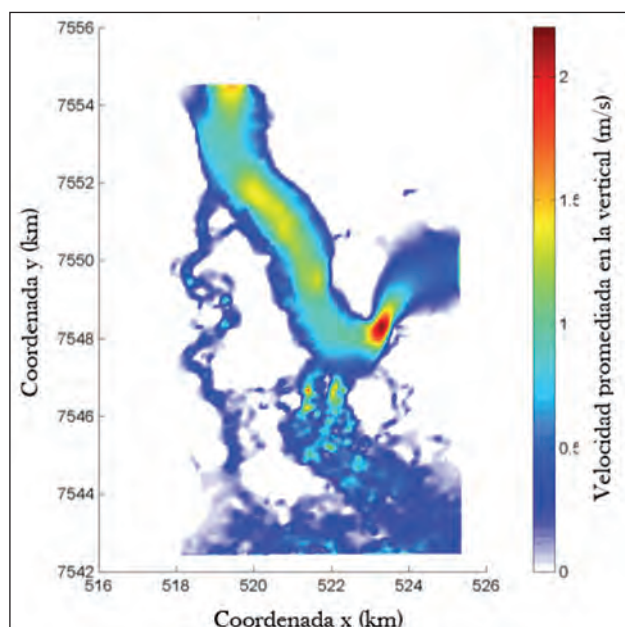


Figura 9.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se observa al comparar las figuras, que el desborde El Chañaral se activa antes que el desborde La Garrapata. Para un caudal de ingreso de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ El Chañaral se encuentra activo con velocidades de $0,50 \text{ m/s}$, mientras que La Garrapata se activa incipientemente para caudales de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que El Chañaral desborda en dos brazos que luego se unen, cuyas velocidades de desborde van aumentando a medida aumentan los caudales, desde una velocidad de aproximadamente $0,50 \text{ m/s}$ para el primer caso simulado y hasta el orden de 1 m/s para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el desborde La Garrapata, se observan velocidades del orden de $0,10 \text{ m/s}$ para los $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando hasta $0,60 \text{ m/s}$ para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

7. IMÁGENES SATELITALES

Se han recolectado imágenes Landsat 5 y Landsat 7 disponibles en fechas cercanas a crecidas importantes del Río Pilcomayo, de acuerdo a caudales obtenidos en las estaciones de las ciudades Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP). Las imágenes fueron obtenidas del USGS (2014) para el periodo comprendido entre los años 1982 y 2014. Se obtuvieron imágenes en falso color y se seleccionaron aquellas en las cuales se observaban manchas de agua en zonas que ya han sido determinadas como de posibles desbordes en trabajos previos.

Una vez seleccionadas las imágenes se procedió a la interpretación, identificando así los contornos de los espejos de agua para posteriormente calcular sus áreas y longitud máxima. Se obtuvieron 14 imágenes en total para los años 1995, 2005, 2006, 200, 2013 y 2014.

La combinación de bandas seleccionada fue 5-4-3, infrarrojo medio (Banda 5), infrarrojo cercano (Banda 4) y rojo (Banda 3), que nos brinda información para delimitar agua continental y resalta ciertos detalles que no se observan en las bandas de espectros visibles. Mientras más bandas infrarrojas utilizemos, con mayor precisión podremos ubicar lagos y ríos y en este caso particular las manchas de inundación. En esta combinación la vegetación se observa verde, permite ver diferencias de humedad y en general mientras más húmedo el suelo más oscuro aparece como consecuencia de la absorción infrarroja.

Se disponía de datos hidrométricos históricos, serie de caudales medios diarios en dos estaciones: Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP) para los periodo en estudio. De acuerdo a la fecha de la imagen se obtuvieron el caudal medio del día de la imagen y el del día del pico de la crecida; los datos son proporcionados por la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina.

El satélite Landsat, como consecuencia de las características de los sensores pasivos que posee, no permite obtener imágenes los días nublados, debido a que no las puede atravesar, situación que limita el número de imágenes de calidad, ya que, obviamente, en general cuando hay crecida está lloviendo y hay nubes.

En los casos en que se dispone de más de una imagen satelital para una misma crecida o mancha de inundación por desborde, se realiza un estudio considerando la evolución en el tiempo de las superficies inundadas con el objeto de estimar tiempos de permanencia y evacuación de agua (Testa Tacchino, 2015).

La Tabla 2 presenta un resumen de los datos obtenidos y calculados para el análisis y calibración del modelo bidimensional. Se resaltan en verde los referidos a los datos hidrométricos correspondientes a las fechas próximas a las imágenes satelitales que se utilizaron para contrastar las manchas de desbordes.

Tabla 2. Caudales pico del hidrograma de crecida (Q_p VM y Q_p MLP) y caudales en la fecha de la imagen (Q VM y Q MLP); Longitud y áreas de las zonas inundadas por El desborde El Chañaral calculadas a partir de las imágenes; tiempo entre picos de hidrogramas (ΔT pico) y tiempo entre pico en MLP y la captura de la imagen (ΔT foto y pico) (Testa Tacchino 2015).

Imagen aaaadd	Fecha dd/mm/yy	Fecha Pico VM	Q_p m^3/s	Fecha del Pico MLP	Q_p MLP m^3/s	Q VM m^3/s	Q MLP m^3/s	ΔT pico días	ΔT foto y pico días	Longitud Km	Área Km^2
1999107	17/04/1999	22/03/1999	5609	24/03/1999	2079	532	337	2	24	61.37	178.68
2005051	20/02/2005	15/02/2005	5335	16/02/2005	2973	539	743	1	4	19.59	32.10
2006030	30/01/2006	23/01/2006	5321	24/01/2006	2539	850	955	1	6	21.53	36.51
2006038	07/02/2006					559	527		14		
2006046	15/02/2006	13/02/2006	2743	15/02/2006	2445	1161	2445	2	0	20.89	59.67
2006054	23/02/2006	13/02/2006	2743	15/02/2006	2445	348	474		16	52.39	122.65
2008036	05/02/2008	26/01/2008	4402	28/01/2008	2867	771	929	2	8	61.00	158.74
2008044	13/02/2008					393	472		16	52.39	122.65
2008060	29/02/2008	28/02/2008	2037	29/02/2008	2299	1076	2299		0	52.06	107.35
2008076	16/03/2008	11/03/2008	2297	13/03/2008	2422	904	1298	2	3	75.98	272.63
2009062	03/02/2009	05/03/2009	2680		2300				0		
2013025	25/01/2013	18/01/2013	3860	23/01/2013	2446	964	573	5	2	42.38	135.00
2014036	05/02/2014	01/02/2014	3071	03/02/2014	2137	1035	1336	2	2	47.71	115.78
2014037	06/02/2014					867	797			49.81	122.22

8. OBTENCIÓN DE CAUDALES DE DESBORDE

La Figura 10 presenta las secciones para las cuales se han calculado los caudales en el modelo. Se estudiaron cuatro secciones que corresponden a: el caudal de ingreso (Q_{ingreso}), que se toma coincidente con la condición de borde aguas arriba, Q_G que representa el caudal del desborde La Garrapata, Q_C que es caudal desbordado por El Chañaral y Q_{AAb} que es el caudal en el cauce del río aguas abajo de los desbordes. La Figura 11 presenta la distribución de caudales, a partir del caudal de ingreso se obtiene el que desborda por El Chañaral, por la Garrapata y cuánto continúa aguas abajo por el cauce del río, estos resultados se encuentran tabulados en la Tabla 3.

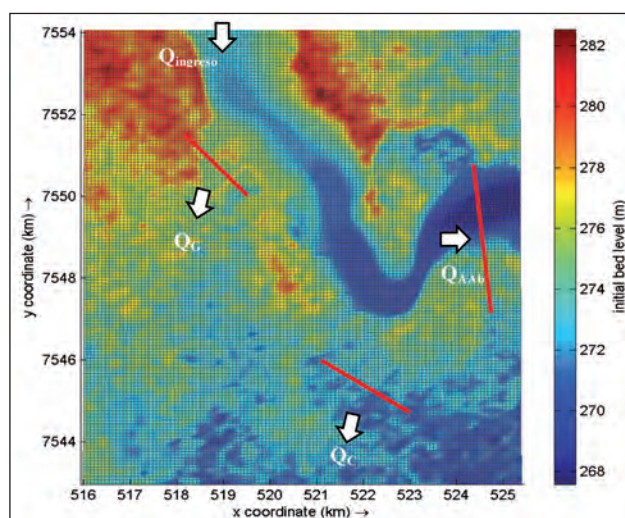


Figura 10.- Secciones de cálculo de caudales.

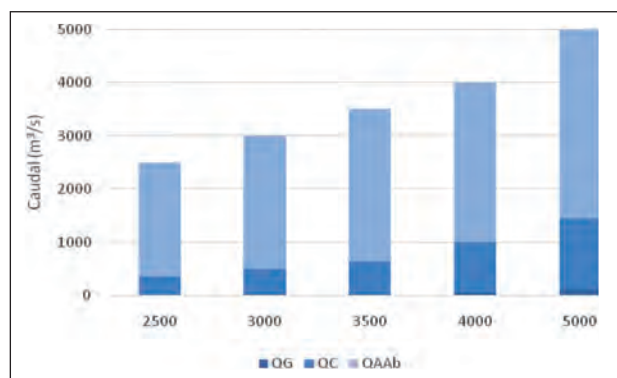


Figura 11.- Distribución de caudales según caudal de ingreso.

Tabla 3. Caudales calculados para los desbordes y aguas abajo, en el cauce (m^3/s).

	Caudales (m^3/s)				
Q_{INGRESO}	2500	3000	3500	4000	5000
$Q_{\text{GARRAPATA}}$	4	12	23	41	118
$Q_{\text{CHAÑARAL}}$	352	477	609	964	1332
$Q_{\text{AGUAS ABAJO}}$	2144	2511	2868	2995	3550

La Figura 12 presenta los caudales en las secciones de condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de los desbordes La Garrapata y El Chañaral. Para comprender la figura hay que tener en cuenta que los caudales aforados se miden en las estaciones de Villamontes y Misión la Paz, mientras que los calculados se obtienen en las secciones delimitadas anteriormente. Es necesario remarcar que los caudales medidos en Villamontes (138 km aguas arriba de El

Chañaral), al arribar a la sección modelada 50 km aguas arriba de MLP disminuyen como consecuencia del tránsito en el cauce y que en el tramo comprendido entre aguas abajo de El Chañaral y Misión la Paz ocurren desbordes (Figura 1) que se activan para caudales superiores a los 3.000 m³/s, efectos que

no están presentes en el tramo modelado. Es decir, la comparación entre los caudales aforados y los modelados tiene ciertas limitaciones, pero al observar la Figura 13 se observa una buena relación entre la mancha del desborde obtenida a partir de la imagen satelital y la mancha modelada.

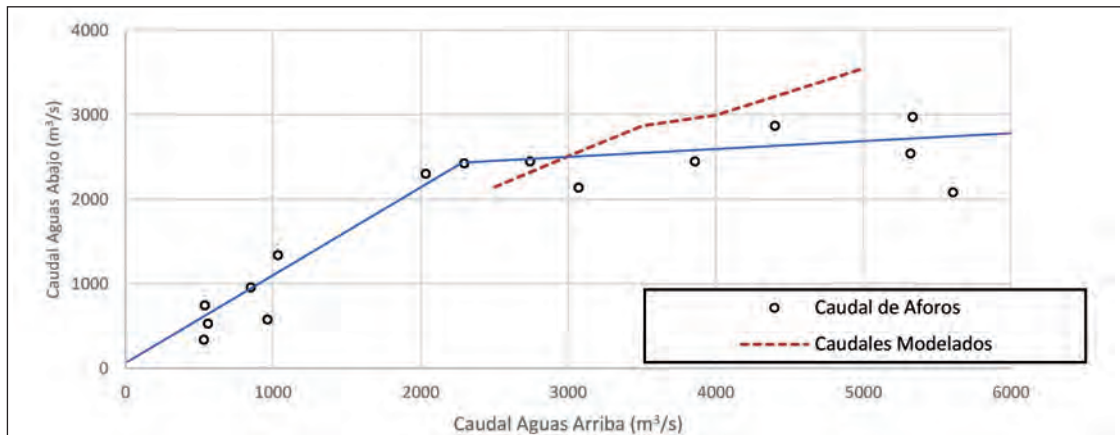


Figura 12.- Caudales aguas arriba vs aguas abajo de los desbordes en estudio.

A partir de imágenes satelitales durante crecidas en combinación de bandas de falso color 543 para Landsat 5 y 7 y combinación 6-5-4 para Landsat 8 y su correspondencia con hidrogramas y caudal pico del evento presente en la imagen (Testa Tacchino, 2015) se extrajeron las imágenes correspondientes a caudales pico próximos a los modelados para validar el modelo bidimensional.

La Figura 13 presenta los resultados modelados para el caudal de 2500 m³/s sobre la imagen Landsat del día 3 de marzo de 2009 y la Figura 14 para el caudal de 3500 m³/s sobre la imagen del 25 de enero de 2013. Sobre estas imágenes se han delimitado también los desbordes observados en las imágenes de satélite: en azul el desborde El Chañaral y en rojo La Garrapata.

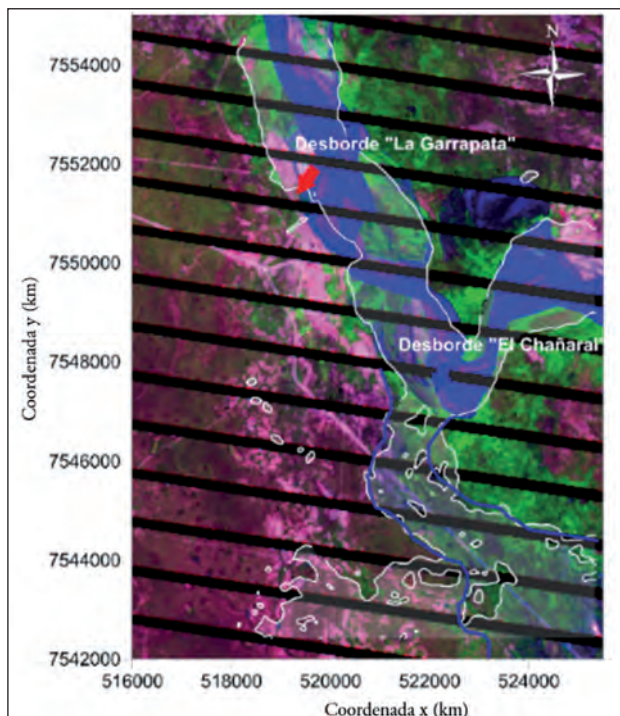


Figura 13.- Superposición de desborde modelado para un caudal de 2500 m³/s (Img. Landsat 3/3/2009 Bandas 5-4-3). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral.

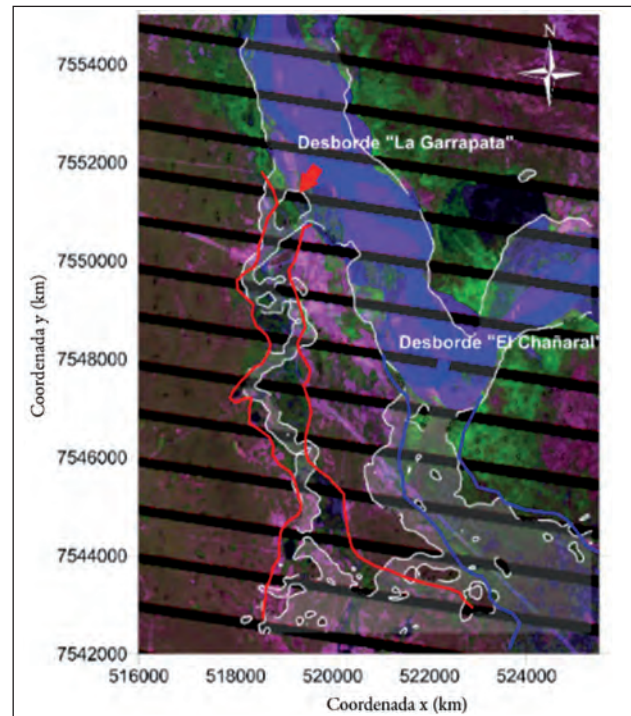


Figura 14.- Superposición de desborde modelado para un caudal de 3500 m³/s (Img. Landsat 25/1/2013 Bandas 5-4-3). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul y rojo el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral y La Garrapata, respectivamente.

9. LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN

La modelación presenta una serie de limitaciones al compararla con las diversas complejidades del tramo en estudio. La modelación al ser a lecho fijo y sin transporte de sedimentos no contempla los efectos de la elevada tasa de transporte de sedimentos y material vegetado, así como grandes variaciones de la cota de lecho: en Misión la Paz, 51,2 km aguas abajo de El Chañaral, se han registrado movimientos del fondo de 7 m en profundidad en aforos antes y después del paso de la crecida. Otra limitación es la resolución del modelo digital del terreno obtenido a partir de SRTM, que necesariamente debería ser contrastada con topografía de la zona.

CONCLUSIONES

A partir del análisis de imágenes satelitales, hidrogramas y análisis de curvas de excedencia, se ha determinado que el desborde La Garrapata se encuentra inactivo para 2500 m³/s y se activa incipientemente a los 3000 m³/s para una cota de 274,1 m s. n. m. El desborde El Chañaral se encuentra inactivo para los 2300 m³/s y se activa para los 2500 m³/s a la cota 273,85 m s. n. m. Es importante recordar que los caudales que ingresan a la zona de estudio son inferiores a los obtenidos por las lecturas de escalas y relaciones h-q en Villamontes, consecuencia de los desbordes aguas arriba (La Puerta) y el tránsito de la crecida, que reduce el pico aguas abajo. Se ha verificado una buena correspondencia entre el caso modelado y el observado a través de imágenes satelitales e hidrogramas, se presenta una muy bue-

na correspondencia entre las manchas obtenidas a partir de la delimitación de los desbordes visibles en las imágenes satelitales y las manchas obtenidas como resultados de la modelación numérica, tanto para El Chañaral como para La Garrapata.

BIBLIOGRAFÍA

Cafaro E. D. y C. G. Ramonell, 2007. Evaluación de la Información Necesaria para el diagnóstico de una posible avulsión del Río Pilcomayo. Informe Final. Santa Fe: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Deltares, 2010. Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments.

Dirección Ejecutiva, 2014. Comisión Trinacional para el desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo. www.Pilcomayo.net. recuperado en Enero 2014.

Testa Tacchino, Alejo Juan Sebastián, 2015. Caracterización de los Desbordes del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz. Córdoba: Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, UNC.

USGS, 2014. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc second (30m). 14 de 08 de 2014. <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>.

Vauchel, P., 2006. Análisis, críticas y tratamiento de los datos hidrométricos de la cuenca alta del río Pilcomayo disponibles aguas arriba de misión La Paz (Argentina). Informe final.