

# XXV<sup>o</sup> Congreso Nacional del Agua 2015

## Paraná, Entre Ríos - 15 al 19 de Junio de 2015

### ANÁLISIS DE LA CRECIDA DEL AÑO 2014 DEL RÍO PILCOMAYO EN SU TRAMO ENTRE VILLAMONTES Y MISIÓN LA PAZ .

**Testa Tacchino, Alejo** <sup>1, 2,3</sup>; **Cristanchi, María Alejandra** <sup>4</sup>; **Constanza Vargas** <sup>2, 3</sup>;  
**Rodríguez, Andrés** <sup>2,3</sup>; **Laboranti, Claudio** <sup>4</sup>; **Corral, Mariano** <sup>2,3</sup>; **Pagot, Mariana** <sup>2,3</sup>;  
**Hillman, Gerardo** <sup>2,3</sup>; **Farías, H. Daniel** <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (CONICET).<sup>2</sup> Laboratorio de Hidráulica (LH), FCEFYN, UNC, <sup>3</sup> Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), FCEFYN, UNC.<sup>4</sup> Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo. <sup>5</sup> Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE.

Bv. Dr. Filloy s/n Ciudad Universitaria, CP: 5000, Tel.: 0351-4334446, [alejotestat@gmail.com](mailto:alejotestat@gmail.com)

**Palabras Claves:** Pilcomayo – Desbordes – Puntos críticos – Crecida 2014.

### RESUMEN

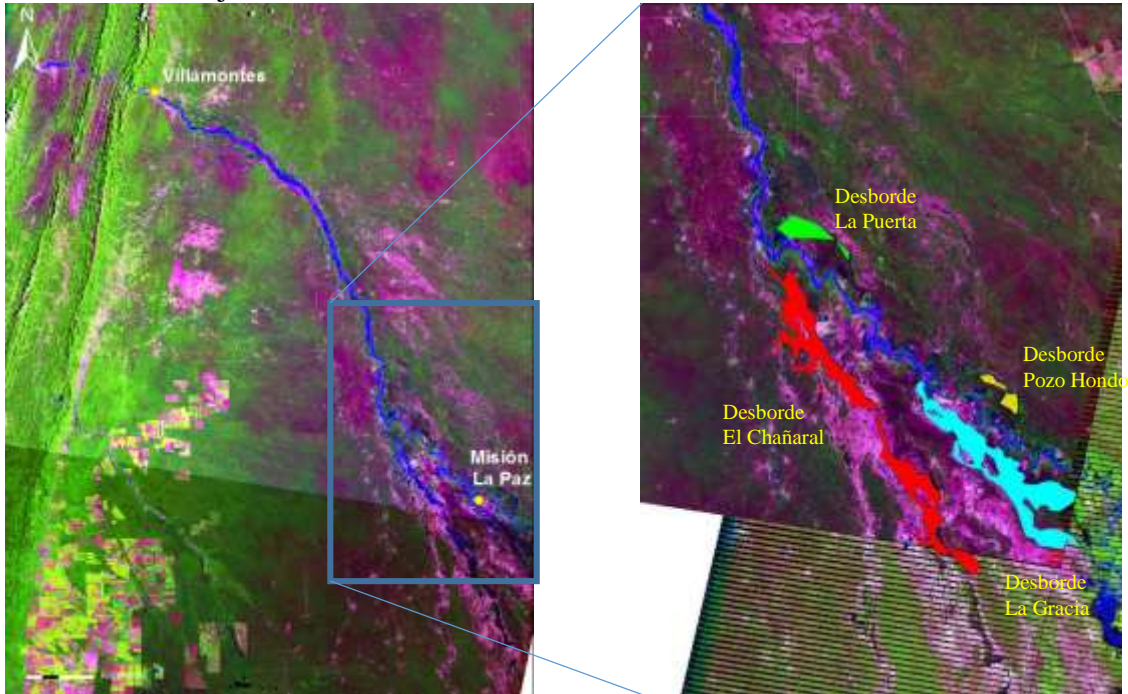
El Pilcomayo es un sistema fluvial de régimen muy variable y no regulado, con una de las tasas de transporte de sedimentos en suspensión más altas del mundo ( $125 \times 10^6$  Tn/año). Al salir de su tramo de montaña cercano a la ciudad boliviana de Villamontes, el río se caracteriza por altas tasas de sedimentación las cuales aumentan hacia aguas abajo. Producto de la misma, el río en la cuenca media 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 en su planialtimetría, propiciada por crecidas donde el flujo desborda en puntos específicos o “puntos críticos”. El río Pilcomayo es estratégico para el desarrollo socioeconómico del Norte Argentino, en particular para las Provincias de Salta y Formosa. La mayor parte de la cuenca activa se encuentra en Bolivia y luego es límite entre Argentina y Paraguay hasta la zona de Embocadura donde las aguas son distribuidas entre ambos países, siguiendo aguas abajo cursos naturales como el Bañado La Estrella y Río Monte Lindo. El objetivo del presente trabajo es el estudio de los desbordes del río Pilcomayo consecuencia de la crecida del año 2014 en el tramo que va desde Villamontes (Bolivia) hasta Misión La Paz / Pozo Hondo (Argentina / Paraguay), tramo donde se ubican la mayoría de los puntos críticos con riesgo de avulsión, además de verificar la relación de los resultados obtenidos con estudios y calibraciones realizados en trabajos previos.

Se localizaron los puntos de desborde, se determinaron las superficies de agua desbordada y su relación con hidrogramas para finalmente estimar volúmenes de desborde y velocidades de avance de las manchas de inundación.

Para dicho trabajo se ha procesado información de imágenes satelitales y series de aforos hidrométricos provenientes de estaciones claves en el tramo analizado del río.

## INTRODUCCION

La cuenca del río Pilcomayo abarca una superficie de 288.360 km<sup>2</sup> y es parte integrante de la gran Cuenca del Plata. Su cuenca se divide en dos, la cuenca alta de montaña con cota hasta 5700 msnm y la cuenca baja de llanura con cota desde 400 msnm hasta 50 msnm. El área de estudio está comprendida entre Villamontes, Tarija, Bolivia (21°15' S; 63°28' O) a 407 msnm y Misión La Paz, Salta, Argentina (22°35' S; 62°23' O) a 230 msnm (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.



**Figura 1.-** Área de Estudio y Desbordamientos Principales.

Son conocidas las numerosas particularidades de este río que presenta un transporte medio anual de sedimentos de 140 millones de toneladas (Martín Vide, y otros 2006) y caudales que oscilan entre 37 m<sup>3</sup>/s y 6500 m<sup>3</sup>/s en la localidad de Villamontes y entre 7 m<sup>3</sup>/s y 3000 m<sup>3</sup>/s para Misión La Paz. Entre los problemas que caracterizan este río podemos encontrar numerosas zonas de desbordamientos, el más importante de ellos, denominado El Chañaral, anega áreas de hasta 180 km<sup>2</sup>. Además, el río presenta una extinción del cauce 220 km aguas abajo de Villamontes (Pool y Van Duijne 1996). El río no desemboca en el río Paraguay, como se esperaría, sino que pierde su cauce y llega por medio de bañados y riachos, sin una conexión superficial entre lo que se conoce como Pilcomayo Superior e Inferior, subdivisiones de la cuenca baja.

En trabajos previos (Testa Tacchino y Baldissone 2013) se han caracterizado los desbordamientos que ocurren en el tramo comprendido entre Villamontes (VM) y Misión la Paz (MLP), y se ha encontrado que la mayor dificultad reside en la obtención de las curvas Altura-Caudal (H-Q) en MLP consecuencia de la movilidad de esta sección y el impedimento de medir velocidades con técnicas convencionales (molinetes) por encima de la lectura de escala de 4,5 m.

## OBJETIVOS

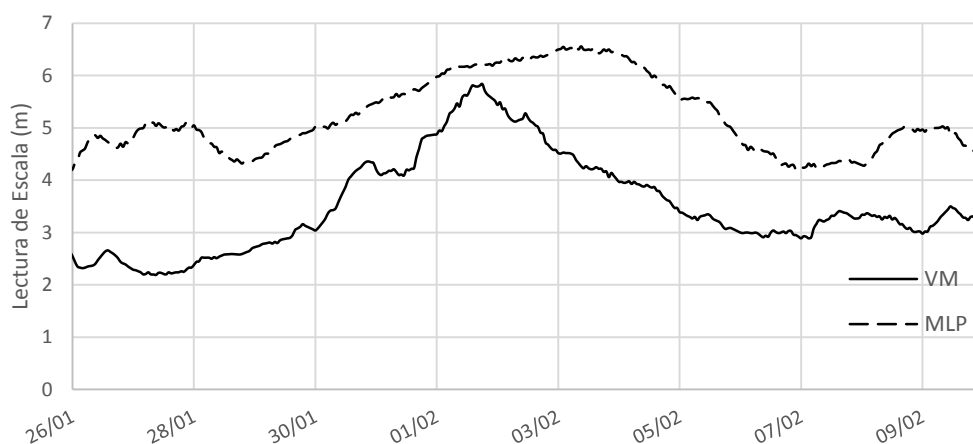
El objetivo que se plantea este trabajo es analizar las características hidráulicas de este tramo, zonas de desbordes, rugosidades y curvas H-Q en sus extremos (MLP y VM) y variabilidad de las mismas centrados en la crecida del Año 2014. Se implementa un método para el análisis de crecidas que pretende unificar el enfoque de los eventos.

### 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.

#### Lecturas de Escala

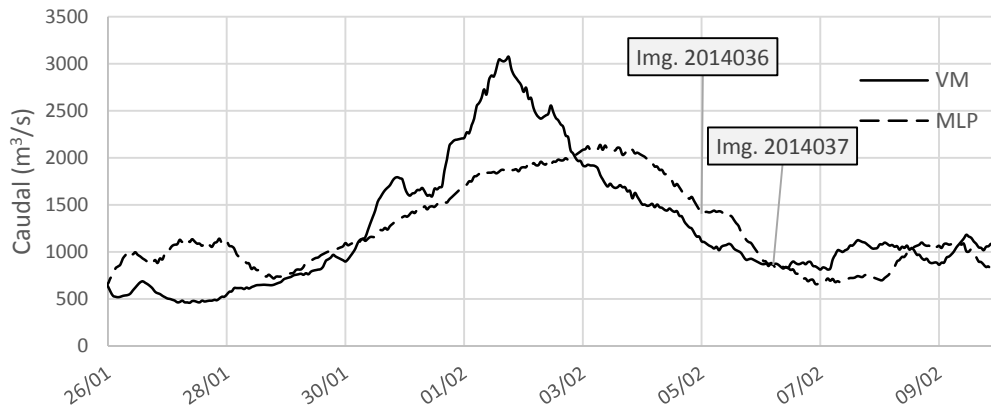
Se poseen las lecturas de escala horarias para VM y MLP, las que se presentan en la Figura 2. Las discontinuidades en la serie se rellenaron por el método lineal.



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

#### Obtención de Hidrogramas

Se obtienen las curvas altura-caudal a partir de aforos. Se aplica  $Q = 187,1 (H - 0,48)^{5/3}$  (2004-2014). 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, 5 y 6 de febrero de 2014 (Img. 2014036 e Img. 2014037).



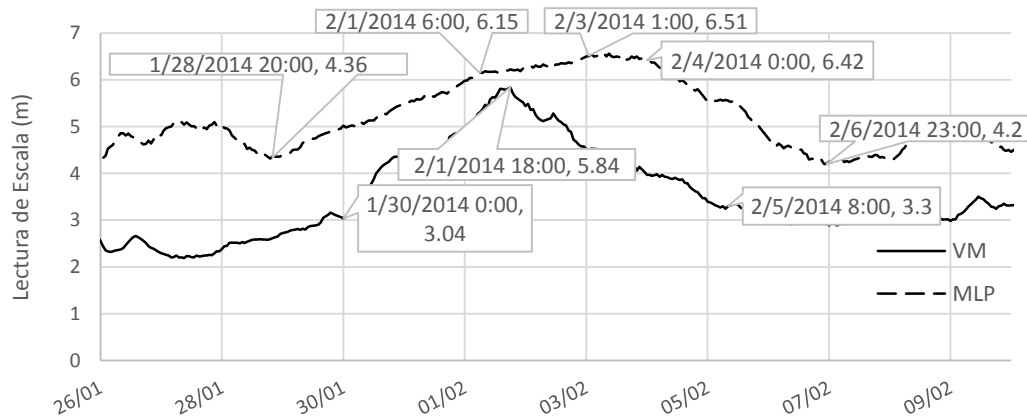
**Figura 3.-** Hidrogramas Calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2014.

En base a la formulación obtenida para el análisis del periodo de retorno en función de la duración de los caudales (Testa Tacchino, y otros 2014), se ha calculado que el periodo de retorno para este evento es de 1,1 año en MLP considerando 4 días con caudal medio de 1900 m<sup>3</sup>/s. Para esta crecida se ha determinado que los desbordes, que se comienzan a activar desde los 2700 m<sup>3</sup>/s en VM, han estado activos por menos de 1 día. El volumen desbordado, calculado como la diferencia entre los dos hidrogramas, ha sido de 72 hm<sup>3</sup>.

### **Análisis de las Lecturas de Escala**

Estudiando las lecturas de escalas horarias (Figura 4) proporcionadas por el sensor Kalesto, se ha podido estimar el tiempo de traslado de la crecida. La velocidad con que viaja, no es constante sino que depende del caudal y el tirante en cada momento. Se ha determinado que el pico demoró 31 hs 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 pico es de 1,73 m/s.

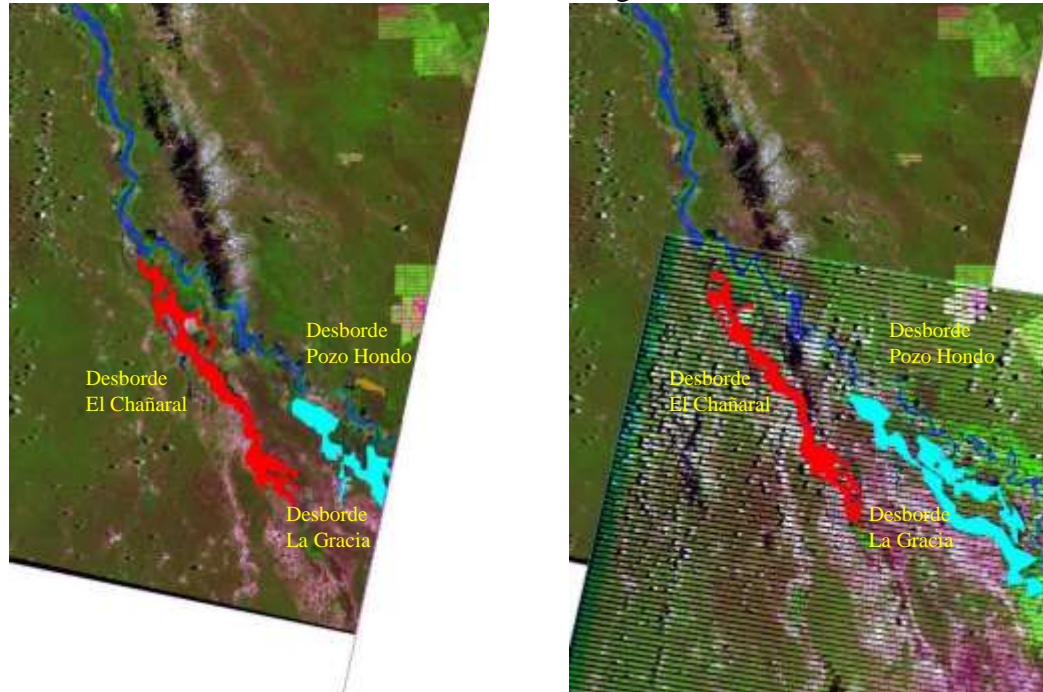
Además se calculó que el tiempo base del hidrograma de Villamontes es 6 días y 6 h y el de Misión La Paz de 9 días y 3 h y una duración de pico de 2 días 18 hs.



**Figura 4.-** Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2014.

## Análisis de Imágenes Satelitales

Se poseen para este caso una imagen de la zona de desborde del día 5 de Febrero a las 21:48 hs ( $Q=995\text{ m}^3/\text{s}$  en VM y  $921\text{ m}^3/\text{s}$  en MLP) y otra del día 6 de Febrero a las 11:00 hs ( $Q=876\text{ m}^3/\text{s}$  en VM y  $624\text{ m}^3/\text{s}$  en MLP). El área inundada por El Chañaral para el día 5 de febrero fue de  $114,19\text{ km}^2$  con una longitud de  $47,78\text{ km}$  y para el día 6 de febrero de  $116\text{ km}^2$  de superficie y  $48,51\text{ km}$  de longitud. El pico de caudal fue de  $3071\text{ m}^3/\text{s}$  el 2 de febrero en VM y de  $2137\text{ m}^3/\text{s}$  el día 3 de febrero en MLP. Los caudales mencionados precedentemente fueron obtenidos a partir de curvas H-Q. La Tabla 1 presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de las imágenes.



**Figura 5.-** Delimitación de Desbordes, Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014 Der.) Imagen Landsat 7, 6/02/2014.

**Tabla 1.-** Tabla resumen de las características de los desborde para el año 2014

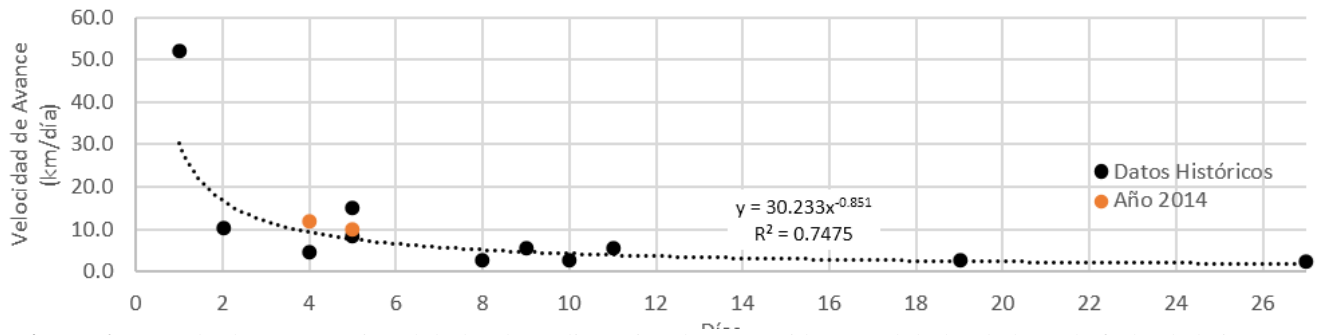
| Imagen  | Fecha      | Fecha del Pico VM | Qp VM $\text{m}^3/\text{s}$ | Fecha del Pico MLP | Qp MLP $\text{m}^3/\text{s}$ | Desbordes hacia Argentina  |                             |                      |                           | Desbordes hacia Paraguay |                    |             |                    |             |                    |             |                    |
|---------|------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|
|         |            |                   |                             |                    |                              | Q VM $\text{m}^3/\text{s}$ | Q MLP $\text{m}^3/\text{s}$ | $\Delta T$ pico días | $\Delta T$ retroceso días | El Chañaral              |                    | La Gracia   |                    | Pozo Hondo  |                    | La Puerta   |                    |
|         |            |                   |                             |                    |                              | $\text{m}^3/\text{s}$      | $\text{m}^3/\text{s}$       |                      |                           | Longitud km              | Área $\text{km}^2$ | Longitud km | Área $\text{km}^2$ | Longitud km | Área $\text{km}^2$ | Longitud km | Área $\text{km}^2$ |
| 2014036 | 05/02/2014 | 01/02/2014        | 3071                        | 03/02/2014         | 2137                         | 1035                       | 1336                        | 2                    | 2                         | 47.71                    | 115.78             | 28.27       | 111.72             | 5.40        | 6.96               |             |                    |
| 2014037 | 06/02/2014 |                   |                             |                    |                              | 867                        | 797                         |                      |                           | 49.81                    | 122.22             |             |                    | 2.27        | 0.98               |             |                    |

Para el año 2014 se activaron los cuatro desbordes. El desborde La Puerta no pudo ser analizado por haber sombras de nubes en su zona de influencia

En las imágenes se observa el avance del frente del desborde El Chañaral que totaliza  $3740\text{ m}$  en cerca de  $14\text{ hs}$ , resultando en una velocidad de avance de  $6,80\text{ km}/\text{día}$ . Se calculó en un trabajo previo que en el año 2006 el frente avanzó  $7,2\text{ km}$  en  $8\text{ días}$  (tiempo entre dos imágenes disponibles) o una velocidad de avance media de  $900\text{ m}/\text{día}$ .

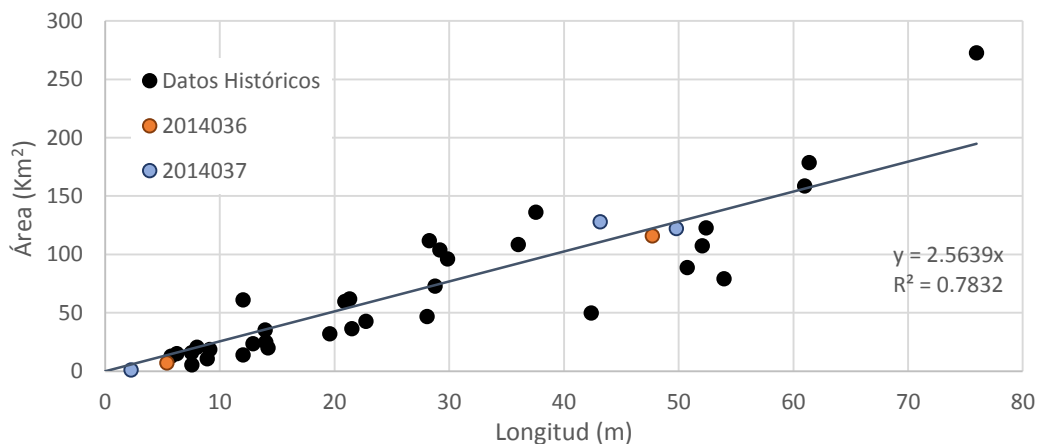
## Resultado del Análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores

Se ha establecido para el desborde El Chañaral una relación entre la velocidad media de avance, desde que se activa el desborde hasta la fecha de la imagen, y los días transcurridos. En la Figura 6 se presentan los valores históricos y los de las dos imágenes correspondientes al año 2014. Presenta un buen comportamiento respecto a lo ya establecido. Esta figura permite establecer cuantos kilómetros recorre por día la mancha de inundación.



**Figura 6.-** Días desde que se activa el desborde vs distancia / días recorridos por el desborde hasta la fecha de la imagen.

En trabajos previos se ha presentado una relación entre el área inundada por los desbordamientos y su longitud. En la Figura 7 se presentan 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 6, se puede calcular el área inundada con la Figura 7.



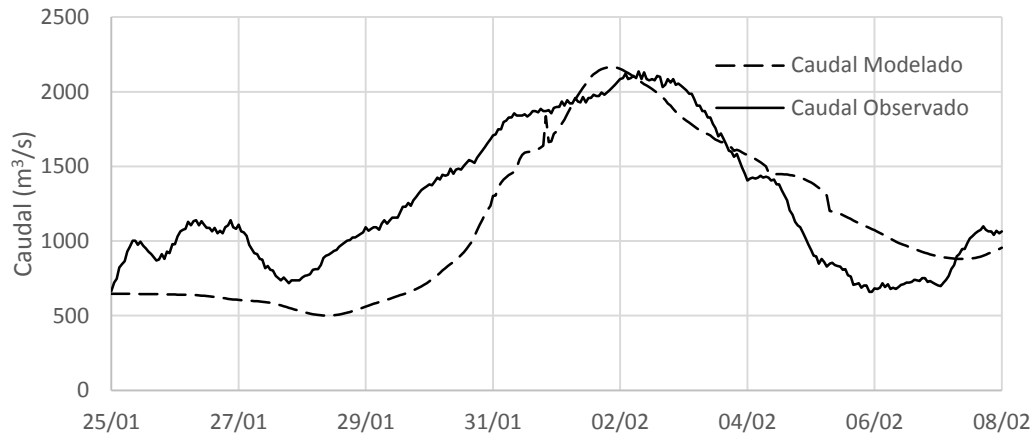
**Figura 7.-** Relación entre área inundada y longitud del desborde.



## Aplicación de los modelos numéricos

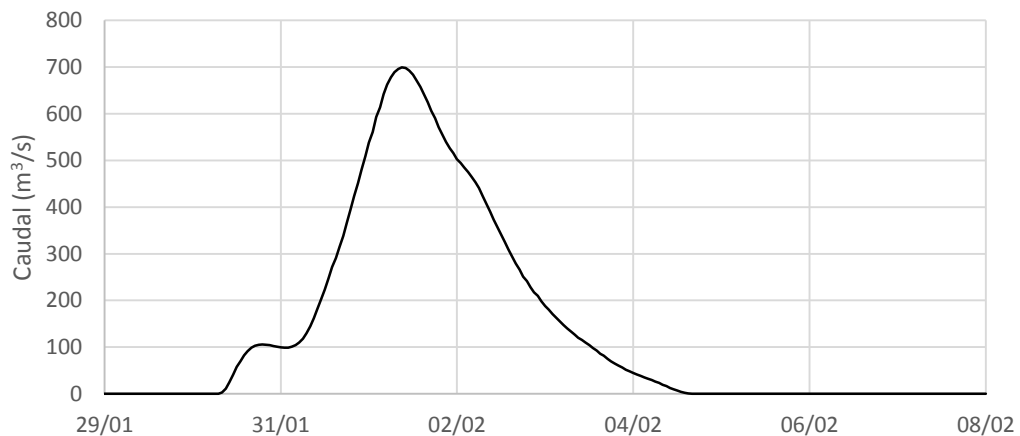
Se ha modelado hidráulicamente el Río Pilcomayo en una dimensión, a régimen no permanente, gradualmente variado y de fondo fijo utilizando el software HEC-RAS 4.1.0 (USACE 2010). Con el objetivo de ver qué sucede con el hidrograma al haber una pérdida de caudal consecuencia de los desbordes, se simuló con un vertedero lateral en la progresiva correspondiente al desborde El Chañaral (70260 m). Este trabajo se planteó 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).

La Figura 8 presenta los resultados de la modelación hidrodinámica, se observó que hay una diferencia de 10 h en el arribo del pico, no obstante si se considera el frente de crecida como el punto de  $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ , la diferencia es de una hora. Este es el punto que se ha fijado en trabajos anteriores. También se ve que la diferencia de volumen que arriba a MLP es un 11% en defecto respecto del observado. 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.



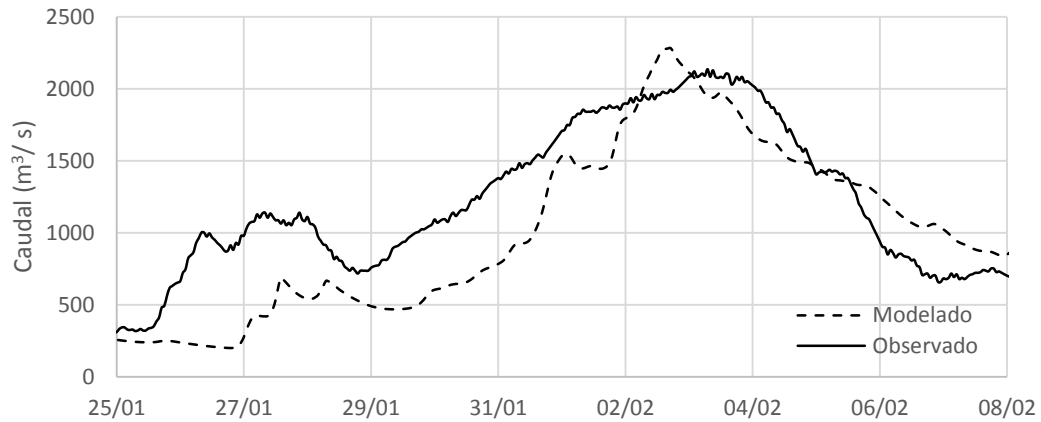
**Figura 8.-** Comparación de hidrogramas modelado y observado.

El modelo, permite tener una primera aproximación al hidrograma de desborde, del cual no se tiene ningún tipo de información hasta el momento, ya que es muy difícil de aforar por su inaccesibilidad.



**Figura 9.-** Hidrograma simulado del Desborde.

También se realizó un modelo hidrológico de onda cinemática con el programa HEC-HMS (USACE 2013), cuyo resultado se presenta en la Figura 10, con el fin de observar el comportamiento del modelo hidráulico.

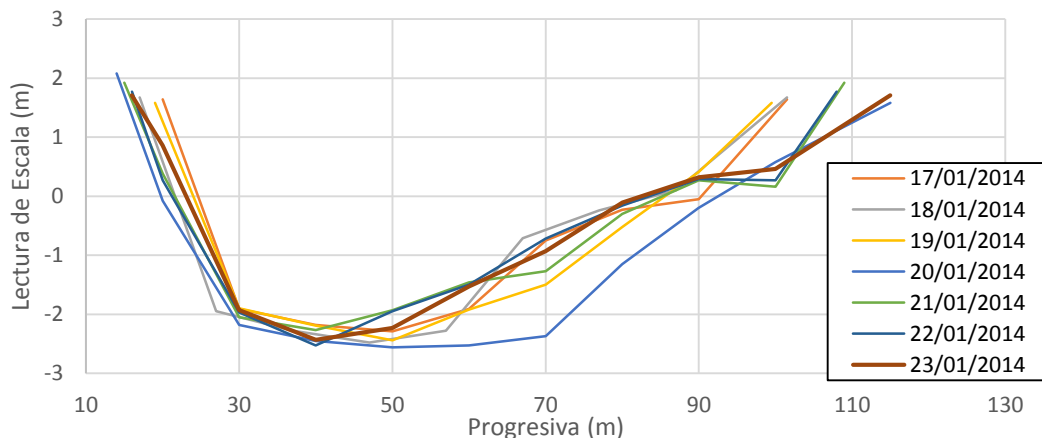


**Figura 10.-** Comparación de hidrogramas modelado y observado, modelo de onda cinemática.

### Movimiento del Fondo

La Figura 11 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 muestra el movimiento de fondo para aforos diarios en febrero de 2014, después del paso de la crecida. La Figura 12 y la Figura 14 presentan las lecturas de escala para esos periodos.

Si observamos el movimiento del fondo, se puede señalar que el lecho se encontraba a los -2,50 m de lectura de escala antes del paso de la crecida y luego se encuentra en los -7,00 m, para ir subiendo nuevamente con el transcurso de los días hasta los -4,60 m en el periodo analizado. Es marcado que para igual lectura de escala la sección es muy distinta si es la rama ascendente o descendente del hidrograma. Es sabido que es muy importante tener presente la variabilidad del fondo en el momento de utilizar o calcular las curvas H-Q.

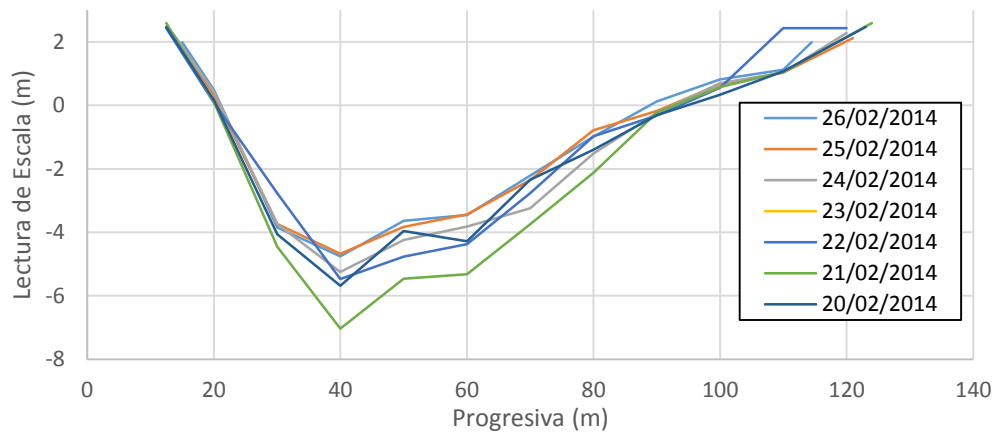


**Figura 11.-** Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

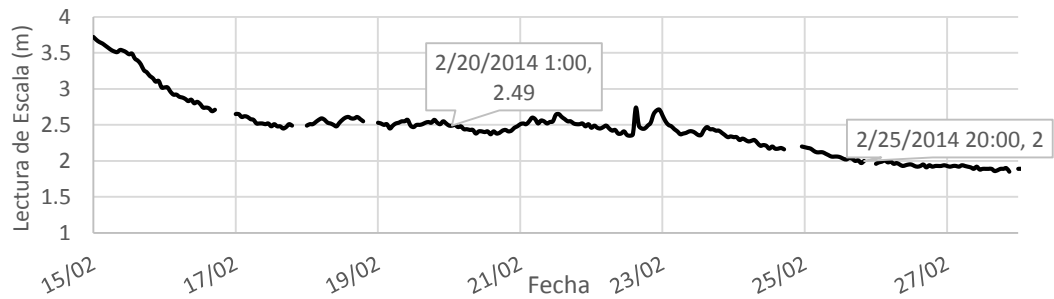




**Figura 12.-** Niveles durante los aforos enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

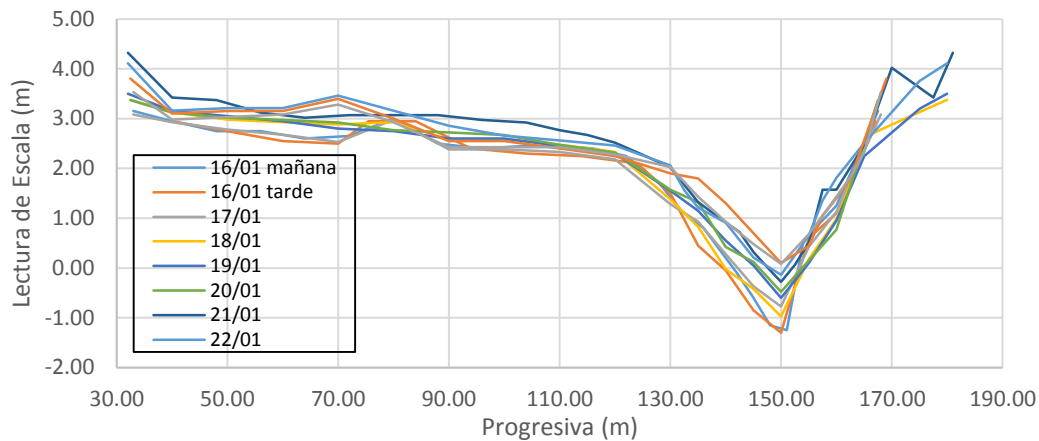


**Figura 13.-** Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

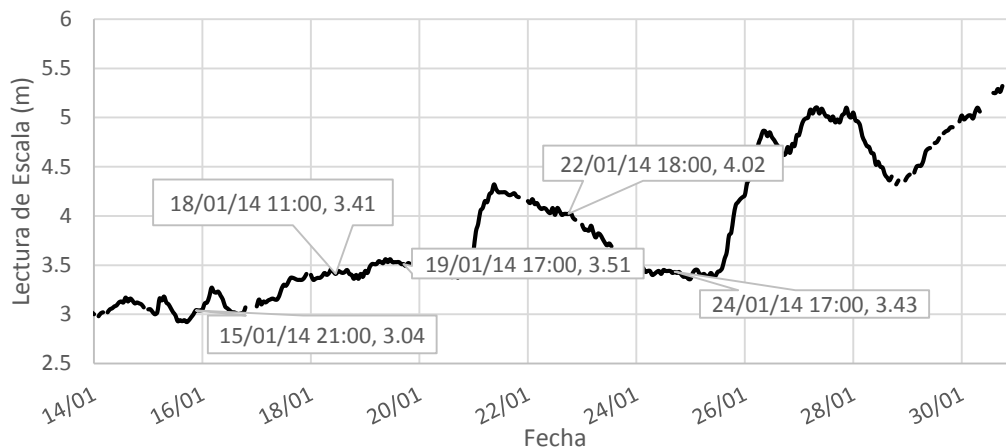


**Figura 14.-** Niveles durante los aforos febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

La Figura 15 muestra la gran variación de la sección durante aforos diarios en Misión La Paz en enero de 2014 y la Figura 16 los niveles registrados. Se observa que la vaguada ha descendido hasta 1,3 m con efectos también de gran movimiento en el resto del lecho.



**Figura 15.-** Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)



**Figura 16.-** Niveles durante los aforos 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)

## CONCLUSIONES

El método aplicado para el estudio de la crecida permite tener una visión clara de los aspectos fundamentales de la misma, así como una fácil comprensión y comparación con eventos anteriores.

Se ha concluido que en esta crecida 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 es de 1,1 años y que el volumen desbordado fue de  $72 \text{ hm}^3$ . Con las imágenes satelitales se pudo determinar que la velocidad del frente de avance en El Chañaral fue de  $6,80 \text{ km/días}$ . Se compararon las áreas inundadas, longitud de mancha de agua y velocidades de desbordes con datos históricos observándose una muy buena relación.

Con el uso de modelos unidimensionales hidrodinámicos e hidrológicos se pudo estimar una forma 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 los 2,00 m de descenso de vaguada antes del paso de la crecida, 2,40 m después del paso de la crecida y 4,50 m de descenso de vaguada comparando antes y después del paso de la crecida. En MLP, con información solo antes del paso de la crecida la vaguada descendió 1,30 m.

## REFERENCIAS

- Cristanchi, María Alejandra, y Alejo Juan Sebastián Testa Tacchino. «Informe Interno, Campaña enero de 2014.» Misión la Paz, Salta, Enero de 2014.
- Halcrow, y Serman. *Línea Base Ambiental y Socioeconómica de la Cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, 2007.
- Laboranti, Claudio. «Informe Campaña Enero 2014 en Villamontes.» Mesa Fluvial, UNLP, Enero de 2014.
- Martín Vide, Juan Pedro, Mabel Amarilla, Mario Gamarra, y Fernando Zárate. «Problema de sedimentación en el río Pilcomayo.» 2006.
- Pool, M.A., y J.D.G. Van Duijne. «Informe final de la tercera misión de asistencia técnica enviada por la comisión de la UE a la zona del Pilcomayo.» Bruselas, Bélgica, 1996.
- Testa Tacchino, Alejo J S, y otros. «Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: Caracterización y Restricciones.» *XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Santiago, Agosto de 2014.
- Testa Tacchino, Alejo, y Marcelo Baldissoni. «Análisis de los desbordes del río Pilcomayo entre Villamontes y Misión la Paz.» *XXIVº Congreso Nacional del Agua*, 2013.
- USACE. «HEC-HMS 4.0.» 2013.
- . «HEC-RAS v. 4.1.0.» 2010.