

Determinación del caudal que activa el desborde denominado El Chañaral sobre el Río Pilcomayo

Alejo J. S. Testa Tacchino^{1,2,3,4}, Constanza Vargas^{1,2,3,5},
Mariano Corral^{1,2}, Mariana Pagot^{1,2}, Andrés Rodríguez^{1,2,4}
¹Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN, UNC, Argentina ²CETA, FCEFyN, UNC, Argentina
³ISEA, FCEFyN, Argentina ⁴IDIT CONICET/UNC, Argentina ⁵SECyT, UNC, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 15/03/2016

Fecha de aceptación del manuscrito: 02/09/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

Resumen— La cuenca Trinacional del Río Pilcomayo tiene la mayor parte de su cuenca activa en Bolivia y luego constituye el límite geográfico entre Argentina y Paraguay hasta la zona de Embocadura, donde las aguas son distribuidas entre ambos países. Diversas complejidades imponen restricciones al análisis hidráulico: no hay aforos en época de crecida y la gran variabilidad de la sección de MLP demanda aforos y cálculos de las curvas H-Q para cada evento. En el tramo VM – MLP se producen numerosos desbordes que dificultan la estimación de los caudales erogados hacia Argentina y Paraguay. Este último es un tema de preocupación bilateral manifestado en diversos acuerdos con el fin de conseguir una equitativa distribución del recurso. Se presenta un análisis de excedencia de caudales que, junto a productos satelitales, permite el estudio de los caudales que activan el desborde El Chañaral, Salta, por diferentes metodologías. Se presenta una modelación hidráulica unidimensional del tramo contemplando los desbordes aplicada a la crecida del 2103. Las diferentes metodologías utilizadas permitieron obtener el caudal, medido en Villamontes, que activa el desborde El Chañaral, que para el período de estudio se determinó que es de 2700 m³/s.

Palabras clave— Río Pilcomayo, Modelación Hidráulica, Desbordes, Imágenes Satelitales.

Abstract— The Tri-National Pilcomayo River basin has most of its active basin in Bolivia, and further southeast the river becomes the limit between Argentina and Paraguay up to the region of “La Embocadura”, where the water is artificially distributed between both countries. The major hydraulic problems encountered in the basin are the need to calibrate the H-Q curves and the high variability of MLP section that demands gauging and H-Q curves for each event. The reach VM – MLP has many overflows, which make the measurement of the flows into Argentina and Paraguay a difficult task. This is a concerning bilateral problem expressed in many agreements in order to achieve a fair distribution of this resource. Flow exceedance analyses was carried out, together with studies using satellite imagery, these methodologies are used to look into the flows activating the overflow El Chañaral. One-Dimensional hydraulic flood routing of the reach is modelled including the overflows with representing the flood of year 2013. The different methodologies employed allowed us to obtain the flow, measured in Villamontes, which activates the overflow El Chañaral, which for the period of study was determined to be 2700 m³/s.

Keywords— Pilcomayo River, Hydraulic modelling, Overflow, Satellite images.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Pilcomayo está conformada por una extensa área compartida entre Argentina, Bolivia y Paraguay, integra la gran Cuenca del Plata y abarca una superficie de aproximadamente 290.000 km² (Fig. 1), con una población estimada de 1,5 millones de habitantes. A lo largo de su vasta superficie la variabilidad climática y geológica-geomorfológica han conformado un gran número de paisajes y hábitats de más de 20 etnias aborígenes que han ido moldeando sus prácticas culturales en función del ambiente y las circunstancias de su historia. El río Pilcomayo es considerado uno de los ríos con mayor cantidad de transporte de sedimentos en el mundo con una

tasa media anual de 125 millones de toneladas (Pilcomayo.net, 2014). Esta particularidad constituye el rasgo natural por excelencia de la región, recorriendo más de 1000 km desde los 5500 m de altura en sus nacientes en Bolivia hasta los 250 m en los alrededores de Misión La Paz en territorio argentino.

En la Cuenca Alta, el Pilcomayo se comporta como un típico río de montaña, que al abandonar los Andes (o territorios “subandinos”) en la ciudad de Villamontes, entra en la planicie del Chaco, en dirección sureste en sentido del flujo, extendiéndose unos 1000 km hasta el río Paraguay (de los cuales 835 km conforman la frontera entre Argentina y Paraguay). En este tramo se convierte en un río de llanura.

En la cuenca baja, el Río Pilcomayo se divide en Río Pilcomayo Superior y Río Pilcomayo Inferior, que corresponden a un tramo de 545 y 240 kilómetros respectivamente. El Río Pilcomayo Superior presenta una

geometría de cauce colgado, lo que sumado a su traza meandriforme y la no regulación de sus caudales, propician condiciones de alto riesgo de avulsión, es decir cambio repentino del cauce y formación de uno nuevo, favorecida quizás por una crecida donde el flujo desborda en puntos específicos o críticos (Pool y Van Duijne, 1996). Uno de los problemas principales y más llamativos del Río Pilcomayo es el proceso de colmatación o taponamiento que padece, que viene acompañado de un retroceso de su cauce. Se reconoce como causa del taponamiento total del cauce a los árboles y troncos, que al ser arrastrados por las crecidas forman taponamientos, denominados “paleríos” en la zona. Estos diques, inicialmente permeables, junto al limo y barro aportados por el río, forman extensos rellenos hidráulicos en toda la franja correspondiente al cauce del río (Hopwood, 2003). El taponamiento actual se sitúa en el Río Pilcomayo Superior a 65 kilómetros aguas abajo del Punto Trifinio Esmeralda, punto límite entre Argentina, Paraguay y Bolivia.



Fig. 1. Esquema de la cuenca (Pilcomayo.net, 2014)

La colmatación del cauce que implica que el agua ya no fluye por el cauce del río hacia la desembocadura sino que fluye como desbordes. Por lo general en morfología de ríos se da por descontada la continuidad de los ríos hasta la desembocadura, esto no es así en el río Pilcomayo, por eso se lo que lo reconoce como un río de discontinuidad fluvial extrema (Martin-Vide et al., 2012)

El río Pilcomayo en llanura constituye uno de los mejores ejemplos de mega-abanico fluvial, frecuentes en las faldas orientales de los Andes en América del Sur. Es también el mayor de ellos y el único del mundo que presenta el fenómeno de extinción del cauce por atarquinamiento. No se trata simplemente de un río endorreico cuyas aguas desaparezcan en algún punto, de lo cual sí hay ejemplos en el mundo, sino que en el lugar en que el río desaparece todavía fluye un caudal notable que se extiende formando bañados (Pilcomayo.net, 2014).

Es así que ante tantas particularidades que llevan a enfrentar numerosas problemáticas con carácter internacional, los gobiernos de los tres países de la Cuenca desde comienzos del siglo pasado integran sus esfuerzos a través de iniciativas como la conformación de la comisión de trabajo mixta, la suscripción de acuerdos y la solicitud de préstamos y proyectos de cooperación internacional.

Entre estas temáticas se encuentra el problema de los desbordes de sus aguas en las épocas de crecidas, que para este río se dan entre diciembre y abril de cada año. El año hidrológico para este río comienza el 1 de septiembre y finaliza el 31 de agosto.

La zona de estudio se enmarca en la cuenca baja del río Pilcomayo, en el tramo que va desde Villamontes, Bolivia (21°15' S; 63°28' O) hasta Misión la Paz / Pozo Hondo, Argentina / Paraguay (22°35' S; 62°23' O), tramo donde se ubican la mayoría de los puntos críticos con riesgo de avulsión. En este trabajo se estudia el desborde El Chañaral, uno de los cuatro desbordes principales que se encuentran aguas arriba de Misión La Paz: en margen derecha La Gracia a 6,4 km y El Chañaral a 51,2 km, en margen izquierda Pozo Hondo a 10,6 km y La Puerta a 72,8 km (Fig. 2).

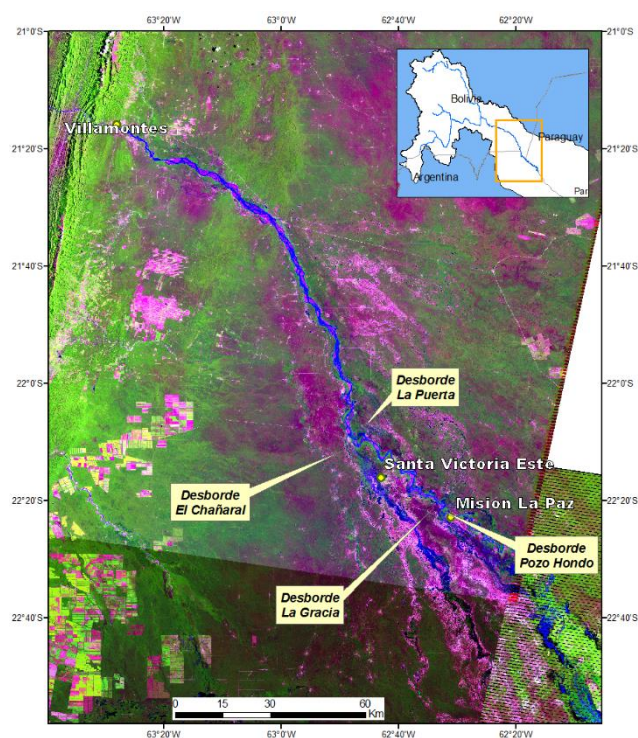


Fig. 2. Ubicación, identificación de desbordes y localidades próximas

En el río Pilcomayo los desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. Este río posee un cauce de tipo “colgado”, las llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes. Los ríos colgados aparentemente serían la condición ideal para que ocurra una avulsión. Sin embargo, al parecer este comportamiento no es generalizable. Por ejemplo, en el río Amarillo, en China, de 1600 roturas de albardones solo 7 resultaron en avulsión. Otra posible causa es la tasa de sedimentación en el lecho, en el río Amarillo el lecho sube sorprendentemente 10 cm por año y su tasa de transporte es de 30 kg/m³ (Slingerland y Smith, 2004).

En el caso del lado argentino, los desbordes tienen asociados el comportamiento de surcos de derrame digitado normalmente asociados a roturas de albardones. Presentan un patrón que se puede caracterizar en tres zonas contiguas (proximal, media y distal) a medida que se aleja de la traza del río hacia el terreno aluvial sobre margen derecha. La zona proximal posee las embocaduras de los surcos de desborde que se caracterizan por ser de cauce único, con

secciones transversales de tamaños diversos, paralelos y separados entre no más de 20 m. En ellos se encuentra una gran cantidad de troncos, transportados por el río durante las crecientes, acumulados en las inmediaciones de la margen. Esta zona posee una densa vegetación leñosa con tamaños medios a grandes, provocando que se acumulen troncos sobre la margen y una morfología del depósito de derrame de tipo: erosión en herradura y depósito aguas abajo del árbol. La zona media, ubicada a una distancia promedio de 50 m respecto del río tiene la particularidad de que los surcos se subdividen en otros de dimensiones diversas y más pequeños, separados entre sí por montículos arenosos o areno-limosos. Presenta un bosque bajo con arbustales y matorrales. En tres sitios se observó que tal zona se extiende entre 150 y 850 m. En la zona distal se produce la deposición de los sedimentos finos (mayoritariamente limos) que son transportados por el río como carga de lavado. Esta zona cubre áreas mucho mayores que las anteriores, se caracteriza por tener pendientes casi horizontales con baja densidad de vegetación y desprovista de árboles grandes (Cafaro, 2007).

El desborde denominado el Chañaral es el más importante de los cuatro desbordes principales aguas arriba de MLP 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. Una vez activado predomina el sentido longitudinal en dirección N-SE. Es un desborde cuyas aguas no vuelven al cauce, el agua se pierde del sistema, lo mismo ocurre con los otros desbordes. En este artículo, se plantea estimar el caudal que activa el desborde El Chañaral.

Las aguas de este desborde se unen con las del desborde La Garrapata sobre la Ruta Prov. N° 54 aguas arriba de la localidad de Santa Victoria y se dirigen sobre una faja deprimida con dirección SSE, con un ancho medio de 3 km y pendiente media, entre los perfiles 5 y 9, de unos 50 cm/km (Farías y Cafaro, 2010).

Según el Modelo Digital de Terreno a partir de SRTM El Chañaral se activa a la cota 273,85 msnm. El desborde es inaccesible en épocas de aguas altas, por lo que hay poca información respecto a su comportamiento. Este desborde rodea la ciudad de Santa Victoria, que cuenta con un anillo de defensa. Otras poblaciones afectadas por El Chañaral son: Pozo El Tigre, La Ovejería, Monte Cristo, Chañares Altos, Amberes y Campo Largo.

ENFOQUE METODOLÓGICO

Se abordó la determinación del caudal de desbordes de El Chañaral por medio de tres metodologías diferentes: análisis de probabilidad de excedencia, hidrogramas vinculados a imágenes satelitales, y modelación matemática.

El Río Pilcomayo se encuentra aforado desde hace 50 años por parte de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Argentina (SSRRHH) y hace 40 años por parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). Además, se dispone de lecturas de escala, por lo general entre cuatro y seis veces al día y cada 15 minutos a partir del año 2013, con la instalación del sistema de radar Kalesto. No obstante, la información muchas veces es incierta o presenta complejidades que ha sido necesario

abordar. Entre estas dificultades se destacan: las curvas H-Q de Misión La Paz no son una función única, sino que varía para cada crecida y las curvas H-Q, tanto para Villamontes y Misión La Paz, se obtienen a partir de aforos que excluyen las crecidas lo que obliga a realizar correcciones en las series hidrométricas. El eje de este trabajo, como ya se comentó, abarca el periodo donde se concentran los mayores volúmenes de agua, es decir durante las crecidas. A partir del año 2014, se afora con molinetes y flotadores durante crecidas en VM y MLP, si bien por cuestiones de seguridad no se alcanzan a aforar los picos.

Con la información disponible se ajustaron funciones que permiten obtener con cierta certeza los caudales a partir de las lecturas de escala que fueron los que se utilizaron para este trabajo.

Curvas de excedencia

Se realizó un análisis de frecuencia considerando los últimos 35 años de caudales líquidos medios diarios en VM y MLP.

Se calcularon las curvas de probabilidad de excedencia de caudales para las estaciones de Villamontes y Misión La Paz (Díaz y Testa Tacchino, 2014). Con esta información, se confeccionó una gráfica que permitió analizar los caudales desbordados. La gráfica presenta la probabilidad de excedencia en abscisas y los caudales de VM y MLP en ordenadas. Si el agua que pasa por VM llegase sin pérdidas a MLP ambas líneas quedarían superpuestas. En la Fig. 4 se observan pérdidas del orden de 15 m³/s entre VM y MLP con una excedencia superior al 3 %, que indicaría las pérdidas por evapotranspiración. Al disminuir la probabilidad de excedencia la diferencia entre curvas aumenta, pudiendo indicar pérdidas por infiltración para caudales en épocas de aguas altas (Fig. 3).

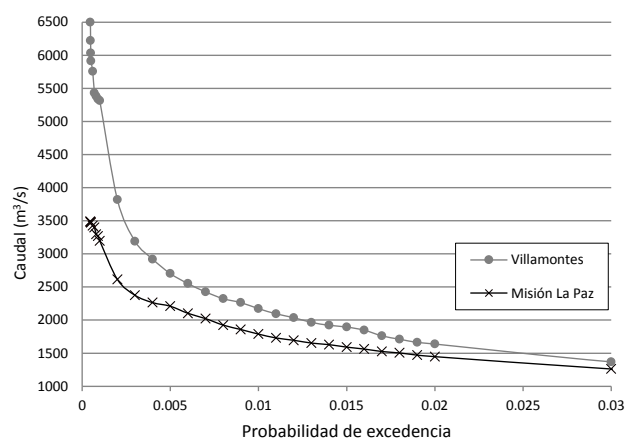


Fig. 3. Curvas de probabilidad de excedencia para VM y MLP

Las primeras pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de 2551 m³/s en VM y de 2100 m³/s en MLP, observándose un salto significativo en la distancia entre curvas para un caudal de 2751 m³/s en VM y de 2270 m³/s en MLP, que se interpreta como la activación del desborde El Chañaral. Caudales de 3817 m³/s en VM y 2613 m³/s en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 %, producen grandes desbordes de aproximadamente 800 m³/s. Estos valores son congruentes

con los que se observaron a partir del análisis con imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados.

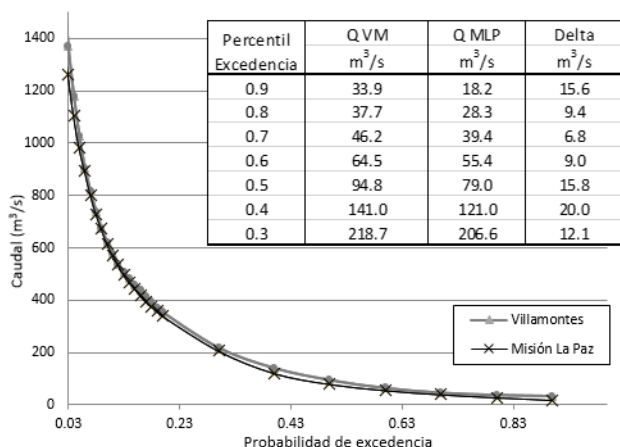


Fig. 4. Curvas de probabilidad de excedencia para VM y MLP

Análisis de imágenes satelitales e hidrogramas

Se han recolectado imágenes Landsat 5, 7 y 8 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 para el periodo comprendido entre los años 1982 y 2015. 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, así como también velocidades de avance del frente de crecida (Testa Tacchino et al., 2014). Se obtuvieron 14 imágenes en total para los años 1995, 2005, 2006, 2008, 2013, 2014 y 2015. 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.

La combinación de bandas seleccionada fue 5-4-3, infrarrojo medio (Banda 5), infrarrojo cercano (Banda 4) y rojo (Banda 3), que brinda información para delimitar agua continental y resalta ciertos detalles que no se observan en las bandas de espectros visibles. Mientras más bandas infrarrojas se utilicen, se pueden ubicar con mayor precisión 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.

A partir de los hidrogramas obtenidos, y con la fecha de la imagen se obtuvo el caudal medio del día de la imagen y el del día del pico de la crecida.

La Fig. 5 presenta el hidrograma para la crecida del año 2006. Para este caso se dispone de cuatro imágenes satelitales, aunque dos no serán de utilidad para este

trabajo. Se puede observar en la Fig. 6 que para el 7 de febrero, en la caída entre las dos crecidas, no se aprecia presencia de agua en la imagen satelital y en la Fig. 7 del 15 de febrero se detectaron desbordes en El Chañaral (se ha sombreado en color rojo el área anegada). Analizando el hidrograma, se observa que el caudal pico antes de la imagen fue de 2730 m³/s en VM, es decir, se podría inferir que El Chañaral desborda para un caudal inferior.

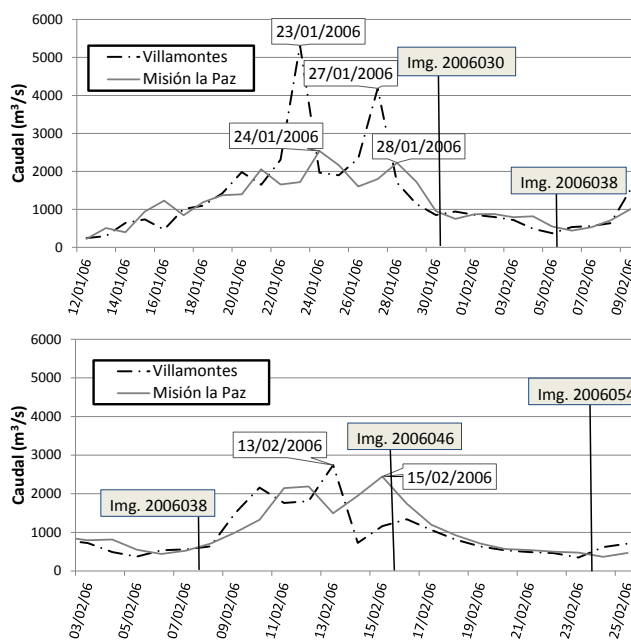


Fig. 5. Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2006.

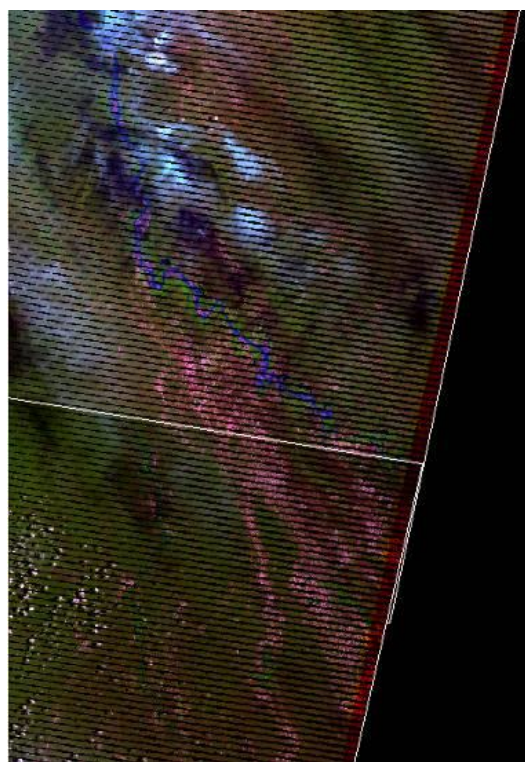


Fig. 6. Imagen 2006038 (07/02/2006)

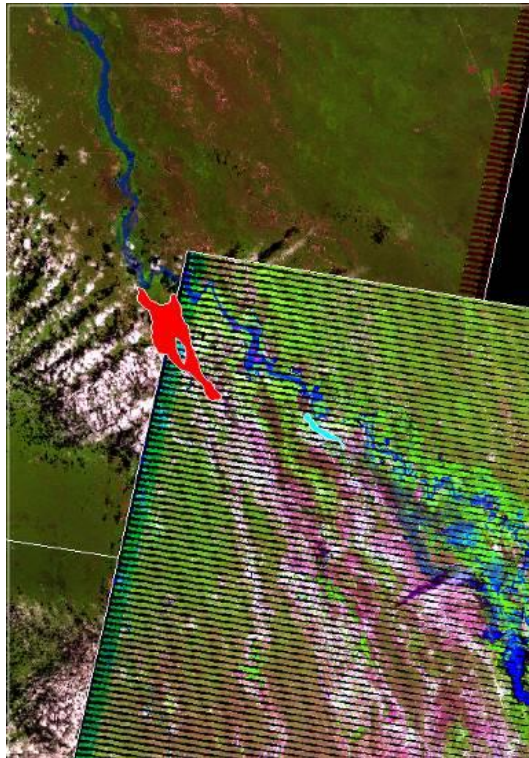


Fig. 7. Imagen 2006046 (15/02/2006).

Modelación numérica

Se ha modelado hidráulicamente el Río Pilcomayo en una dimensión, a régimen no permanente, gradualmente variado y de fondo fijo utilizando el software HEC-RAS 4.1.0 (USACE, 2010). Para ello, se usó un modelo digital de terreno (Fig. 8) obtenido a partir de imágenes SRTM (USGS, 2014) con el objetivo de evaluar el comportamiento del hidrograma al producirse una pérdida de caudal como consecuencia de los desbordes, estos se simularon con un vertedero lateral en la progresiva correspondiente al desborde El Chañaral.

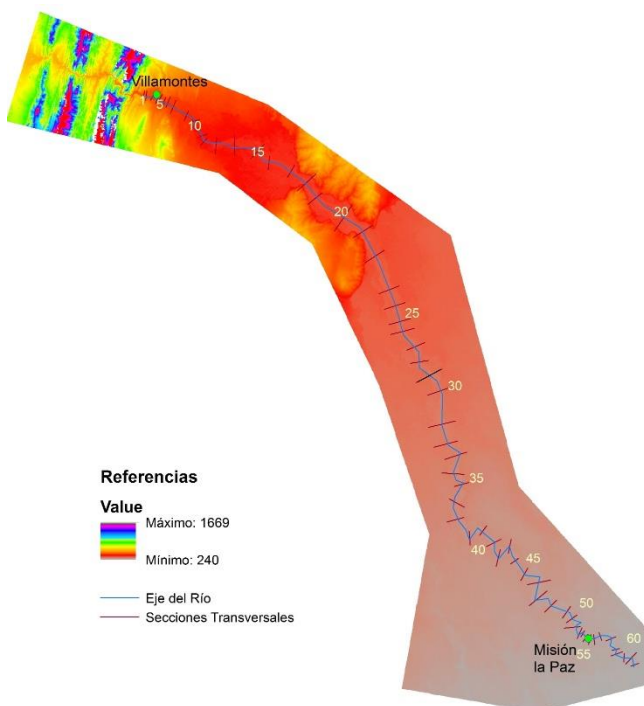


Fig. 8. Secciones en el tramo Villamontes a Misión La Paz por el Río Pilcomayo, fondo DEM a partir de SRTM.

Este trabajo se planteó con un solo vertedero lateral que simularía los cuatro desbordes principales. En trabajos futuros se pueden proponer estudios con múltiples vertederos. El umbral del vertedero lateral se adoptó teniendo en cuenta la cota del punto más bajo de la margen derecha del río a la altura del Chañaral (cota 273,85 m). El ancho se fijó en 2000 m a partir de imágenes satelitales en que se observan los desbordes, y también se llevó a cabo una corrida con un ancho de vertedero de 1700 m, sin observarse cambios significativos en los resultados.

La Fig. 9 presenta el Caudal de ingreso, en VM, obtenido del hidrograma del año 2013 y el caudal modelado que arriba a MLP.



Fig. 9. Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT SRTM

La Fig. 10 presenta la comparación entre caudal observado y caudal modelado que arriban a MLP para el evento de 2013.

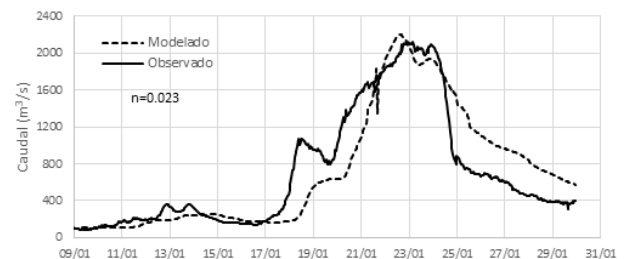


Fig. 10. Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT SRTM.

La Fig. 11 exhibe el hidrograma que abandona el sistema, es decir, el hidrograma que descarga por el vertedero lateral, que representa los desbordes.

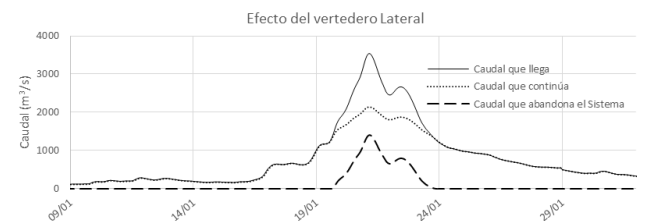


Fig. 11. Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D.

Se observa que el caudal para el que comienza el desborde por el vertedero lateral en el modelo es de 1700 m³/s, que se corresponde con el primer salto, o pérdida de volumen de importancia que se ve en el análisis de curvas de excedencia, lo que se supone que podrían ser pérdidas por infiltración en épocas de aguas altas, unos 250 m³/s. Si

se adopta este valor como partida para el inicio de desborde en el modelo ello estaría indicando que el desborde se activa para un caudal de 2050 m³/s en VM. No obstante, si se cambia el enfoque y se calcula en la curva de probabilidad de excedencia la diferencia de caudales entre VM y MLP antes de que se active el desborde, se obtienen 815 m³/s. Observando la curva de desborde de la Fig. 11 el caudal 815 m³/s, este se corresponde a un caudal del orden de 2700 m³/s en VM. Queda pendiente, para trabajos futuros, caracterizar en que se pierden los caudales entre 2050 m³/s y 2700 m³/s medidos en VM antes de arribar a MLP.

La Fig. 12 presenta el caudal modelado superpuesto en color rojo a la imagen satelital del año 2013. Se observa una buena aproximación en cuanto a superficie de agua en el cauce.

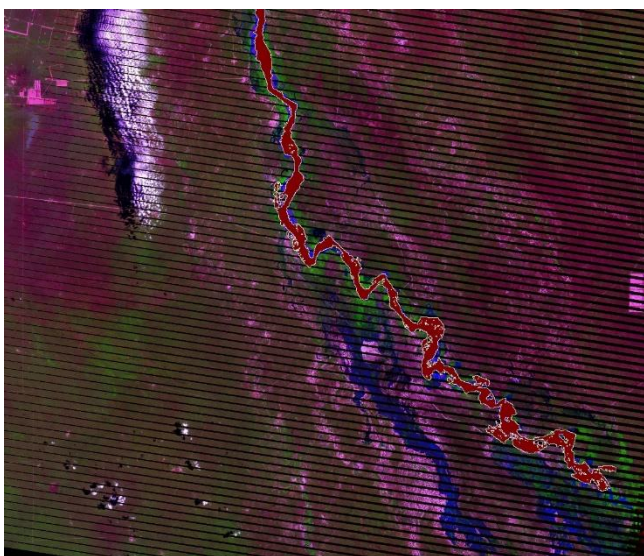


Fig. 12. Superposición Imagen Landsat 25/01/2013 y resultados HEC-RAS.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha establecido por diferentes metodologías que el caudal que activa el desborde denominado El Chañaral corresponde a los 2700 m³/s en Villamontes. Para arribar a dicha conclusión se han procesado y analizado imágenes satelitales vinculadas a hidrogramas y se ha llevado a cabo un estudio de caudales de excedencia. Además, mediante la implementación de un modelo hidráulico unidimensional a fondo fijo a partir de un modelo digital de terreno SRTM, se ha estimado en una primera aproximación el hidrograma de desborde.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a todo el personal de SSRRHH, INA y EVARSA de la Nación Argentina, SENAMHI de la República Plurinacional de Bolivia y DE-CTN para el desarrollo de la cuenca del Río Pilcomayo, quienes han aportado información de base para este trabajo y con quienes hemos trabajado coordinadamente para el desarrollo de las campañas. También se agradece al LH, CETA, IDIT e ISEA de la UNC, CONICET y SECYT de Argentina.

REFERENCIAS

- [1] Testa Tacchino A. J. S., Díaz E. B., Baldissoni C. M., Cristanchi M. A., Pagot M., Tarrab L., Herrero H., Corral M., Laboranti C. y Rodríguez A., (2014) "Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: Caracterización y Restricciones". *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile.
- [2] Dirección Ejecutiva, Comisión Trinacional para el desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo, (2014). *Pilcomayo.net*. 05 de 11 de 2014.
- [3] Hopwood H. J. (2003) "Taponamiento progresivo del cauce del Río Pilcomayo". Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Buenos Aires.
- [4] Martín-Vide, J.P., Amarilla M. y Zárate F.J. (2012), "Collapse of the Pilcomayo River", *Geomorphology* 205.
- [5] Slingerland, R., y Smith N. D., (2004) "River Avulsions and their Deposits". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*.
- [6] Cafaro, E. D., (2007) "Evaluación de la información necesaria para el Diagnostico de una posible zona de avulsión del río Pilcomayo." Santa Fe, Argentina.
- [7] Fariás, H. D., y Cafaro E. D. (2010) "Estabilización del cauce principal y márgenes del Río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos. Tramo: Misión la paz / Pozo hondo – El Pantalon".
- [8] Díaz, É. B., y Testa Tacchino A. J. S., (2014) "Curvas de Excedencia para VM y MLP." Informe Interno.
- [9] USACE, (2010) "HEC-RAS v. 4.1.0., "River Analysis System. User's Manual".California, Estados Unidos.
- [10] USGS, (2014) "Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 1 arc second (30 m)".