

ANÁLISIS DE LA CRECIDA Y DESBORDES DEL RÍO PILCOMAYO DEL AÑO 2014

Alejo Testa Tacchino^{1,2,3}, Constanza Vargas^{3,4}, Mariano Corral^{3,4,4}, Mariana Pagot^{3,4}, Paolo Gyssels^{3,4}, y Andrés Rodríguez^{2,3,4}

Resumen: El análisis de las crecidas y desbordes del Río Pilcomayo es un asunto de interés binacional entre Paraguay y Argentina en cuanto a la distribución equitativa del recurso. En este trabajo se analiza la crecida del Río Pilcomayo entre el 29 de enero y el 7 de febrero del año 2014 y sus desbordes en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz con el apoyo en productos satelitales, aforos y lectura de niveles disponibles. También se aplica un modelo hidráulico unidimensional con HEC-RAS para aproximar el hidrograma de desbordes. El análisis aquí presentado permitió evaluar la recurrencia del evento para Misión La Paz, estimada en 1.1 años, el volumen desbordado que asciende a los 72 hm³, así como la velocidad de avance del frente de la crecida estimado en 6.80 km/día en 14 horas de desborde. También se estudia las superficies de las áreas inundadas y movimiento del lecho antes y después del paso de la crecida en las secciones de aforo.

Palabras clave: crecida 2014, desbordes, Río Pilcomayo, puntos críticos.

PILCOMAYO FLOOD EVENTS AND OVERFLOWS ANALYSIS FOR THE YEAR 2014

Abstract: The Pilcomayo River flood events and overflows are a binational issue concerning the fair distribution of the resource. The ultimate aim of this paper is to study the flood of the Pilcomayo River that took place from January 29th 2014 to February 7th 2014, and its overflow based on the analysis of available satellite images, gauging data, and water levels. A one-dimensional hydraulic model with HEC-RAS is applied in order to approximate the overflows hydrograph. The analysis presented in this work allowed us to evaluate the event recurrence at Misión La Paz, estimated at 1.1 years, the overflow volume in the order of 72 hm³, as well as the front face velocity of 6.80 km/day in 14 hours. We also studied the area of flooded regions and bed movement in gauge sections before and after the flood event.

Keywords: 2014 flood event, critical points, overflow, Pilcomayo River.

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 área de estudio está comprendida entre Villamontes, Tarija, Bolivia (21°15' S; 63°28' O) a 407 m s. n. m., sección donde se considera que comienza la cuenca baja, y Misión La Paz, Salta, Argentina (22°35' S; 62°23' O) a 230 m s. n. m. (Halcrow y Serman, 2007). La ciudad de Villamontes es considerada el punto de salida de la cuenca alta, y su importancia reside en proporcionar los caudales líquidos y sólidos de entrada a la cuenca baja.

¹ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (CONICET).

² Laboratorio de Hidráulica (LH), FCEFyN, UNC.

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

⁴ Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT), UNC, Argentina; Bv. Dr. Filloy s/n Ciudad Universitaria, CP: 5000, Tel.:0351-4334446, alejotestat@gmail.com.

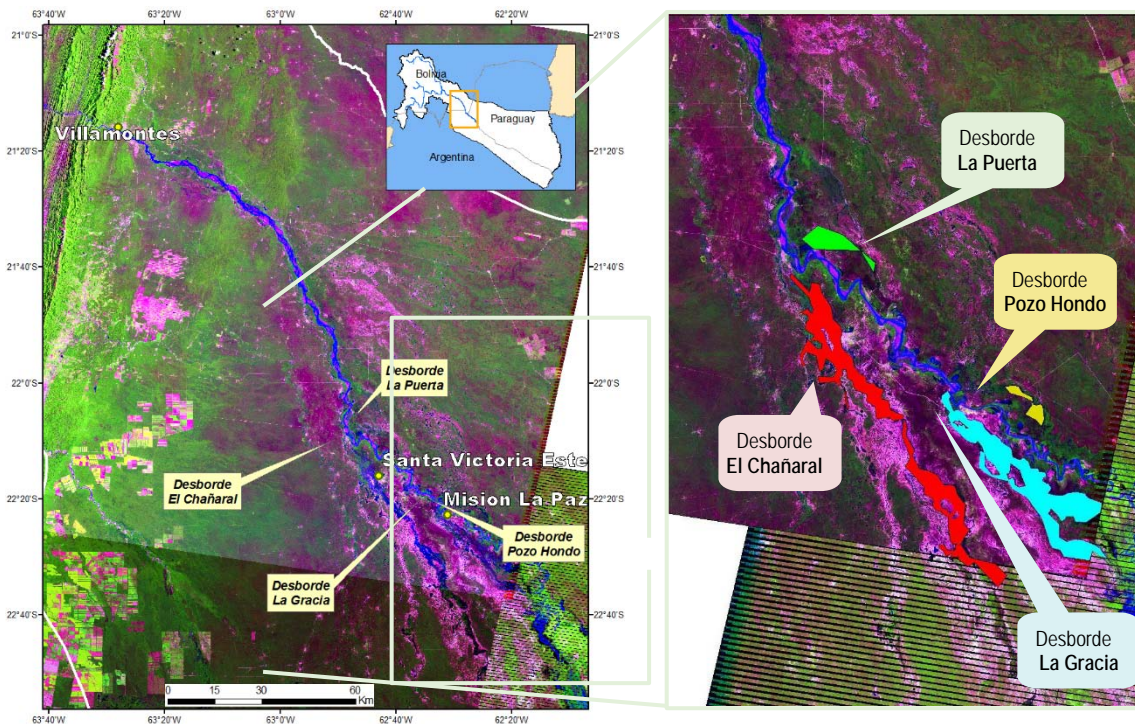


Figura 1: Área de estudio y desbordes principales.

Son conocidas las numerosas particularidades de este río que presenta un transporte medio anual de sedimentos de 140 millones de toneladas (Martín Vide et al., 2006) y caudales medios diarios que oscilan entre $37 \text{ m}^3/\text{s}$ y $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ en la localidad de Villamontes y entre $7 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ para Misión La Paz. Entre los problemas que caracterizan este río podemos encontrar numerosas zonas de desbordes, el más importante de ellos, denominado El Chañaral, inunda áreas de hasta 180 km^2 . El río presenta una extinción del cauce 220 km aguas abajo de Villamontes (Pool y Van Duijne, 1996). El Río Pilcomayo no desemboca directamente en el río Paraguay como un río tradicional, sino que avanza por su abanico aluvial abriendo cauces temporarios. Actualmente hay una bifurcación artificial que distribuye las aguas hacia Argentina y Paraguay mediante canales que alimentan humedales y esteros, en el caso de Argentina al Bañado La Estrella, en el caso de Paraguay a la laguna Agropil. Al río Paraguay desembocan riachos sin una conexión superficial entre lo que se conoce como Pilcomayo Superior (hasta la bifurcación) e Inferior, subdivisiones de la cuenca baja. A marzo de 2015 la distancia a la bifurcación desde la estación de VM era de 256 km por el cauce o 203 km en línea recta y desde la estación de MLP era de 72 km por el cauce o 45 km en línea recta .

En trabajos previos (Testa Tacchino et al., 2013) se han caracterizado los desbordes que ocurren en el tramo comprendido entre Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP), y se ha encontrado que la mayor dificultad para su estudio reside en la obtención de las curvas altura-caudal (H-Q) en MLP consecuencia de la movilidad de esta sección por el elevado transporte de sedimentos y el fondo erosionable, así como también el impedimento de medir velocidades con técnicas convencionales (molinetes) para caudales cercanos a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$.

OBJETIVOS

El objetivo que se plantea este trabajo es estudiar la crecida entre el 29 de enero y el 7 de febrero del año 2014 a partir de la información proveniente de aforos, lectura de niveles, imágenes satelitales y modelación numérica con el fin de avanzar en la comprensión de los fenómenos de crecidas y desbordes del Río Pilcomayo en su cuenca baja superior.

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS EN EL RÍO PILCOMAYO

Los eventos de crecidas del río Pilcomayo se reconocen como de gran magnitud e impacto, aunque en la actualidad sigue siendo un tema en el que no se ha indagado lo suficiente. Analizando la diferente bibliografía, sumado a las imágenes satelitales disponibles, lecturas hidrométricas y aforos, así como también a las campañas realizadas en campo, se ha planteado la necesidad de encontrar una metodología que contemple diversos aspectos de estudio de una forma ordenada para agilizar el análisis que, en un esquema integral básico, garantice que la interpretación de los eventos por diferentes autores se encuentre unificada, y que a la vez permita un análisis en lapsos de tiempo acotados, pues consiste en una tarea ya definida. Este trabajo presenta una primera aproximación al desafío de buscar una metodología para el análisis de las crecidas y desbordes del Río Pilcomayo.

Para estudiar la crecida y desbordes del Río Pilcomayo se procedió de la siguiente manera:

1. Recolección de niveles de agua (escalas) disponibles en el tramo. Se cuenta con las estaciones de Villamontes (VM) y Misión la Paz (MLP).
2. Aplicación de la curva Altura vs Caudal (H-Q) de Villamontes y verificación con los aforos que se realicen durante la crecida. Obtención de H-Q de Misión La Paz a partir de los aforos y contraste con H-Q histórica y de crecidas anteriores. Se recomienda utilizar formulaciones diferentes para rama ascendente y descendente del hidrograma de crecida.
3. Análisis de las lecturas de escala, con el fin de determinar el tiempo de arribo del caudal pico y frente de la crecida así como también la duración del pico y de la crecida.
4. Recolección de las imágenes satelitales para el periodo de crecidas, buscando aquellas con poca cobertura de nubes. Posterior análisis para localizar manchas por desbordes. Comparación con imágenes anteriores para detectar movimientos abruptos de meandros.
5. Presentación de datos en una tabla resumen y comparación de los datos obtenidos con los de crecidas anteriores, para verificar que se cumplan los patrones ya establecidos, relación longitud-área de desborde, velocidad de avance, tiempo de permanencia, así como el tiempo por encima de los 2700 m³/s en VM, es decir con desbordes activos.
6. Aplicación del modelo hidráulico unidimensional desarrollado (HEC-RAS) y comparación con modelaciones de otras crecidas.
7. Con los Aforos de Misión la Paz, analizar los movimientos del lecho.

Este procedimiento permite obtener como resultado los tiempos de propagación de la crecida, de su pico y frente de avance, además de los tiempos base y pico de los hidrogramas en Villamontes y Misión La Paz. También permite determinar los desbordes activos y el tiempo que permanecen activos, periodo de retorno del evento en MLP, localización de las áreas inundadas como consecuencia de los desbordes, volumen desbordado, velocidad de avance del frente de desborde y una primera aproximación al hidrograma de desbordes como resultado de la aplicación del modelo hidráulico unidimensional, además nos permite la comparación con crecidas anteriores.

ANÁLISIS DE LA CRECIDA DEL AÑO 2014

Es de fundamental importancia estudiar las crecidas y desbordes del Río Pilcomayo año a año. Se ha sistematizado la información disponible en un método que permite abordar de forma organizada el análisis de la crecida de fácil aplicación y adecuado a las complejidades particulares de este río. En este trabajo se presenta la crecida del año 2014 analizada por el método propuesto, se ha elegido este evento por ser reciente y además la disponibilidad de información nos permite analizar la totalidad de los pasos de la metodología. Para la crecida del año 2015 no se posee información de campaña durante la crecida y no hay imágenes satelitales sin cobertura de nubes.

Niveles de agua (Lecturas de escala hidrométrica)

La Dirección Ejecutiva para el Desarrollo de la Cuenca Trinacional del río Pilcomayo (2015) ofrece las lecturas horarias de las estaciones de VM y MLP en su sitio de internet www.pilcomayo.net, las que se presentan de forma gráfica en la Figura 2. En algunos casos hay discontinuidades en las series, en estos casos se rellenan usando interpolación lineal.

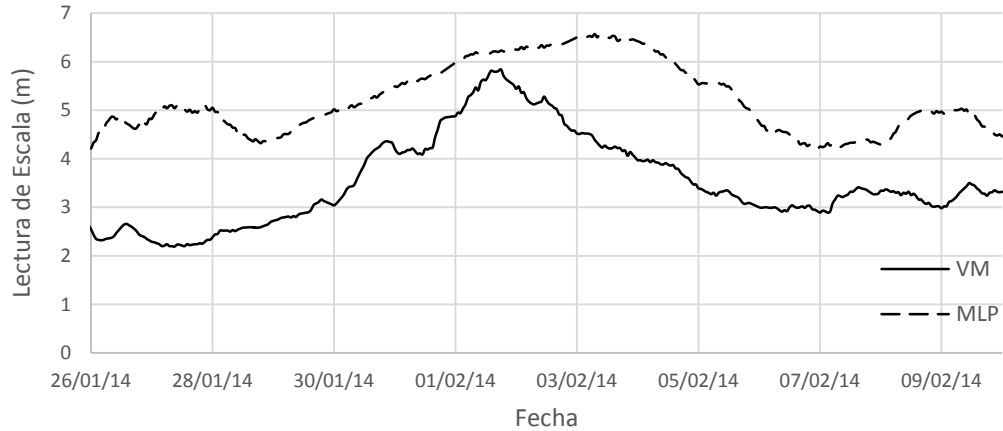


Figura 2: Lecturas de escala medias horarias para Villamontes y Misión La Paz, 2014.

Obtención de hidrogramas

Se obtienen las curvas de relación altura-caudal (H-Q) a partir de aforos. Para convertir las lecturas de escalas en caudales en Villamontes, se aplica la ecuación: $Q = 187.1 (H - 0.48)^{5/3}$ (Testa Tacchino, 2015) para fechas a partir del año 2004. Para Misión La Paz se obtiene la H-Q a partir de los aforos durante la crecida (enero – febrero 2014). Los resultados se presentan en la Figura 3, además se muestran las fechas para las cuales se poseen imágenes satelitales Landsat: 5 y 6 de febrero de 2014 (Img. 2014036 e Img. 2014037).

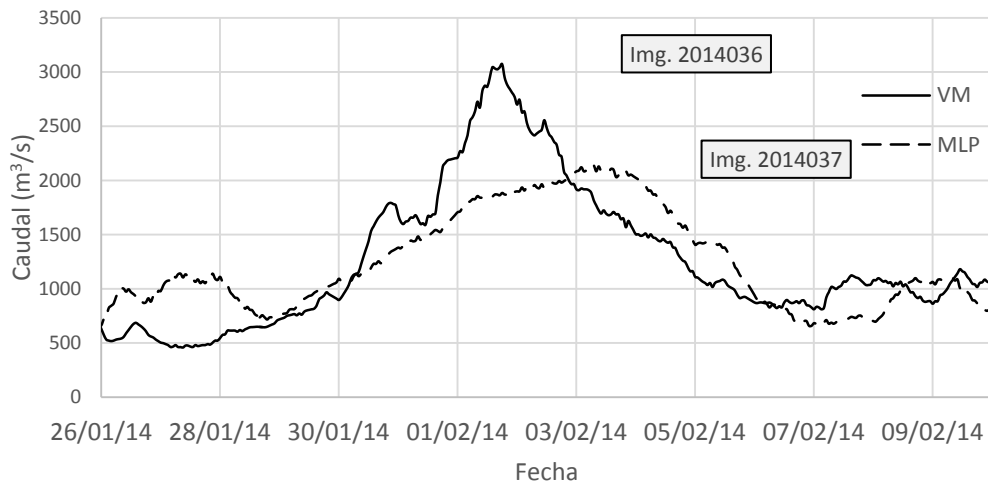


Figura 3: Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2014.

Determinación del período de retorno para caudales en Misión La Paz

En base a una serie histórica de caudales en Misión La Paz, proporcionada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (2015), se realizó una curva caudal, duración y recurrencia (Q-d-T).

Se contó con una serie de caudales medios diarios, desde el primero de enero de 1960 hasta el 31 de agosto de 2011. Actualmente se está planteando actualizar este trabajo con los caudales hasta 2016.

El procedimiento consiste en tomar para cada año el mayor caudal medio ocurrido para cada duración en días (de 1 a 10 días). Es decir, para dos días se toma el promedio de los caudales medios diarios de ese día y del día posterior.

Una vez obtenidos los caudales medios diarios máximos anuales para las diferentes duraciones se procede al análisis estadístico de los datos previa verificación de independencia (Wald-Wolfowitz) y homogeneidad (Wilcoxon). Se utilizaron las curvas de probabilidad Gumbel y Log-Pearson tipo III. En las Tablas 1 y 2, se resumen los resultados para un día de duración.

Tabla 1: Recurrencia de caudales medios diarios para un día de duración en MLP, curva de probabilidad Gumbel

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza (95%)
Años	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
100	4840	417	4020 - 5650
50	4330	362	3620 - 5040
20	3650	291	3080 - 4220
10	3130	237	2660 - 3590
5	2580	184	2220 - 2940
3	2150	147	1860 - 2430
2	1750	119	1520 - 1990

Tabla 2: Recurrencia de caudales medios diarios para un día de duración en MLP, curva de probabilidad Log-Pearson III.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza (95%)
Años	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
100	4690	716	3290 - 6100
50	4250	531	3210 - 5290
20	3630	344	2950 - 4300
10	3130	249	2640 - 3620
5	2590	190	2220 - 2960
3	2150	157	1840 - 2460
2	1750	132	1490 - 2010

De igual forma se procedió para diferentes duraciones obteniéndose el gráfico Q-d-T presentado en la Figura 4.

La función potencial que representa la relación entre las tres variables, con cuatro parámetros de ajuste es (Testa Tacchino, 2015):

$$Q(d, T) = 37520 \frac{T^{0.1465}}{(d+14.67)^{1.022}} \quad \text{o} \quad T = \left(\frac{Q \cdot (d+14.67)^{1.022}}{37520} \right)^{6.8259} \quad (1)$$

donde Q es el caudal, d es la duración y T el periodo de retorno o recurrencia.

A partir de la formulación obtenida para el análisis del periodo de retorno en función de la duración de los caudales, se ha calculado que el periodo de retorno para el evento estudiado es de 1.1 año en MLP considerando 4 días de duración con caudal medio de 1900 m³/s. Para esta crecida se ha determinado que los desbordes, que se comienzan a activar desde los 2700 m³/s en VM, han estado activos por menos de un día. El volumen desbordado, calculado como la diferencia entre los dos hidrogramas, ha sido de 72 hm³.

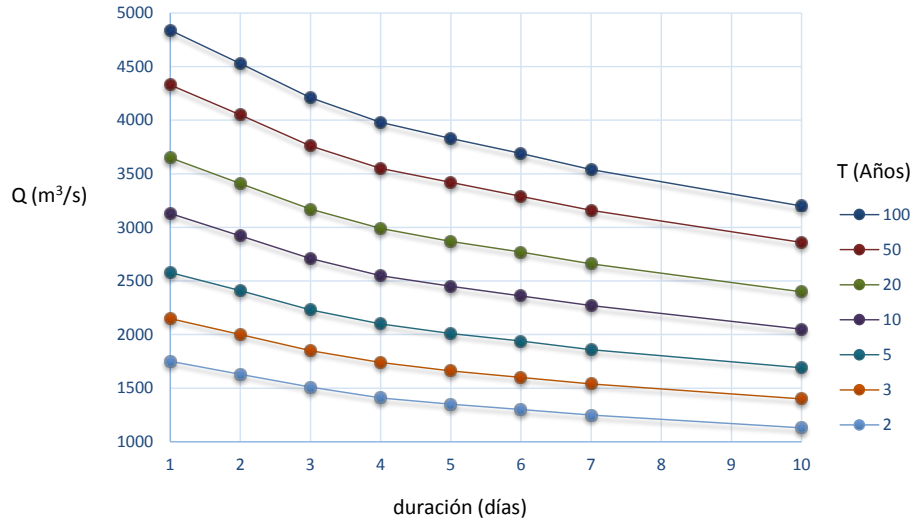


Figura 4: Curvas Q-d-T para Misión La Paz, Curvas de Probabilidades Gumbel.

Análisis de niveles de agua (Lecturas de escala hidrométrica)

Estudiando las lecturas de niveles horarios (Figura 5) proporcionadas por un sensor de radar, se estimó el tiempo de traslado de la crecida. La velocidad a la que viaja no es constante sino que depende del caudal y el tirante en cada momento. Se ha determinado que el caudal pico demoró 31 horas en llegar de VM a MLP, y considerando que la distancia por el cauce entre las dos estaciones es de 193.6 km, se obtiene que la velocidad media del caudal pico es de aproximadamente 1.7 m/s.

Además se calculó que el tiempo base del hidrograma de Villamontes es 6 días 6 horas y el de Misión La Paz de 9 días 3 horas y una duración del pico de 2 días 18 horas.

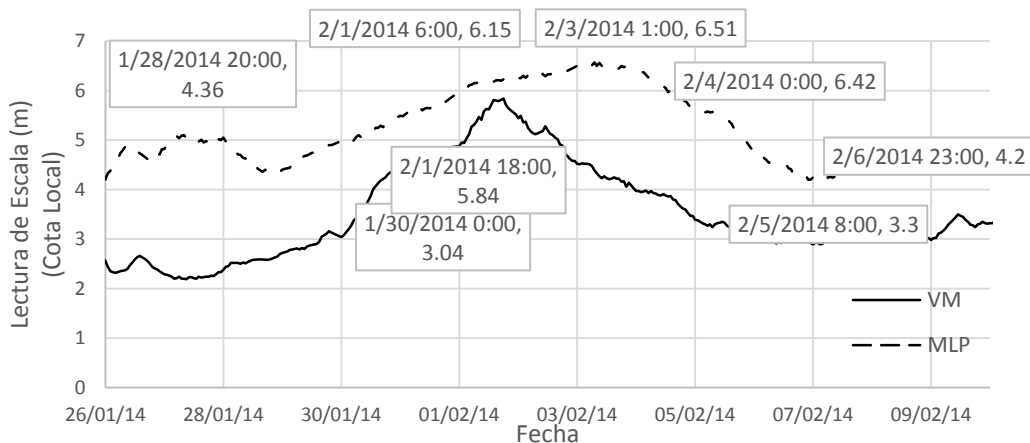


Figura 5: Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2014.

Análisis de imágenes satelitales

Para el análisis de esta crecida se utilizaron imágenes Landsat 7 y 8. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 30 m y una frecuencia temporal de 16 días. Para la crecida en estudio se han conseguido dos imágenes de la zona de desborde, la primera del día 5 de Febrero a las 21:48 horas de Landsat 8 (Q= 995 m³/s en VM y 921 m³/s en MLP) y otra del día 6 de Febrero a las 11:00 horas de Landsat 7 (Q=876 m³/s en VM y 624 m³/s en MLP). Para el análisis se trabajó con la combinación de bandas (5,4,3) para la imagen Landsat 7, y con las bandas (6,5,4) para la imagen Landsat 8.

El área inundada por El Chañaral para el día 5 de febrero fue de 114.19 km² con una longitud de 47.78 km y para el día 6 de febrero de 116 km² de superficie y 48.5 km de longitud. Se toma como longitud representativa del desborde la máxima extensión de la zona inundada. El pico de caudal fue de 3071 m³/s el 2 de febrero en VM y de 2137 m³/s el día 3 de febrero en MLP. Los caudales mencionados precedentemente fueron obtenidos a partir de curvas H-Q. En la Figura 6 se identificaron los desbordes activos y la Tabla 3 presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de las imágenes.

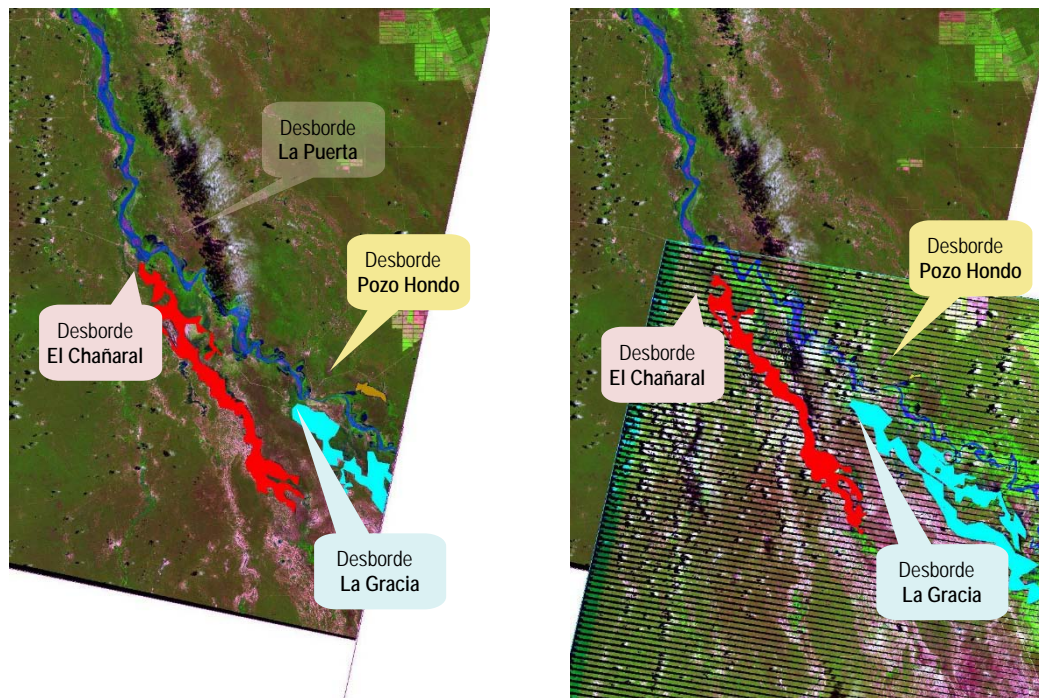


Figura 6: Delimitación de desbordes, Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014; Der.) Imagen Landsat 7, 6/2/2014.

Tabla 3: Tabla resumen de las características de los desborde para el año 2014. a) Duración de desborde, b) Longitud y Área de desborde.

C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C9 (C5 - C3)	C10 (C2 - C5)
Imagen	Fecha img dd/mm/año	Fecha del Pico VM dd/mm/año	Qp VM m ³ /s	Fecha del Pico MLP dd/mm/año	Qp MLP m ³ /s	Q VM m ³ /s	Q MLP m ³ /s	ΔT pico días	ΔT img y pico MLP días
2014036	05/02/2014	01/02/2014	3071	03/02/2014	2137	1035	1336	2	2
2014037	06/02/2014	01/02/2014	3071	03/02/2014	2137	867	797	2	3

Imagen	Fecha dd/mm/año	Desbordes hacia Argentina				Desbordes hacia Paraguay			
		El Chañaral		La Gracia		Pozo Hondo		La Puerta	
		Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²
2014036	05/02/2014	47.71	115.78	28.27	111.72	5.40	6.96	Sin Visibilidad	Sin Vis.
2014037	06/02/2014	49.81	122.22			2.27	0.98		

Para el año 2014 se activaron los cuatro desbordes: El Chañaral, La Gracia, Pozo Hondo y La Puerta. El desborde La Puerta no pudo ser analizado por haber sombras de nubes en su zona de influencia.

Resultado de análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores

Se ha establecido para el desborde El Chañaral una relación entre el tiempo, en días, desde que se activa el desborde hasta el momento de la imagen satelital y la velocidad media de avance del desborde, en kilómetros por día.

$$V_{avance} \left[\frac{km}{día} \right] = t^{0.851} [día] \tag{2}$$

En las imágenes de la Figura 6 se observa el avance del frente del desborde El Chañaral que totaliza 3740 m en cerca de 14 horas, resultando en una velocidad de avance de 6.80 km/día. Se calculó en un trabajo previo que en el año 2006 el frente avanzó 7.2 km en 8 días (tiempo entre dos imágenes disponibles) o una velocidad de avance media de 900 m/día (Testa Tacchino et al., 2014). Se ha podido observar que la velocidad de avance del desborde es relativamente mayor durante el primer día, contabilizando desde que se activa el desborde, y que luego va disminuyendo a medida transcurren los días, esto se manifiesta en la diferencia de velocidades medias al promediarlas en 14 horas (año 2014) y 8 días (año 2006). Este tema se profundiza en el próximo apartado. La Figura 7 presenta los valores históricos y los correspondientes a las dos imágenes disponibles del año 2014 de esta relación. Se observa que los puntos del año 2014 ajustan bien con respecto a lo previamente establecido en Testa Tacchino (2015). Esta figura además permite establecer cuantos kilómetros recorre por día la mancha de inundación.

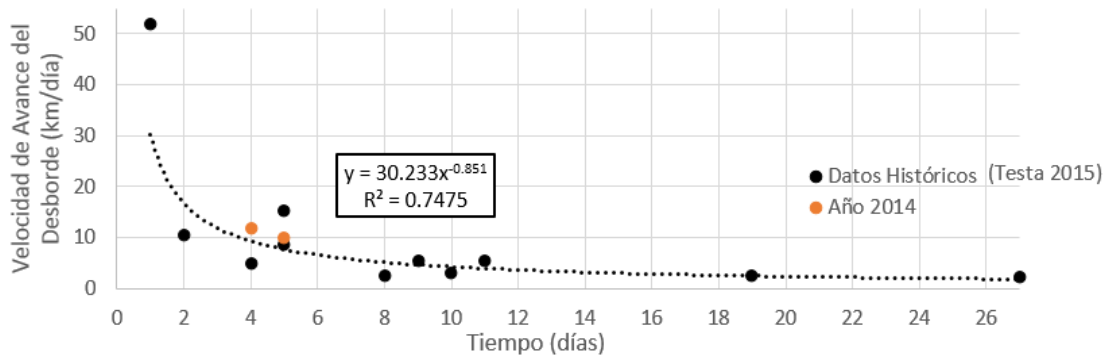


Figura 7: Días desde que se activa el desborde vs velocidad de avance (distancia/días recorridos por el desborde hasta la fecha de la imagen).

La Figura 8 presenta los resultados del año 2014 para las imágenes del 5 y 6 de febrero en comparación con los datos históricos. Esta figura es válida para los cuatro desbordamientos. Se observa una buena coincidencia. En el caso de El Chañaral, una vez calculada la distancia recorrida por el desborde con la Figura 7, se puede calcular el área inundada con la Figura 8.

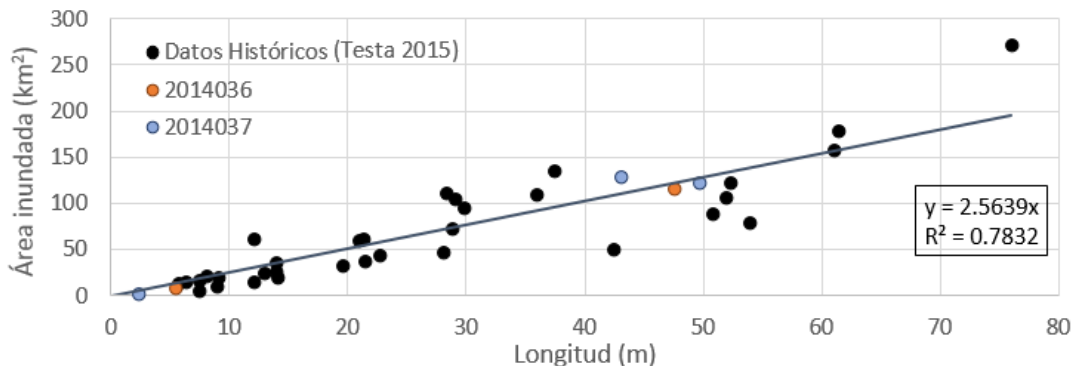


Figura 8: Relación entre área inundada y extensión del desborde.

Comparación con desbordes anteriores, mediante GIS

Se representaron en la Figura 9 todas las áreas inundadas por desbordes registradas por imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Se puede observar que las manchas son coincidentes para las diferentes crecidas. No obstante, se observaron 3 casos particulares. En el año 2008, una crecida con 17 años de periodo de retorno con 273 km² inundados, en la que el desborde el Chañaral inundó además del trayecto usual una porción al este (en amarillo). En el año 2013, representado en blanco en la figura, se observa que en la zona del Chañaral el Río Pilcomayo también desborda por margen derecha en una zona en la que no se tenía registro previo. En el mismo año 2013 se observa que al Norte de La Puerta, en margen izquierda, a los 22° 00' de Latitud Sur y 62° 47' de Longitud Oeste, está activo un desborde que tampoco ha sido registrado antes con las imágenes. Es importante ver el desarrollo y posible recurrencia de estos nuevos desbordes y áreas inundadas, se pudo ver que estas particularidades no se presentaron en el año 2014.

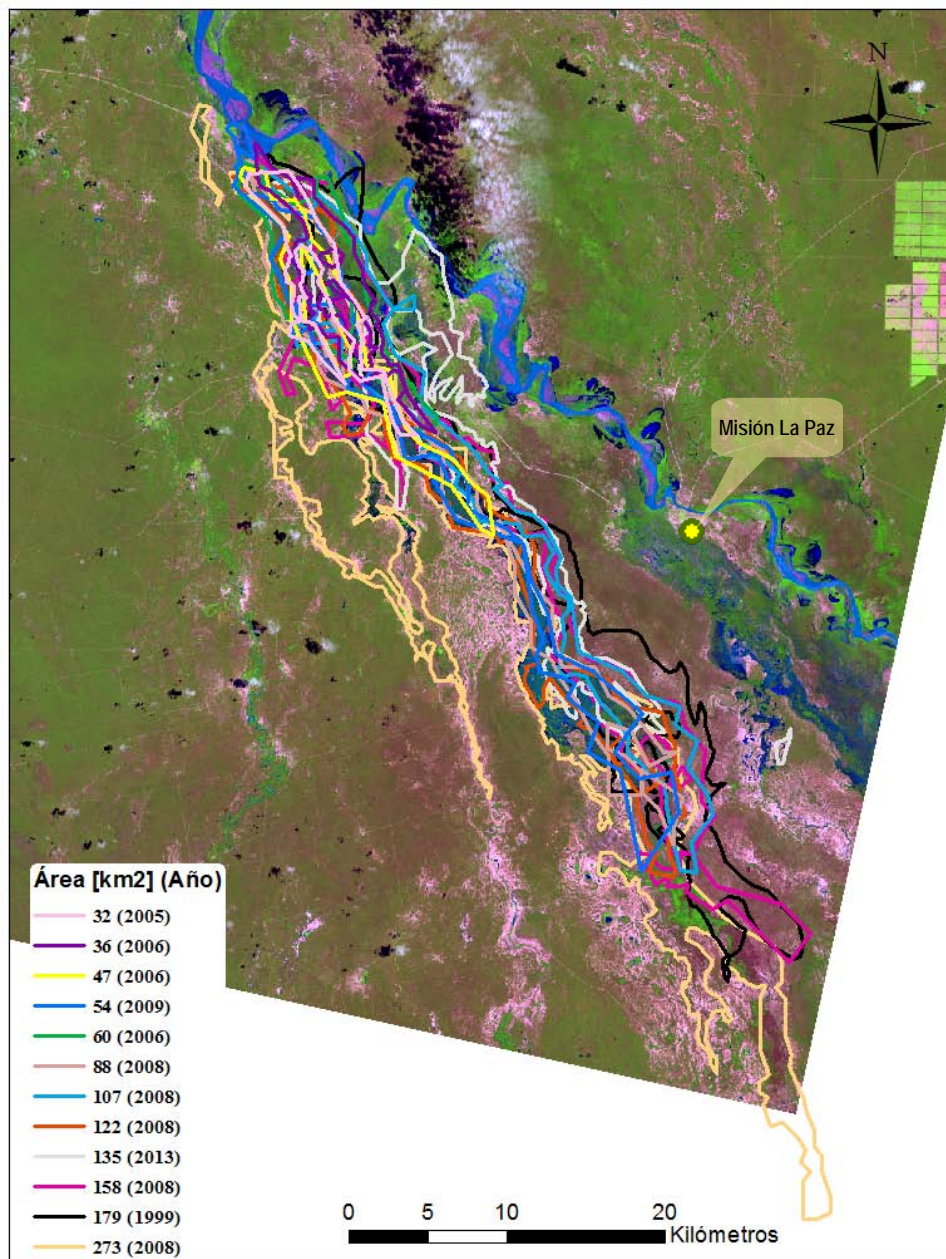


Figura 9: Contornos de áreas inundadas por el desborde El Chañaral en diferentes eventos según extensión.

Aplicación del modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS)

Se ha modelado hidráulicamente el tránsito de una onda de crecida en el Río Pilcomayo en una dimensión, a régimen no permanente y de fondo fijo utilizando el programa conocido como HEC-RAS 4.1.0 (USACE, 2010). Con el objetivo de ver qué sucede con el hidrograma al haber una pérdida de caudal consecuencia de los desbordes, se simuló un vertedero lateral en la progresiva correspondiente al desborde El Chañaral (Progresiva aguas abajo de VM: 70260 m). En este trabajo se analizó el tramo con un solo vertedero lateral que simularía los cuatro desbordes, en trabajos futuros se pueden proponer estudios con múltiples vertederos. La cresta del vertedero lateral se tomó igual al punto más bajo de la margen derecha del río a la altura del Chañaral (cota 273 m s. n. m.).

El modelo fue calibrado a partir de hidrogramas observados en Villamontes, sección de entrada al modelo, y en Misión La Paz, sección de salida del modelo. Se compararon los hidrogramas observados con los hidrogramas modelados en Misión La Paz para ajustar los coeficientes del modelo hasta lograr una óptima aproximación a crecidas de las que se poseen registros. Posteriormente se utilizaron crecidas, que no fueron utilizadas para la calibración, para la verificación del modelo, es decir se superpusieron los resultados del modelo con los observados, pero ya sin modificar coeficientes, este es el caso de la crecida presentada en este trabajo.

La Figura 10 presenta los resultados de la modelación hidrodinámica comparados con el hidrograma observado, se observó que hay una diferencia de 10 horas en el arribo del pico, no obstante si se considera el frente de crecida como el punto en el que el caudal alcanza los $1700 \text{ m}^3/\text{s}$, la diferencia es de una hora. Este es el punto que se ha fijado en trabajos anteriores. También se obtuvo que el volumen de agua calculado es un 11% menor que el observado en MLP. Al igual que en modelaciones de crecidas anteriores, se observa un defecto de volumen en la rama ascendente y exceso en la rama descendente del hidrograma que probablemente se debe a que se ha considerado un solo vertedero lateral para representar los cuatro desbordes principales que ocurren en el tramo.

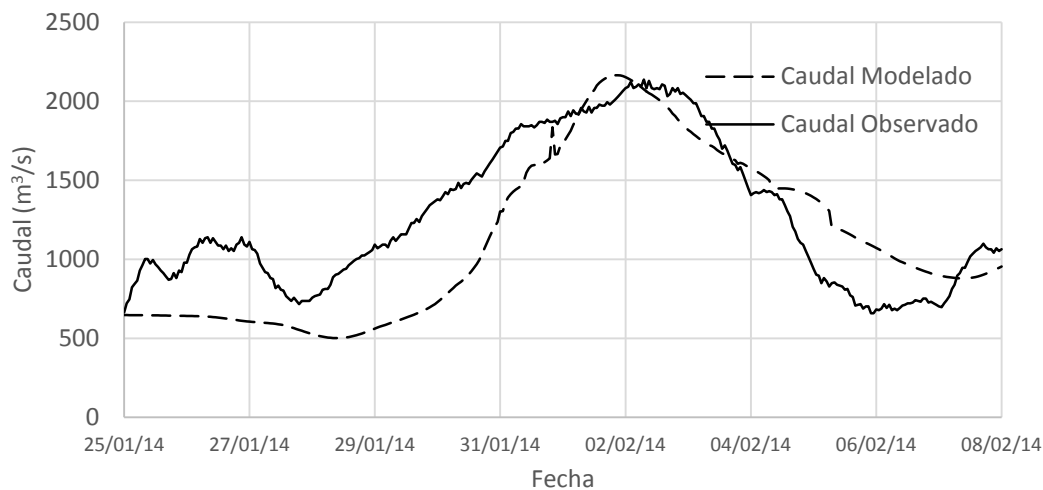


Figura 10: Comparación de hidrogramas modelado y observado.

La modelación ha permitido tener una primera aproximación al hidrograma de desborde, del cual no se poseía ningún tipo de información hasta el momento, ya que es muy difícil de aforarlos por su inaccesibilidad e inexistencia de infraestructura, que se presenta en la Figura 11.

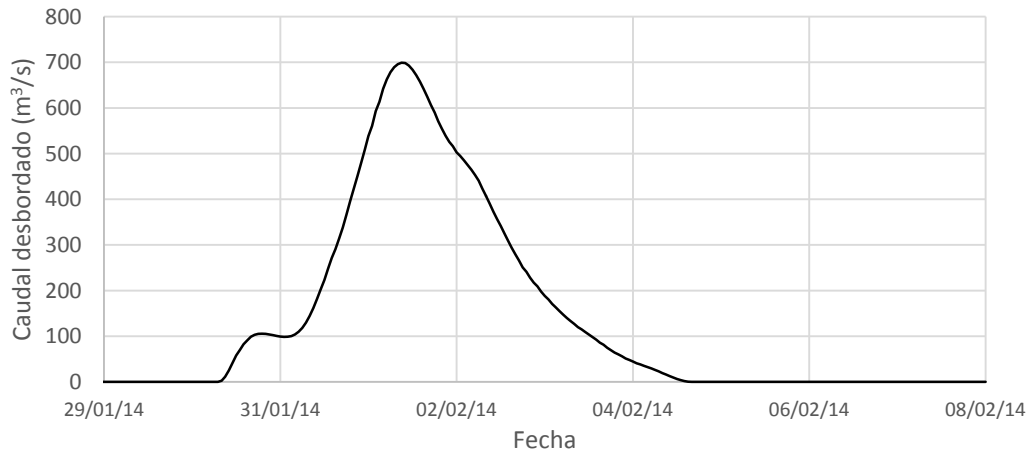


Figura 11: Hidrograma simulado del desborde concentrado en El Chañaral para la crecida del verano de 2014.

Movimiento del lecho en las estaciones de Villamontes y Misión La Paz

Para el año 2014 se realizaron dos campañas de aforos y reconocimiento del Río Pilcomayo, la primera se realizó entre el 13 y el 24 de enero de 2014, antes del paso del pico de la crecida y la segunda entre el 19 y el 23 de febrero de 2014 después del paso del pico de la crecida. Las campañas se formalizaron con medios de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

La Figura 12 presenta la variación del fondo de la sección de aforo en Villamontes, consecuencia de la erosión general transitoria antes del paso de la crecida de enero de 2014 y la Figura 13 presenta los niveles según lecturas de escala para este periodo. La Figura 14 presenta el movimiento del fondo después del paso de la crecida en el mes de febrero y la Figura 15 presenta las lecturas de escala para este periodo. El cero de la escala en la sección de aforo de Villamontes corresponde a los 383 m s. n. m. y el cero de la escala en la sección de aforo en Misión La Paz a los 230 m. s. n. m.

Al observar el movimiento del fondo, se puede señalar que el lecho se encontraba en el orden de los -2.50 m de lectura de escala en cota local antes del paso de la crecida y luego del paso de la crecida el punto más bajo del lecho se encuentra a los -7.00 m (21/02/2014), para ir subiendo nuevamente con el transcurso de los días hasta los -4.60 m en el periodo analizado (25/02/2014). Se observa también que para igual lectura de escala la sección es muy distinta si es la rama del hidrograma es la ascendente o la descendente. Se constata que es muy importante tener presente la variabilidad del fondo en el momento de utilizar o calcular las curvas de relación altura-caudal (H-Q) en la sección.

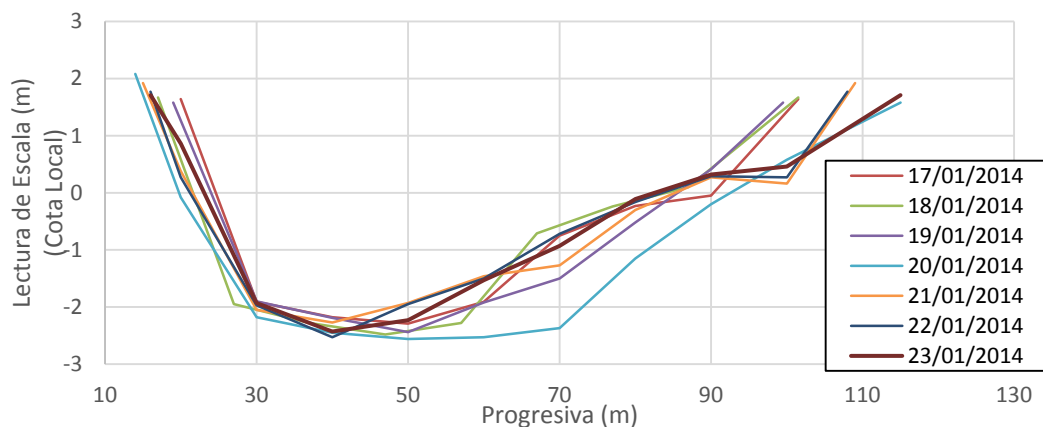


Figura 12: Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)

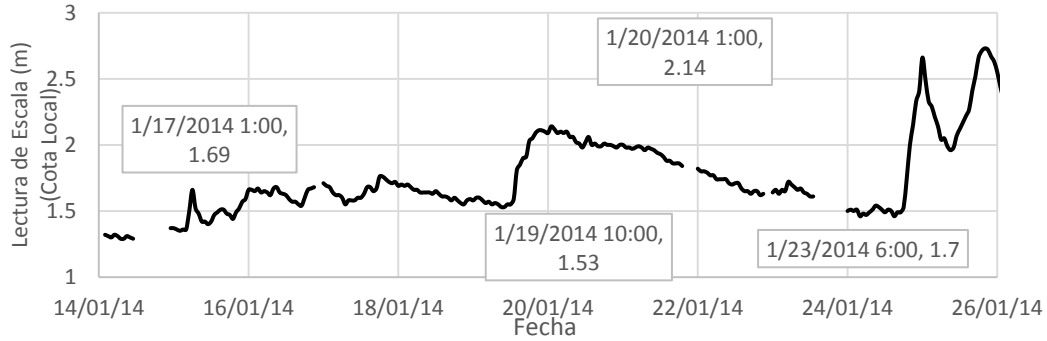


Figura 13: Niveles durante aforos, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014).

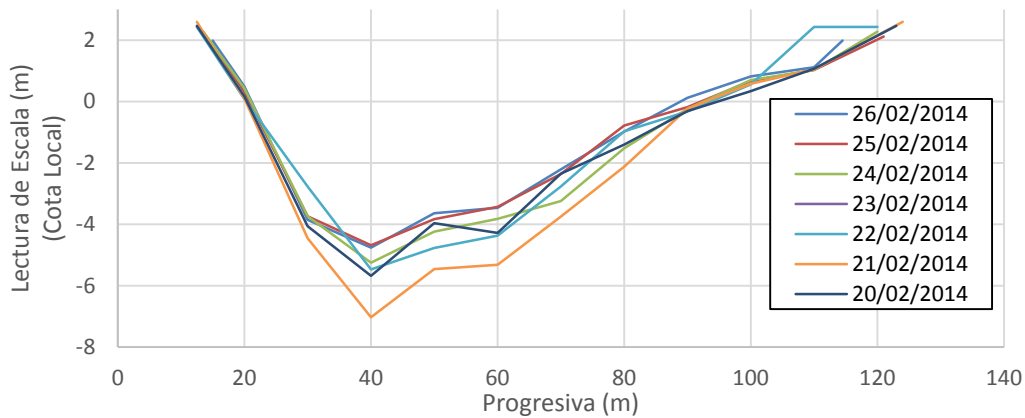


Figura 14: Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014).

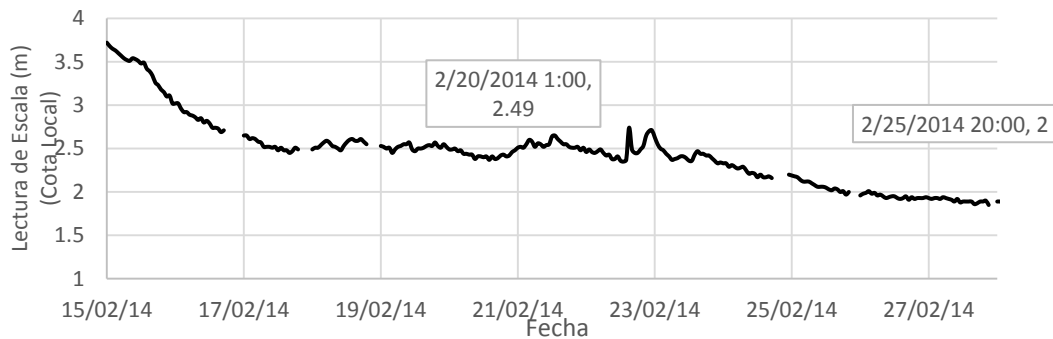


Figura 15: Niveles durante aforos, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014).

La Figura 16 muestra una variación significativa de la sección transversal durante aforos diarios en Misión La Paz en enero de 2014 y la Figura 17 presenta los niveles registrados. Se observa que el punto más bajo del lecho ha descendido hasta 1.3 m con efectos también de mucho movimiento en el resto del fondo. En MLP no se posee información después del paso de la crecida, en la rama descendente del hidrograma, ya que debido a los desbordes y lluvias intensas fue imposible el ingreso a la localidad.

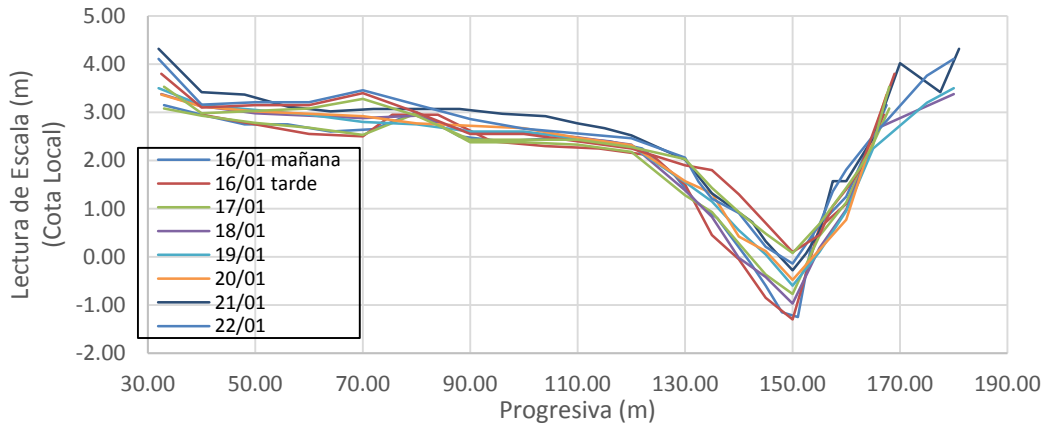


Figura 16: Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014) .

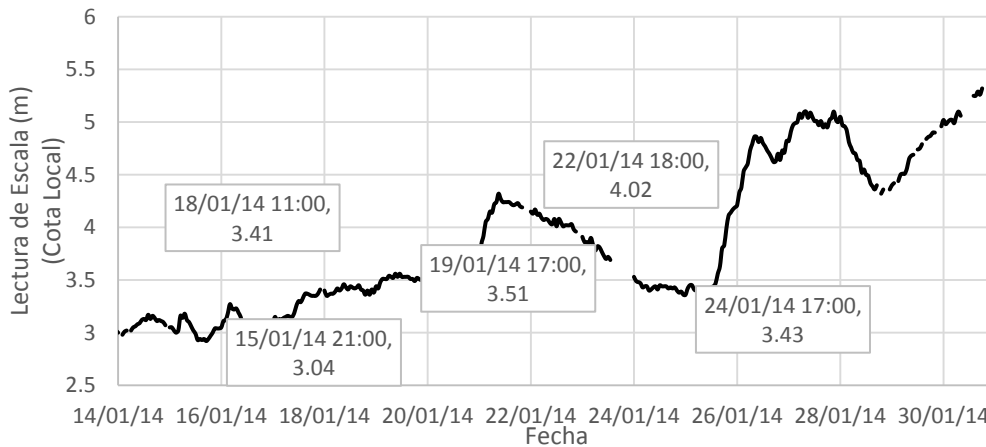


Figura 17: Niveles durante aforos, 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014).

CONCLUSIONES

El procedimiento aplicado para el estudio de la crecida en el Río Pilcomayo permite estimar: tiempos de propagación de la crecida, de la magnitud de su flujo pico y de su frente de avance, así como de los tiempo base y pico de los hidrogramas en Villamontes y Misión La Paz. También permite determinar los desbordes activos y el tiempo que permanecen activos, el periodo de retorno del evento en MLP, localización de las áreas inundadas como consecuencia de los desbordes y volumen desbordado. De igual manera se puede estimar la velocidad de avance del frente de desborde y una primera aproximación al hidrograma de desbordes como resultado de la aplicación del modelo hidráulico unidimensional con HEC-RAS. El método aplicado permite además una mejor comprensión y comparación con eventos anteriores.

Se ha determinado a partir de las imágenes satelitales que en la crecida del año 2014 se activaron los cuatro desbordes principales aguas arriba de Misión La Paz. Luego de analizar las lecturas de escala horarias y obtener los hidrogramas, se determinó que el periodo de retorno de la crecida del año 2014 es de 1.1 años y que el volumen desbordado fue de 72 hm³. Con las imágenes satelitales se pudo determinar que la velocidad del frente de avance en El Chañaral fue de 6.80 km/día. Se compararon las áreas inundadas, longitud de mancha de agua y velocidades de desbordes con datos históricos observándose una muy buena relación, desviándose en un rango entre 12% y 15% de la predicha. Mediante herramientas GIS se pudo localizar y comparar los desbordes del año 2014 con desbordes

previos. Con el uso de modelos unidimensionales hidrodinámicos e hidrológicos se pudo estimar una forma probable del hidrograma de desborde.

Con datos de aforos en VM y MLP, se pudo observar un gran movimiento del lecho en ambas secciones. En Villamontes se alcanzaron 2.00 m de descenso del thalweg o vaguada antes del paso de la crecida, en lo que corresponde a la rama ascendente del hidrograma de crecida. Después del paso de la crecida, en la rama descendente del hidrograma, se midió una sedimentación del lecho de 2.40 m. Si ahora comparamos los niveles del lecho antes y después del paso de la crecida, se puede observar que el lecho queda 4.50 m por debajo de lo que estaba antes del paso de la crecida. En Misión La Paz, con información disponible solo antes del paso de la crecida el punto más bajo de la sección descendió 1.30 m durante el periodo de los aforos.

REFERENCIAS

- Cristanchi, M. A. y Testa Tacchino, A. J. S. (2014). "Informe Interno, Campaña enero de 2014." Misión la Paz, Salta, Argentina.
- Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (2015). Series hidrométricas, recuperadas de www.pilcomayo.net.
- Halcrow y Serman (2007). "Línea base ambiental y socioeconómica de la cuenca del Río Pilcomayo". Tarija, Bolivia.
- Laboranti, C. (2014) "Informe de campaña enero 2014 en Villamontes" Mesa Fluvial, UNLP, La Plata, Argentina.
- HEC-RAS v. 4.1.0 (2010). Modelo Hidráulico. USACE, United States Army Corps of Engineers. Disponible <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- HEC-HMS 4.0 (2013). Modelo Hidrológico. USACE, United States Army Corps of Engineers. Disponible en: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Martín Vide, J. P., Amarilla M., Gamarra M. y Zárate F. (2006). "Problema de sedimentación en el río Pilcomayo." Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Córdoba, Argentina.
- Pool, M.A. y Van Duijne J.D.G. (1996) "Informe final de la tercera misión de asistencia técnica enviada por la comisión de la Unión Europea a la zona del Pilcomayo." Bruselas, Bélgica.
- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (2015). Series Hidrométricas del Río Pilcomayo, recuperadas de <http://www.hidricosargentina.gov.ar>.
- Testa Tacchino, A. J. S. y Baldissone C. M. (2013) "Análisis de los desbordes del río Pilcomayo entre Villamontes y Misión la Paz." XXIV° Congreso nacional del agua. San Juan, Argentina.
- Testa Tacchino, A. J. S., Díaz E. B., Baldissone C. M., Cristanchi M. A., Pagot M., Tarrab, L. Herrero H., Corral M. A., Laboranti C., Rodríguez A. (2014). "Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: Caracterización y Restricciones." XXVI Congreso latinoamericano de hidráulica. Santiago, Chile.
- Testa Tacchino, A.J. S. (2015) "Caracterización de los Desbordes del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz" Tesis de Maestría en Cs. de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, UNC. Córdoba, Argentina