

## **PREDICCIÓN DE ÁREAS INUNDADAS POR EL DESBORDE EL CHAÑARAL, DEL RÍO PILCOMAYO**

**Testa Tacchino, Alejo<sup>1, 2, 3, 4</sup>; Cristanchi, María Alejandra<sup>5</sup>; Constanza Vargas<sup>2, 3, 4</sup>;  
Rodríguez, Andrés<sup>2, 3</sup>; Laboranti, Claudio<sup>5</sup>; Gyssels, Paolo<sup>2, 3</sup>; Corral, Mariano<sup>2, 3</sup>;  
Pagot, Mariana<sup>2, 3</sup>; Hillman, Gerardo<sup>2, 3</sup>; Farías, H. Daniel<sup>6</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> Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA), UNC. <sup>5</sup> Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo. <sup>6</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)

### **RESUMEN**

El Río Pilcomayo es estratégico para el desarrollo 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. Entre Villamontes y Misión La Paz ocurren diferentes desbordes de importante magnitud, siendo el principal el desborde El Chañaral. La estación de Aforos de Villamontes (VM), localizada en la localidad boliviana homónima, nos proporciona los caudales de ingreso a Argentina/Paraguay.

Con el apoyo en imágenes satelitales y los hidrogramas para las estaciones mencionadas es posible aproximar las áreas inundadas por el río consecuencia de su desborde.

El presente trabajo pretende predecir el área inundada por el desborde “El Chañaral” a partir de los caudales en Villamontes, 140 km aguas arriba, durante una crecida. A partir del cálculo de velocidades de avance del desborde y del tiempo de desborde se calcula la superficie de agua inundada, y una estimación de sus límites.

### **ABSTRACT**

The Pilcomayo River is strategic for the development of northern Argentina, especially the provinces of Salta and Formosa. The Pilcomayo River rises and forms its active basin (i.e. where the waters and sediments originate) network, almost totally in the Republic of Bolivia. Further downstream up to the region of “La Embocadura,” it becomes the border between Argentina and Paraguay, where the waters are divided between both countries. The river finally continues its natural course through El Bañado, La Estrella AND Río Monte Lindo.

Villamontes (VM, Bolivia) gauge station provides the flow entering Argentina/Paraguay, and Misión La Paz (MLP, Argentina) gauge station give the flow to “La Embocadura”.

With help of satellite images and hydrographs in both mentioned above stations it is possible to estimate the flooded areas by the river as a consequence of its overflows.

The ultimate aim of this work is to forecast the area flooded by “El Chañaral” overflow, based on the flows in Villamontes, 140 km upstream. On the basis of the calculation of overflows front velocities and overflow date we can then compute the flooded areas and estimate its borders.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica del río Pilcomayo se sitúa aproximadamente entre los 19° y 26° de Latitud Sur y entre los 57° y 67 ° de Longitud Oeste, integra la gran Cuenca del Plata y está conformada por una extensa área compartida entre Argentina, Bolivia y Paraguay.

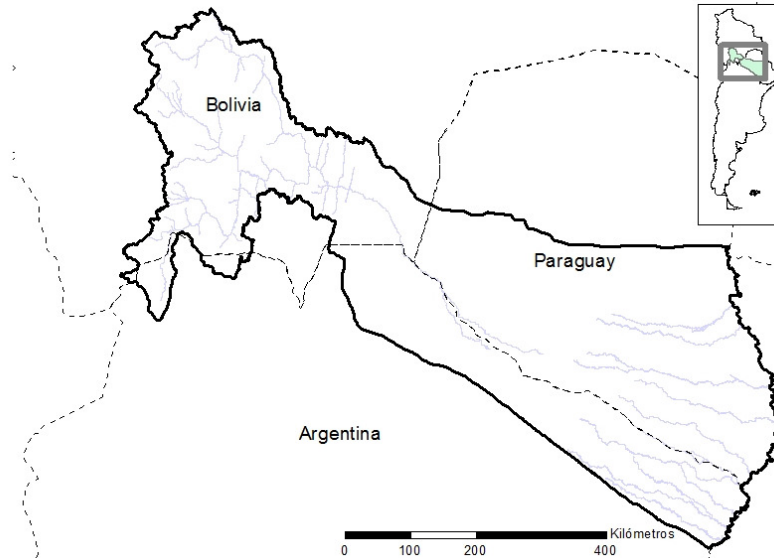
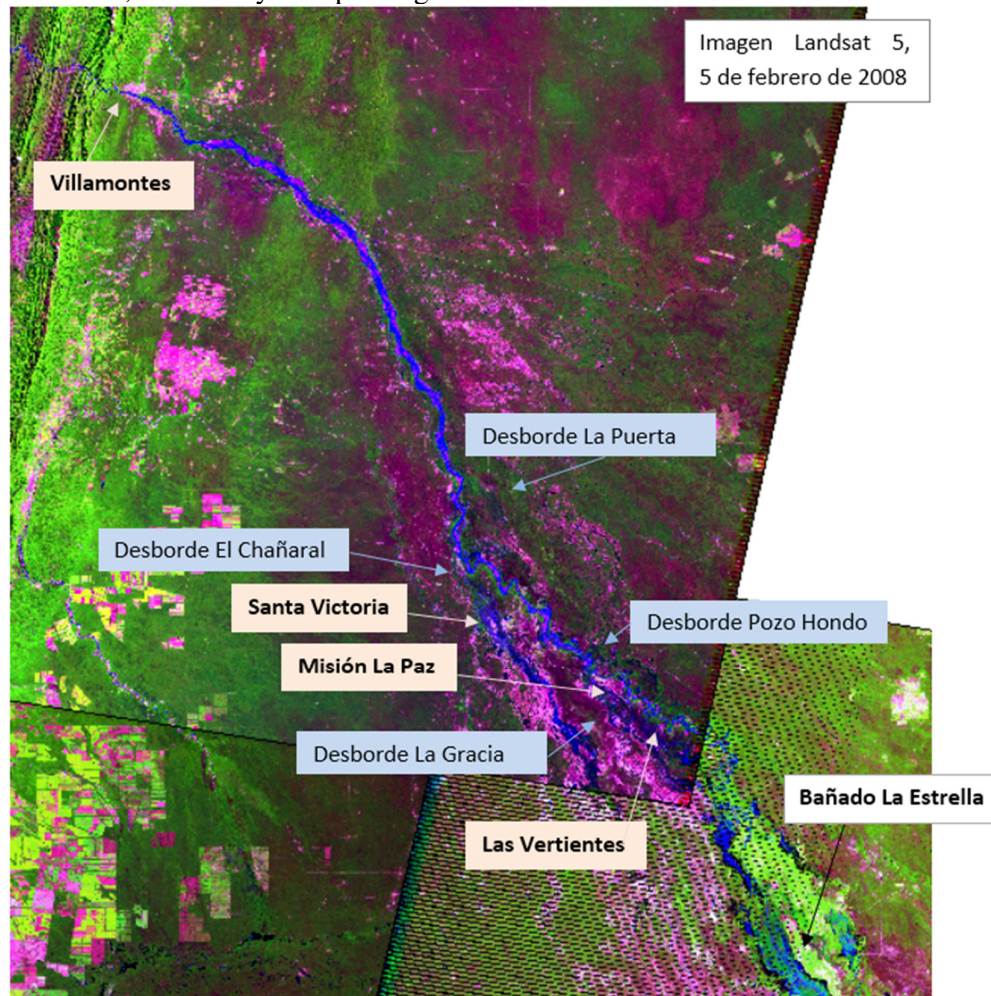


Figura 1.- Cuenca del Río Pilcomayo

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. Esta particularidad constituye el rasgo natural por excelencia de la región (Dirección Ejecutiva 2014). El Río Pilcomayo nace y forma la red fluvial de su cuenca activa (la cuenca en donde las aguas se originan) casi totalmente en la República de Bolivia. En esa región de la cuenca alta se producen las precipitaciones que forman la parte más significativa de los caudales líquidos y sólidos en su curso principal y que son las que determinan y ocasionan los problemas actuales. El tramo entre Villamontes y la frontera con Argentina puede ser asociado al de salidas de montaña a la llanura, mediante un amplio valle. En el Río Pilcomayo este tipo de proceso fluvial, a diferencia de los ríos montañosos y precordilleranos que aportan material aluvial de gran tamaño, se realiza acareando sedimentos compuestos de grava y arena, lo cual constituye una excepción (Kopaliani y Georgievsky 1993). Se divide entonces la cuenca del Río Pilcomayo en dos cuencas: La cuenca alta, donde el Pilcomayo es un río de montaña con un largo de 500 kilómetros y la cuenca baja o Cuenca Chaqueña, que al abandonar los Andes se convierte en un río de llanura, con un largo de 785 kilómetros. En la cuenca baja se producen numerosos desbordes de considerable magnitud. Los principales se denominan El Chañaral, La Gracia y Las Vertientes que desbordan hacia el lado argentino y La Puerta y Pozo Hondo y Torcuato Cué que desbordan hacia el Lado paraguayo. La **Figura 2** presenta los desbordes mencionados.

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. Una vez activo predomina el sentido longitudinal en dirección N-SE. Es un desborde cuyas aguas no vuelven al cauce, el agua se pierde del sistema (A. J. 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 Ovejería, Monte Cristo, Chañares Altos, Amberes y Campo Largo.



**Figura 2.-** Identificación de Desbordes y Localidades de Referencia

El desborde El Chañaral es el primero en activarse de los desbordes principales aguas arriba de Misión La Paz y se activa para caudales de  $2700 \text{ m}^3/\text{s}$  en Villamontes, que equivale a una lectura de escala de 4,40 m en esta estación (Testa Tacchino, y otros 2014).

## METODOLOGÍA

A partir de datos hidrométricos en Villamontes, Bolivia, se seleccionan las fechas con caudales mayores a los  $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ , caudal que se ha calculado en trabajos previos que activa el desborde El Chañaral. Se seleccionan imágenes Landsat de esa fecha y días posteriores, que no posean nubosidad en la zona de interés y permitan ver el desborde activo. La Figura 3 presenta la imagen Landsat correspondiente al 5 de febrero de 2014, 4 días después de un caudal mayor a  $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ , según se observa en el hidrograma de la Figura 4.

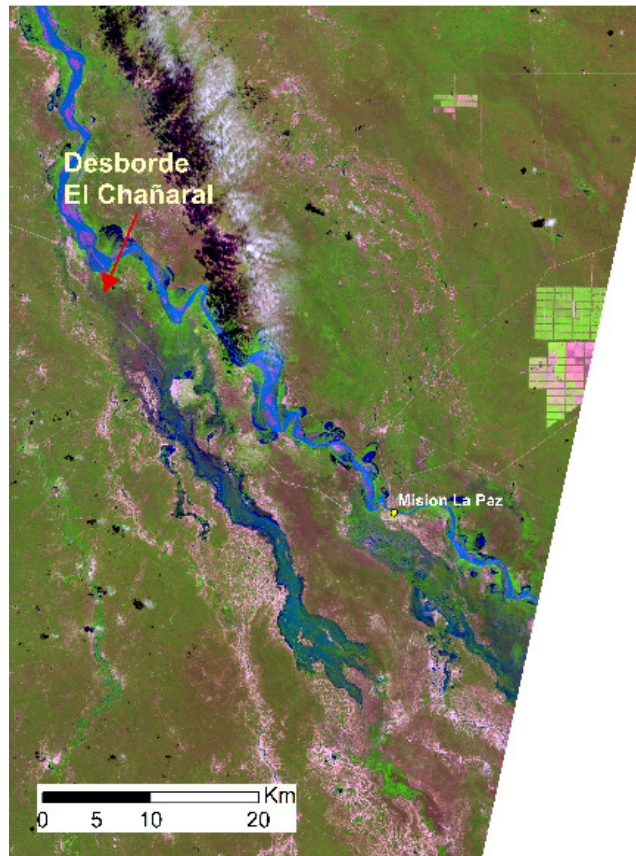


Figura 3.- Desborde El Chañaral, Img Landsat 05/02/2014

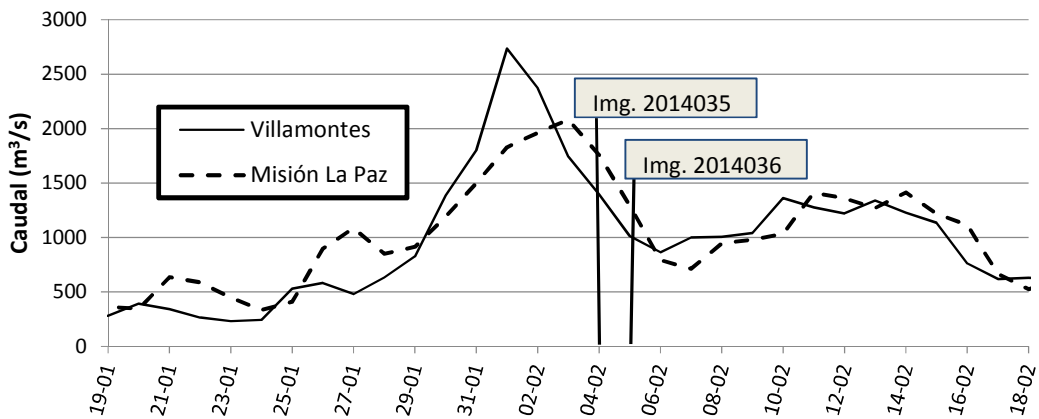


Figura 4.- Hidrograma en Villamontes, crecida del año 2014

Con las imágenes disponibles, se delimita el desborde El Chañaral, se calcula su longitud y su área. Cuando se posee más de una imagen para un mismo evento se puede calcular una velocidad de frente de avance. No obstante, cuando solo se posee una imagen para un evento, se puede calcular la velocidad de avance calculando el tiempo entre el momento en que ocurre el desborde y el momento de la imagen y se obtiene la distancia recorrida como la longitud del desborde en la imagen.

Con estos valores se realizan curvas que permiten realizar la predicción. A partir de la velocidad de avance y la fecha en que se activa el desborde se puede calcular para una fecha dada la



longitud que habrá recorrido. Con esta longitud se puede estimar el área cubierta por el desborde.

Para realizar este estudio se contó con datos del año 1999, 2005, 2006, 2008, 2013 y 2014. Los valores del año 2014 se utilizaron para verificar las predicciones.

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 273,85 m).

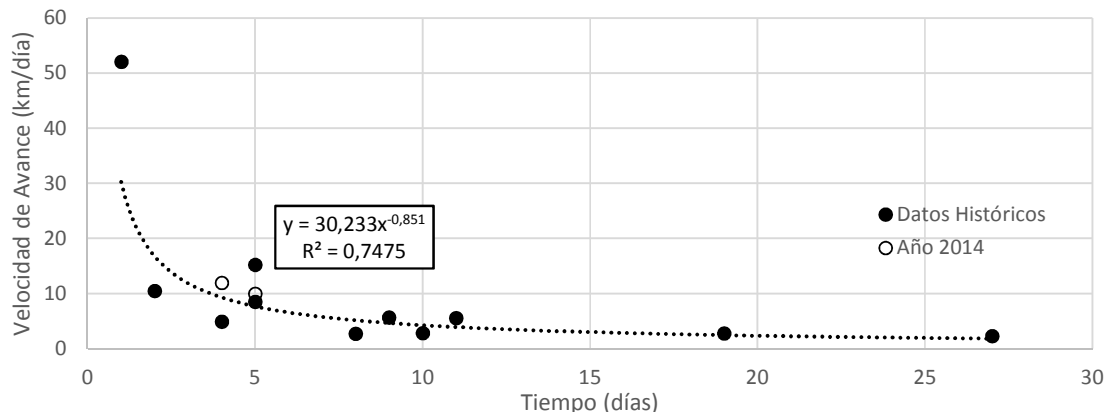
## RESULTADOS

La Figura 5 presenta la relación obtenida entre la velocidad de avance y los días transcurridos entre la activación de desborde y la fecha de la imagen satelital, o en casos de predicción, la fecha de interés, para el desborde El Chañaral.

La relación queda expresada por

$$V_{avance} = 30,233 t^{-0,851} \quad (1)$$

donde t es el tiempo expresado en días.



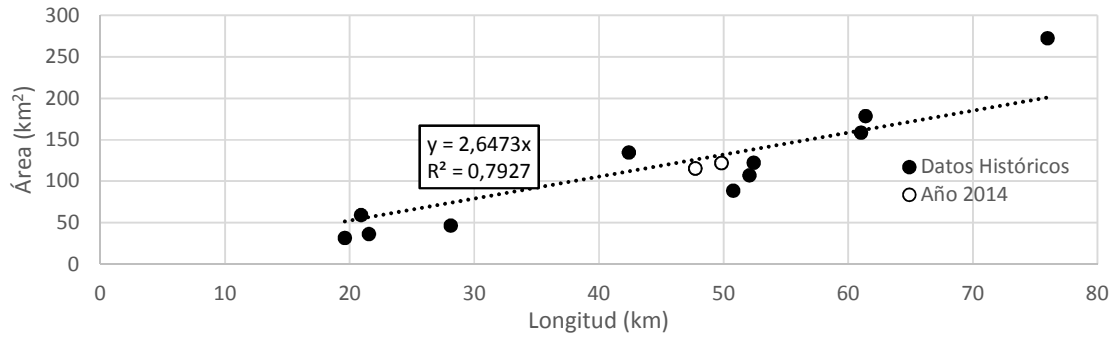
**Figura 5.-** Relación entre Tiempo de Desborde y obtención de Imagen vs velocidad de avance media (km/día)

Para el año 2014 se poseen dos imágenes, una Landsat 8 para el 5 de febrero y una Landsat 7 para el 6 de febrero. El caudal de 2700 m<sup>3</sup>/s se da el 1 de febrero, es decir hay 4 días entre la activación del desborde y la primera imagen. La velocidad de avance utilizando ( 1) da 9,3 km/día, es decir la distancia recorrida, o longitud del desborde es de 37,2 km.

La Figura 6 presenta la relación obtenida a partir del cálculo de las áreas y longitudes de los desbordes en las diferentes imágenes analizadas. Ésta queda expresada por

$$\text{Área} = 2.69 \text{ longitud} \quad (2)$$

expresados en kilómetros.



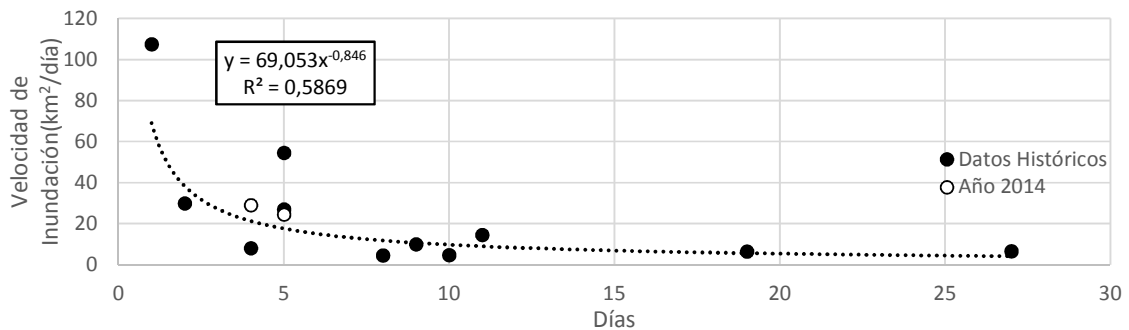
**Figura 6.-** Relación Longitud – Área Inundada, El Chañaral.

Con la formulación ( 2) obtenemos el área inundada que nos da 100 km<sup>2</sup>. La longitud medida es de 42 km y el área medida es de 115 km<sup>2</sup>, solo un 12% y 15% por encima de lo predicho. Se procede de igual manera para la segunda imagen. Los puntos correspondientes al año 2014 se han marcado sin relleno en las figuras.

La Figura 7 presenta una síntesis de las figuras anteriores vinculando la velocidad de inundación areal al tiempo transcurrido desde que el desborde se activa. Ésta queda expresada por

$$V_{avance\ areal} = 69,053 t^{-0,846} \quad (3)$$

con la velocidad expresada en kilómetros cuadrados por día.

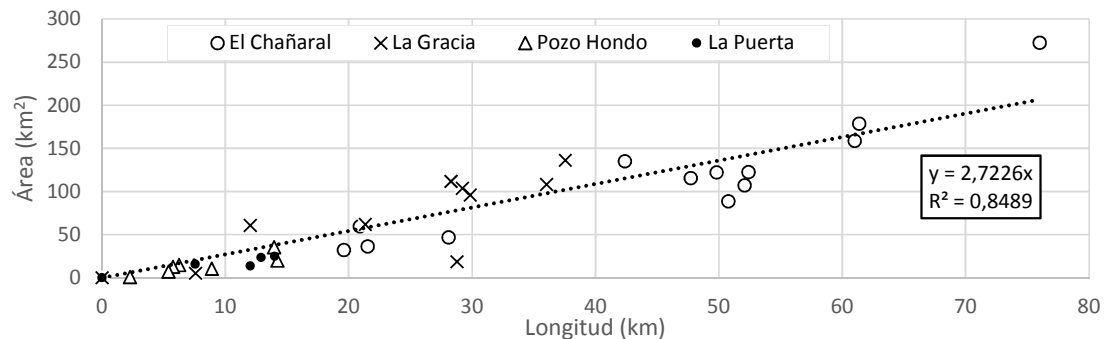


**Figura 7.-** Días transcurridos desde la activación del desborde y Velocidad de Inundación Areal, El Chañaral.

Se ha podido observar que los otros desbordes principales, La Gracia, La Puerta y Pozo hondo también poseen un comportamiento lineal al relacionar sus longitudes con las áreas inundadas, que se pueden encuadrar con el de El Chañaral (Figura 8). Esta relación queda expresada por

$$\text{Área} = 2,72 \text{ longitud} \quad (4)$$

expresados en kilómetros.



**Figura 8.-** Longitud – área para los desbordes El Chañaral, La Gracia, La Puerta y Pozo Hondo.

Además se ha realizado una base de datos GIS con los contornos de los desbordes de El Chañaral de los que se tiene registro a partir de las imágenes Landsat, que permite estimar la forma de los desbordes una vez conocido el tiempo transcurrido desde la activación del desborde.

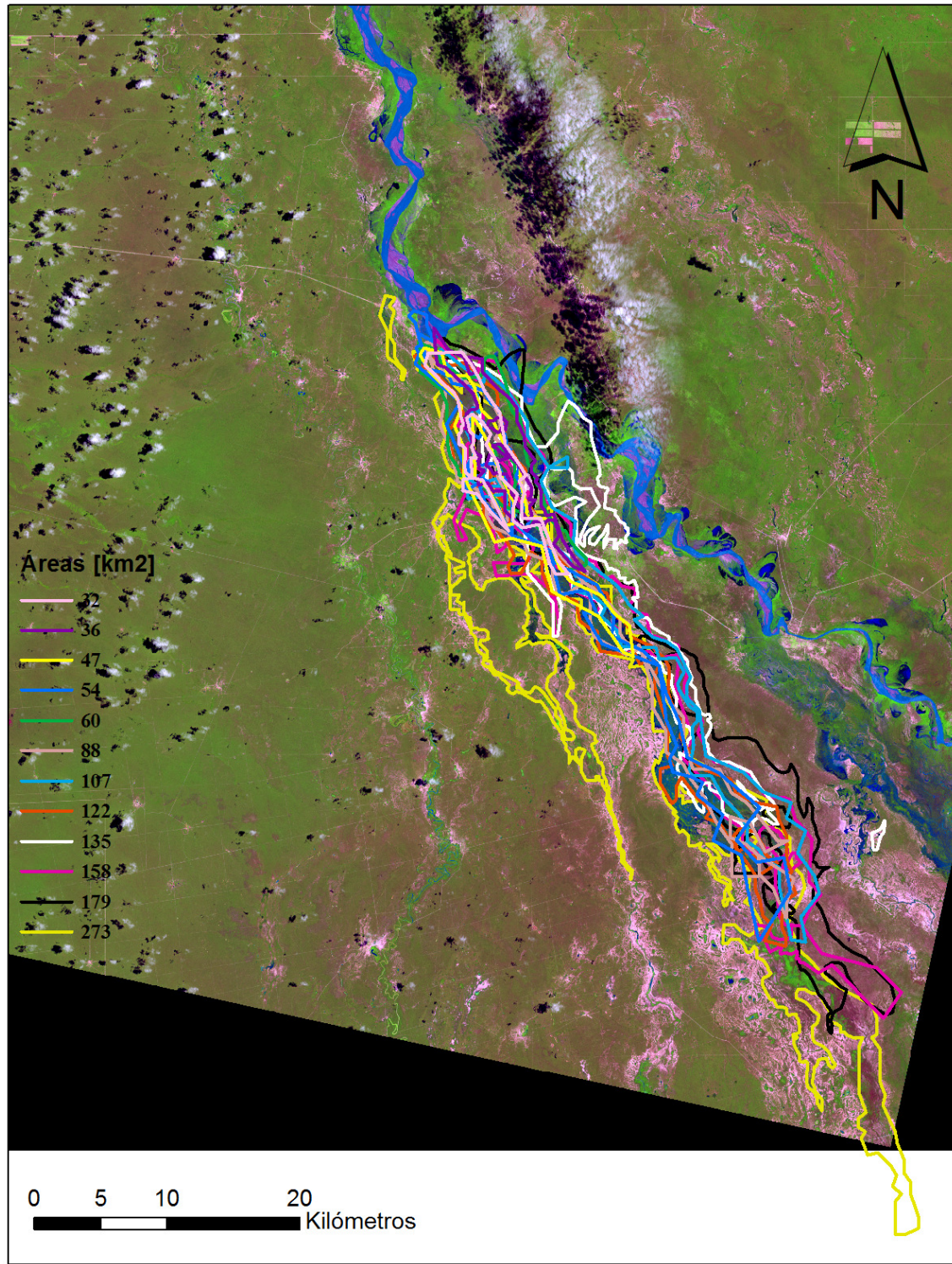
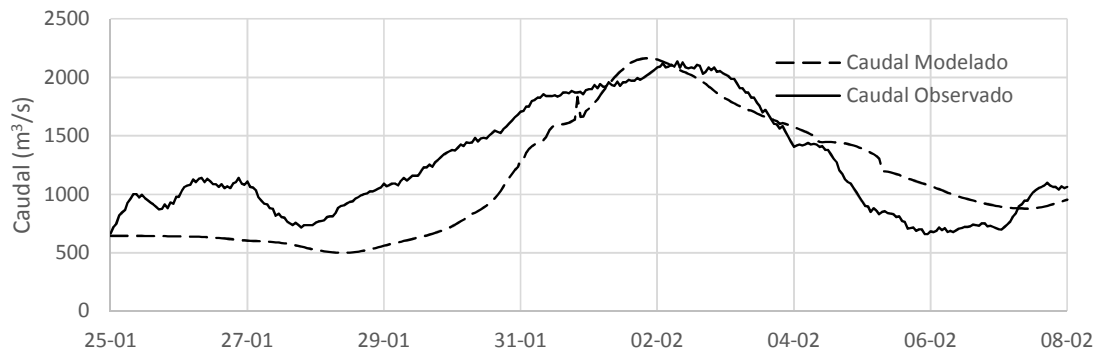


Figura 9.- Superposición de Desbordes delimitados a partir de imágenes satelitales, Áreas en km<sup>2</sup>.

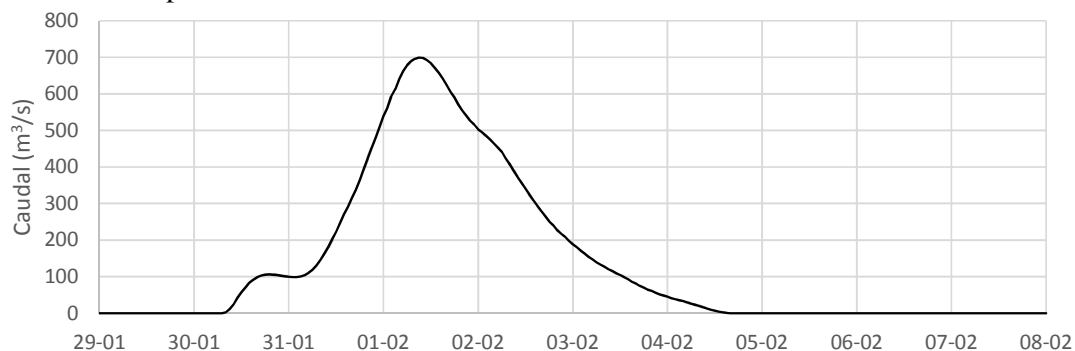
En la Figura 4 se presentaron los hidrogramas calculados a partir de las lecturas de escala para el año 2014, además se muestran las fechas para las cuales se poseen imágenes satelitales, 5 y 6 de febrero de 2014 (Img. 2014036 e Img. 2014037). El hidrograma de Villamontes (VM) se utiliza como valor de entrada para el modelo y el de Misión La Paz (MLP) como hidrograma observado, para contrastar los resultados de las modelaciones.

La Figura 10 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 10.-** Comparación de hidrogramas modelado y observado.

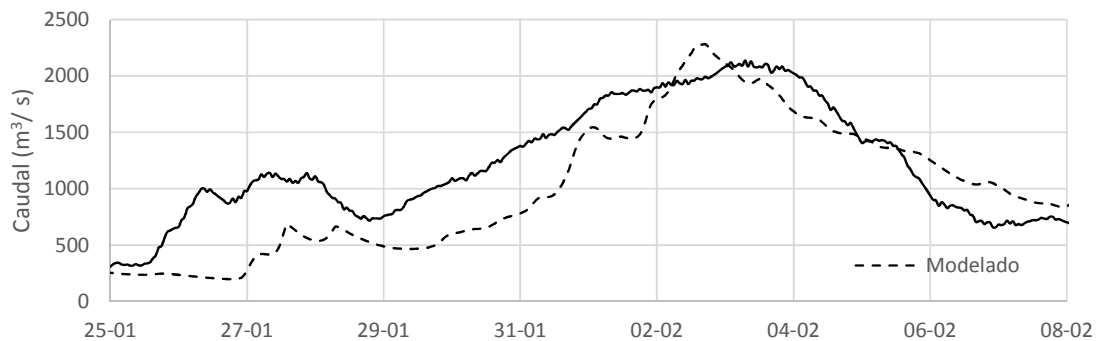
El modelo, permite tener una primera aproximación al hidrograma de desborde, presentado en la Figura 11, del cual no se poseía ningún tipo de información hasta el momento, ya que es muy difícil de aforar por su inaccesibilidad.



**Figura 11.-** 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 12, con el fin de observar el comportamiento del modelo hidráulico.



**Figura 12.-** Comparación de hidrogramas modelado y observado, modelo de onda cinemática.

## CONCLUSIONES

La metodología propuesta permite predecir con buena exactitud la velocidad de avance media, longitud recorrida y área inundada por el desborde el Chañaral. Los datos de ingreso requeridos son la fecha en que se activa el desborde y la fecha de interés.

Se ha observado que la velocidad de avance media del desborde El Chañaral tiene una gran magnitud en el momento en que se activa el desborde y va disminuyendo a medida que transcurren los días.

También se ha concluido que hay una relación lineal, para el desborde el Chañaral, entre la distancia recorrida y el área inundada, que también es compartida por los desbordes La Gracia, La Puerta y Pozo Hondo.

A partir del análisis con herramientas GIS se puede predecir la forma del área inundada de acuerdo a su superficie o días desde la activación del desborde.

A partir de modelaciones numéricas unidimensionales se ha podido estimar el hidrograma de los desbordes.

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$V_{avance}$ :	Velocidad del frente de avance del desborde (km/día)
Área :	Área inundada (km <sup>2</sup> )
longitud:	Longitud de la mancha de inundación (km)
$V_{avance\ areal}$ :	Velocidad de avance del área Inundada (km <sup>2</sup> /día)
t:	Tiempo (días)

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**Dirección Ejecutiva, Comisión Trinacional para el desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo** (2014). “Características de la Cuenca del Río Pilcomayo”. *Pilcomayo.net*. Recuperado el 05 de Enero de 2014.

**Kopaliani, Z.D., y V.Y. Georgievsky** (1993) “Informe Técnico - Río Pilcomayo”, *Asunción, Paraguay*.

**Testa Tacchino, Alejo 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*.

**Testa Tacchino, Alejo J. S., Érica B. Díaz, Marcelo Baldissone, y M. Alejandra Cristanchi, Mariana Pagot, Leticia Tarrab, Horacio Herrero, Mariano Corral, Claudio Laboranti, Andrés Rodríguez.** (2014) “Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: Caracterización y Restricciones” *Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Santiago, Chile.

**USACE.** “HEC-HMS 4.0.” (2013)

**USACE.** “HEC-RAS v. 4.1.0” (2010)