



**Facultad de Ciencias Exactas,  
Físicas y Naturales**

**Maestría en Ciencias de la Ingeniería  
Mención Recursos Hídricos**

**CARACTERIZACIÓN DE DESBORDES  
DEL RÍO PILCOMAYO  
ENTRE VILLAMONTES Y MISIÓN LA PAZ**

**TESIS DE MAESTRÍA**

**Autor:** Ing. Civil Alejo J. S. Testa Tacchino

**Director:** Dr. Ing. Andrés Rodríguez

Córdoba, 2015



**CARACTERIZACIÓN DE DESBORDES  
DEL RÍO PILCOMAYO  
ENTRE VILLAMONTES Y MISIÓN LA PAZ**





## **PREFACIO**

El presente trabajo se presenta como Tesis Final de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Mención en Recursos Hídricos dictada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

Este trabajo ha sido realizado en las oficinas del Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA), del Laboratorio de Hidráulica y del Centro de Tecnología del Agua de la UNC. Durante el período de preparación de la Tesis, se trabajó junto a profesionales de diferentes instituciones:

- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
- Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Instituto Nacional del Agua (INA).
- Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT)
- Servicio Nacional de Meteorológica e Hidrología de Bolivia (SENAMHI).
- Gendarmería Nacional Argentina.
- Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN de la UNC.
- Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), FCEFyN de la UNC.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral (FICH - UNL).
- Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata.
- Unidad Provincial Coordinadora del Agua (UPCA), Formosa.
- EVARSA S.A.

El autor ha contado con el apoyo económico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por medio del Sistema de Becas Doctorales para realizar sus estudios a partir de abril del año 2012.

Además se ha contado con el financiamiento para Proyectos de Investigación de Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba:

- Hidráulica Fluvial del Río Pilcomayo en su Tramo Medio: Monitoreo y Modelado.  
Director: Andrés Rodríguez  
Co-directora: Mariana Pagot
- Caracterización Experimental de la Hidrodinámica del Río Pilcomayo.  
Directora: Leticia Tarrab  
Co-director: Horacio Herrero

También con el apoyo de los Proyectos de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (DE-CTN), Coordinados por el Ing. Juan Hopwood, de la Mesa Fluvial de la DE-CTN

- Manejo de Aguas y Sedimentos  
Administrador: Ricardo Giménez
- Monitoreo Integral de la Cuenca del Río Pilcomayo  
Administrador: Claudio Laboranti



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mi Director Andrés Rodríguez por el acompañamiento en esta etapa, no solo en lo técnico y académico sino también en lo personal. Su preocupación constante por el Río Pilcomayo, me ha hecho comprometer en estos últimos años con el estudio de una de las áreas estratégicas de la Argentina. Como se verá al recorrer estas páginas el trabajo tiene un alto contenido práctico.

También quiero agradecer profundamente a la Gente de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del río Pilcomayo, a su director Luis Gambino por siempre mantener las puertas abiertas, al Ing. Ricardo Giménez. A Claudio Laboranti, Alejandra Cristanchi, Diego Ortiz y Walter Mongelos, con quienes hemos compartido campañas y proyectos.

Agradezco al Dr. Santiago Reyna, Director de la Carrera, a la Dra. Teresa Reyna, Secretaria Técnica y a la Comisión Directiva de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería mención en Recursos Hídricos, quienes con su administración diaria han hecho posible que realice la carrera. Agradezco a todos los docentes que con calidad han compartido sus conocimientos durante estos años.

Fundamental es resaltar a quienes dentro del LH-CETA han estudiado el Pilcomayo, como Marcelo Baldissoni, y quienes siguen estudiando como Marcelo García, que siempre está presente y dispuesto a dar una mano. A Mariana Pagot y Mariano Corral por sus consejos y recomendaciones. Especialmente a Érica Díaz con quién hemos trabajado juntos en un libro del Pilcomayo y también en publicaciones y a Antoine Patalano, quién me ha dado una enorme ayuda en Seguimiento de Partículas. A Horacio Herrero, quien me ha leído publicaciones enteras para ver si se entienden. A Paolo Gyssels, quién me ha corrido para que termine en fecha la tesis. A Leticia Tarrab con quien compartimos un proyecto.

A todos los compañeros de trabajo del LH-CETA-ISEA, con quienes compartimos el tiempo libre dentro de nuestras horas de trabajo. En Especial a Facundo Alonso, con quien compartimos la oficina, Magalí Carró Perez, Daniel Gladstein, Cristian Montanari y Rosa Domínguez.

A todos quienes integran y han integrado la Mesa Fluvial del Río Pilcomayo por todo su aporte.

A todos los pobladores de la cuenca que han sabido compartir sus historias y conocimiento de un valor fundamental para comprender al Río.

A mis Amigos y Familia, que siempre saben comprender las ausencias y compartir los desafíos. A mis compañeros de Militancia con quienes luchamos todos los días por una Patria más Justa, Libre, Soberana e Inclusiva.



## **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, siguiendo aguas abajo cursos naturales como el Bañado La Estrella y Río Monte Lindo.

La estación de aforos de Villamontes, Bolivia (VM) proporciona los caudales de ingreso a Argentina/Paraguay y la estación de Misión La Paz, Argentina (MLP) los caudales que continúan hacia la zona de embocadura que divide las aguas entre Argentina y Paraguay.

Son diversas las complejidades de este río que imponen restricciones a su análisis hidráulico. Una de ellas es que todavía falta calibrar las curvas H-Q para caudales elevados, debido a no contar con registros de aforos en época de crecida, y la gran variabilidad de la sección de MLP que demanda aforos y cálculos de las curvas H-Q para cada evento. Además, en el tramo se producen numerosos desbordes que dificultan la estimación de los caudales erogados hacia Argentina y Paraguay. Este último, tema de preocupación binacional manifestado en diversos acuerdos con el fin último de conseguir una equitativa distribución del recurso.

En esta tesis se presenta información relevante para tener una aproximación acabada del funcionamiento del Sistema Pilcomayo en el tramo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz. Entre la información relevada encontramos características del clima, de la población y ambientales. También se realiza un repaso de los principales tratados internacionales y se sumerge en la morfodinámica, historia de los sedimentos y características del lecho y margen para concluir finalmente con el abordaje de los puntos críticos y desbordes.

El eje principal del trabajo es obtener información y caracterizar los desbordes, tema que ha sido encarado desde diferentes puntos de vista, como es el análisis de imágenes satelitales, de hidrogramas, de caudales de excedencia, modelación unidimensional y campañas al territorio. Se ha realizado una Modelación Digital de Terreno, para luego correr un modelo unidimensional para analizar el tránsito hidráulico del hidrograma. En particular se ha representado la crecida de enero-febrero de 2013, además se analiza el movimiento del fondo durante esta crecida.

Las conclusiones de los temas abordados permiten una caracterización con buenos resultados de los desbordes del Río Pilcomayo, contribuye al sistema de alerta de crecidas y al manejo del recurso hídrico entre los países involucrados así como dentro de nuestro país.

**Palabras Claves:** Río Pilcomayo, Desbordes, Crecida 2013.



## SUMMARY

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”.

The river poses several complexities that restrict its hydraulic analysis, including the need to calibrate rating curves for high flows, the lack of measurements in flood season, and the high variability of MLP section demanding gauging and h-q curve computation for each event. In addition, the reach has many overflows that affect the flow estimation profit to Argentina and Paraguay. Last but not least, there is the binational concern aiming at an equitable resource distribution.

This work presents relevant information to provide a better understanding of the Fluvial System behavior in the reach between Villamontes and Misión La Paz. This information includes data about the weather, population and environment, references to the main international treaties, details on the river morphodynamics, the history of sediments and the characteristics of the bed and banks, as wells as the examination of critical points and overflows.

The ultimate aim of this work is to gain insight into and characterize the overflows from different points of view, such as satellite images, hydrograms, exceedance flows analysis and one-dimensional modelling and gauging campaigns. A digital terrain model was developed in order to run a one-dimensional model to study routing methods. Particularly, this work analyzes the flood of January-February 2013, as wells as the bottom movement in this flood event.

The conclusion of the topics addressed allows for a characterization with accurate findings regarding the Pilcomayo River overflows, and contributes to the systems flood forecasting and water resource management both among the involved countries and within our country.

**Keywords:** Río Pilcomayo, Overflows, 2013 Flood Event.









# ÍNDICE

<b>PREFACIO</b>	<b>I</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>III</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>V</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>XV</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>XXVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos	6
1.2. Metodología	6
1.2.1. Revisión de Antecedentes	6
1.2.2. Determinación de Hidrogramas	6
1.2.3. Determinación de caudales que activan los desbordes por Imágenes Satelitales	7
1.2.4. Campañas y Aforos	7
<b>2. Revisión de Antecedentes</b>	<b>9</b>
2.1. Abanico aluvial	9
2.2. Fluviomorfología	13
2.3. Naturaleza del lecho y márgenes	15
2.4. Cauce de tipo "Colgado"	15
2.5. Puntos críticos	16
2.6. Retroceso del Cauce Rio Pilcomayo	17
2.7. Desbordes	19
2.8. Avulsión	24
2.9. Distribución de aguas entre Argentina y Paraguay	28
<b>3. Caracterización de las Estaciones de Aforo</b>	<b>31</b>
3.1. Estación en Villamontes	31
3.1.1. Análisis Curva H-Q	34
3.1.2. Movimiento del Fondo	35
3.2. Estación en Misión La Paz	38
3.2.1. Análisis de Curva H-Q	41
3.2.2. Movimiento del Fondo	43
<b>4. Caracterización Hidrológica</b>	<b>45</b>
4.1. Curvas Caudal, Duración y Recurrencia para la Estación Misión La Paz, sobre el Río Pilcomayo.	45
4.2. Curva de Probabilidad de Excedencia de Caudales	47

4.3.	Caracterización de Sedimentos	48
4.3.1.	Granulometría	48
4.3.2.	Villamontes	48
4.3.3.	Zona de Embocadura	49
4.3.4.	Misión La Paz	49
<b>5.</b>	<b>Campañas</b>	<b>51</b>
5.1.	Primera Campaña	51
5.2.	Segunda Campaña	51
5.3.	Tercera Campaña	51
<b>6.</b>	<b>Desbordes en el tramo Villamontes – Misión La Paz</b>	<b>53</b>
6.1.	Trabajo con Sensores Remotos	55
6.1.1.	Imágenes Landsat	56
6.2.	Metodología	58
6.3.	Resultados	59
6.3.1.	Análisis por crecida	59
6.3.2.	Análisis por desborde	69
6.3.3.	Análisis de los desbordes en su conjunto	73
6.4.	Conclusiones	75
<b>7.</b>	<b>Modelación Digital del Terreno</b>	<b>77</b>
7.1.	Modelo Digital del Terreno ASTER-GDEM	80
7.2.	Modelo Digital del Terreno SRTM	80
7.3.	Comparación de Modelos Digitales del Terreno	81
<b>8.</b>	<b>Modelación Numérica</b>	<b>85</b>
8.1.	Modelación Hidráulica Unidimensional	85
8.1.1.	Descripción General del Modelo	86
8.1.2.	Datos de Entrada	88
8.1.3.	Primera Corrida del Modelo – Sin Vertedero Lateral	96
8.1.4.	Segunda Corrida del Modelo – Con Vertedero Lateral	97
8.2.	Modelación Hidrológica	101
8.2.1.	Muskingum	103
8.2.2.	Onda Cinemática	108
8.2.3.	Muskingum-Cunge	116
8.3.	Conclusiones	123
<b>9.</b>	<b>Movimiento de Fondo en la Sección de Aforo de Misión La Paz</b>	<b>125</b>
<b>10.</b>	<b>Propuesta de Metodología para el Estudio de Crecidas</b>	<b>131</b>
10.1.	Análisis de la Crecida del año 2013	132
10.1.1.	Lecturas de Escala	132
10.1.2.	Hidrogramas	132
10.1.3.	Análisis de las lecturas de escala	133
10.1.4.	Análisis de Imágenes Satelitales	134
10.1.5.	Resultado del Análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores	134
10.1.6.	Aplicación de los modelos numéricos	136
10.1.7.	Movimiento del Fondo	137
<b>11.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>139</b>

## **BIBLIOGRAFÍA** \_\_\_\_\_ **141**

### **ANEXO - I. PUBLICACIONES REALIZADAS EN EL CONTEXTO DE LA TESIS** \_\_\_\_\_ **147**

### **ANEXO - II. CAMPAÑAS EN EL RÍO PILCOMAYO CON PARTICIPACIÓN DEL AUTOR** \_\_\_\_\_ **151**

II - 1.	Primera Campaña	153
II - 1. 1.	Itinerario	153
II - 1. 2.	Zona embocadura, Puesto Pintos y Puesto Jerez	154
II - 1. 3.	Zonas de Desbordes Hito 1, D'Orbigny y La Puntana	158
II - 1. 4.	Monte Carmelo, La Curvita, La Garrapata, La Monona, Santa María, Bajada Delfín y Marca Borrada	160
II - 1. 5.	Santa Victoria, La Gracia y Misión La Paz	164
II - 1. 6.	Ibibobo y Villamontes	168
II - 2.	Segunda Campaña	175
II - 2. 1.	Zona de Desbordes – Las Vertientes	175
II - 2. 2.	Aforo con molinete desde vagoneta en Misión La Paz	180
II - 2. 3.	Aforo con Flotadores en Misión La Paz.	182
II - 2. 4.	Aforo por Sensor de Radar Kalesto en Misión La Paz	185
II - 2. 5.	Aforo por seguimiento de partículas en Misión La Paz.	187
II - 3.	Tercera Campaña	193

### **ANEXO - III. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y AMBIENTALES DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO** **197**

III - 1.	Clima	199
III - 2.	Características de las Poblaciones urbana, rural y originaria	202
III - 3.	Problemática Ambiental y Social	206
III - 4.	Breve Historia de los Tratados Binacionales y Trinacionales	208
III - 5.	Generación de Sedimentos	212
III - 6.	Transporte de Sedimentos	213
III - 7.	Hidrogeología	214
III - 8.	Contaminación del agua	217

### **ANEXO - IV. ALGUNAS CONSIDERACIONES TÉCNICAS SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO Y LÍQUIDO EN EL RÍO PILCOMAYO** \_\_\_\_\_ **219**



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.-</b> Mapa Político de la cuenca del Río Pilcomayo, (Dirección Ejecutiva 2014). .....	1
<b>Figura 2.-</b> Esquema de Pendientes medias, cuenca alta y cuenca baja (Lagranja 2001)....	3
<b>Figura 3.-</b> Identificación de Desbordes, Localidades de Referencia y el origen del bañado La Estrella. ....	4
<b>Figura 4.-</b> Zona de Desborde en Misión Las Vertientes, Campaña enero 2014. ....	5
<b>Figura 5.-</b> Esquema de cauce “colgado” y del proceso de formación. ....	5
<b>Figura 6.-</b> Características Principales del abanico aluvial del Pilcomayo (Iriondo, Colombo y Kröhling 2000). ....	10
<b>Figura 7.-</b> Ubicación de la zona de Embocadura dentro del abanico fluvial (Halcrow 2010). ....	11
<b>Figura 8.-</b> Retroceso del Río Pilcomayo entre 1905 y 2006, (Halcrow 2010). ....	11
<b>Figura 9.-</b> Mapa del Retroceso del Cauce del Río Pilcomayo, 1974- 1993 (Kopaliani y Georgievsky 1993). ....	12
<b>Figura 10.-</b> Retroceso del Río Pilcomayo desde 1975 (Kopaliani y Georgievsky 1993) (Halcrow 2010).....	13
<b>Figura 11.-</b> Tipos de cauce en el tramo de Villamontes a Misión La Paz. Imagen Landsat 25/01/2014.....	14
<b>Figura 12.-</b> Imagen SRTM de zonas próximas a Santa Victoria. Se identifican dos perfiles Transversales. Fuente: Elaboración Propia.....	15
<b>Figura 13.-</b> Perfil 1 (Noreste – Sudoeste). Fuente: Elaboración Propia .....	16
<b>Figura 14.-</b> Perfil 2 (Norte – Sur). Fuente: Elaboración Propia .....	16
<b>Figura 15.-</b> Mapa de puntos críticos y de escurrimientos (E. D. Cafaro 2010). ....	17
<b>Figura 16.-</b> Erosión de Barrancas (Gobierno de la Provincia de Salta 2013) .....	19
<b>Figura 17.-</b> Mapa que muestra dónde se encontraba el Estero Patiño (Salúm Flecha 1983). ....	19
<b>Figura 18.-</b> Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (L. Amarilla 2014).....	20
<b>Figura 19.-</b> Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (L. Amarilla 2014).....	21
<b>Figura 20.-</b> Derrame en tapón, aguas relativamente altas, ver la desaparición del cauce (Martín Vide, y otros 2006).....	21
<b>Figura 21.-</b> Desborde la Gracia (Gobierno de la Provincia de Salta 2013).....	22
<b>Figura 22.-</b> Desborde del Río Pilcomayo (Gobierno de la Provincia de Salta 2013) .....	22
<b>Figura 23.-</b> Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas arriba de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral 2012). ....	23
<b>Figura 24.-</b> Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas debajo de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral 2012). ....	24
<b>Figura 25.-</b> Esquemas de tipos de avulsión (Slingerland y Smith 2004). ....	25
<b>Figura 26.-</b> Esquema de componentes principales de un sistema con avulsión (Makaske 2000). ....	26
<b>Figura 27.-</b> Líneas de centro del cauce en los años 1976, 1996, 1999 y 2008 digitalizadas (García, y otros 2014).....	27
<b>Figura 28.-</b> Vista de la zona de Embocadura. Satélite IRS, fecha 14/11/12 (Baldissone 2013). ....	28
<b>Figura 29.-</b> Erogación de caudales hacia Argentina y Paraguay entre los años 2009 y 2011 (Baldissone 2013).....	29

<b>Figura 30.-</b> Localización de las Estaciones en Villamontes y Misión La Paz (Dirección Ejecutiva 2014).....	31
<b>Figura 31.-</b> Curva Altura-Caudal a partir de aforos en Villamontes desde 26/03/2004 al 29/4/2014, SENAMHI. Fuente: Elaboración Propia.....	32
<b>Figura 32.-</b> Estación de aforo en Villamontes, Bolivia, Vista hacia aguas abajo, julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).....	32
<b>Figura 33.-</b> Sensor Kalesto y Torre de sección de aforo julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).....	33
<b>Figura 34.-</b> Vista hacia aguas arriba, julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	33
<b>Figura 35.-</b> Sección de aforo por vagoneta; septiembre 2013 (Baldissoni, Cristanchi y Testa 2013).....	33
<b>Figura 36.-</b> Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.....	34
<b>Figura 37.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala hasta 0,88 m. ....	34
<b>Figura 38.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala desde 0,88 m a 2,08 m. ....	35
<b>Figura 39.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala desde 2,08 m. ....	35
<b>Figura 40.-</b> Lecturas de escala durante enero y febrero de 2014.....	36
<b>Figura 41.-</b> Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014) .....	36
<b>Figura 42.-</b> Niveles durante los aforos enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014).....	36
<b>Figura 43.-</b> Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014).....	37
<b>Figura 44.-</b> Niveles durante los aforos febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014).....	37
<b>Figura 45.-</b> Curva Altura- Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/9/1972 al 20/8/2009, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia. ....	38
<b>Figura 46.-</b> Curva Altura - Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/1/2010 al 24/5/2014, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia. ....	39
<b>Figura 47.-</b> Sección de aforo en Misión La Paz, Argentina, al frente Pozo Hondo, Paraguay, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	39
<b>Figura 48.-</b> Vista hacia aguas abajo de la sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).....	40
<b>Figura 49.-</b> Vista hacia aguas arriba de la sección de aforo de Misión La Paz, se observa el puente internacional, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	40
<b>Figura 50.-</b> Puente internacional y Sensor de Nivel (OTT), vista desde aguas abajo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	40
<b>Figura 51.-</b> Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.....	41
<b>Figura 52.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala hasta 3,12 m. ....	41
<b>Figura 53.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala desde 3,12 m hasta 4,10 m. ....	42
<b>Figura 54.-</b> Curva H-Q para lecturas de escala por encima de los 4,10 m. ....	42
<b>Figura 55.-</b> Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014) .....	43
<b>Figura 56.-</b> Niveles durante los aforos 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014) .....	43
<b>Figura 57.-</b> Curvas QDT para Misión La Paz, Curvas de Probabilidades Gumbel. ....	46



<b>Figura 58.-</b> Curvas de Excedencia para VM y MLP.....	47
<b>Figura 59.-</b> Curvas de Excedencia para VM y MLP.....	48
<b>Figura 60.-</b> Rango de curvas granulométrica del material del lecho del río en Villamontes (EVARSA 2007). .....	48
<b>Figura 61.-</b> Curva granulométrica del material del lecho del río en la zona de la embocadura (Pool, Usai y Baas 1993).....	49
<b>Figura 62.-</b> Detalle de ubicación. (Elaboración Propia) .....	53
<b>Figura 63.-</b> Representación 3D de Imagen Landsat 25/01/2013 y DEM SRTM, Esc. vert. aumentada 12 veces (Elaboración Propia) .....	54
<b>Figura 64.-</b> Imagen Landsat 25/01/2013 – Bandas: 3 (roja), 2 (verde) y 1 (azul) en escala de grises. ....	55
<b>Figura 65.-</b> Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición color natural, Bandas 321(RGB). .....	55
<b>Figura 66.-</b> Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición falso color convencional, Bandas 432. ....	56
<b>Figura 67.-</b> Imagen Landsat 25/01/2013 – Comp. falso color mejorado, Izq. Bandas 453 y Der. Bandas 543 .....	56
<b>Figura 68.-</b> Cobertura histórica de las imágenes Landsat.....	57
<b>Figura 69.-</b> Frecuencias de onda que capta cada Banda en Landsat 7 y Landsat 8.....	58
<b>Figura 70.-</b> Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 1999. ....	61
<b>Figura 71.-</b> Imagen 1999107 (17/04/1999) .....	61
<b>Figura 72.-</b> Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2005. ....	62
<b>Figura 73.-</b> Imagen 2005051 (20/02/2005). ....	62
<b>Figura 74.-</b> Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2006. ....	63
<b>Figura 75.-</b> Imagen 2006030 (30/01/2006) .....	63
<b>Figura 76.-</b> Imagen 2006038 (07/02/2006). ....	63
<b>Figura 77.-</b> Imagen 2006046 (15/02/2014). ....	64
<b>Figura 78.-</b> Imagen 2006054 (23/02/2014). ....	64
<b>Figura 79.-</b> Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2008. ....	65
<b>Figura 80.-</b> Imagen 2008036 (05/02/2008). ....	65
<b>Figura 81.-</b> Imagen 2008044 (13/02/2008). ....	65
<b>Figura 82.-</b> Imagen 2008060 (29/02/2008). ....	66
<b>Figura 83.-</b> Imagen 2008068 (16/03/2008). ....	66
<b>Figura 84.-</b> Imagen 2008076 (16/03/2008). ....	66
<b>Figura 85.-</b> Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2013 .....	68
<b>Figura 86.-</b> Imagen 2013025 (25/01/2013). ....	68
<b>Figura 87.-</b> Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de El Chañaral, 273 m. 69	
<b>Figura 88.-</b> Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, El Chañaral.....	70
<b>Figura 89.-</b> Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de La Gracia, 256 msnm. ....	71
<b>Figura 90.-</b> Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, La Gracia.....	71
<b>Figura 91.-</b> Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde Pozo Hondo, 258 msnm. ....	72

<b>Figura 92.-</b> Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde La Puerta, 275 msnm. .	72
<b>Figura 93.-</b> Superposición de Desbordes. ....	73
<b>Figura 94.-</b> Trayectoria de los Desbordes. ....	74
<b>Figura 95.-</b> Curva que relaciona el área cubierta por los desbordes con los caudales pico en VM. ....	74
<b>Figura 96.-</b> Topografía ASTER, Río Pilcomayo y localidades de referencia. ....	77
<b>Figura 97.-</b> Secciones en el tramo Villamontes a Misión La Paz por el Río Pilcomayo, fondo DEM de SRTM. ....	78
<b>Figura 98.-</b> Imagen SRTM. ....	79
<b>Figura 99.-</b> Imagen ASTER. ....	79
<b>Figura 100.-</b> Diferencia entre Imágenes ASTER y SRTM. ....	79
<b>Figura 101.-</b> Representación satélite Terra – ASTER-GDEM. ....	80
<b>Figura 102.-</b> Representación taxi espacial SRTM (CIAT 2014). ....	81
<b>Figura 103.-</b> Comparación de los perfiles longitudinales según ASTER GDEM y SRTM. ....	82
<b>Figura 104.-</b> Perfiles longitudinales por margen derecha a partir de ASTER, SRTM y cartografía IGM-Bolivia. ....	82
<b>Figura 105.-</b> Comparación de topografías extraídas de ASTER GDEM y SRTM en Diferentes secciones transversales a lo largo del Río Pilcomayo. ....	83
<b>Figura 106.-</b> Sección de VM según MDT ASTER, SRTM y dos aforos con 835 m <sup>3</sup> /s y 584 m <sup>3</sup> /s de caudal. ....	84
<b>Figura 107.-</b> Planimetría de las secciones creadas en HEC-RAS e identificación de localidades de interés. ....	86
<b>Figura 108.-</b> Esquema del proceso de cálculo del Software HEC-RAS (Blade, y otros 2009). ....	87
<b>Figura 109.-</b> Esquema de cálculo de Preissman de los cuatro puntos. ....	88
<b>Figura 110.-</b> H-Q para VM (1973-2013) $Q = 187,1 H - 0,485/3, R^2 = 0,95$ . ....	89
<b>Figura 111.-</b> H-Q para MLP (2013) en Rama Ascendente $Q = 180,4H - 2,16753 R^2=0,98$ . ....	89
<b>Figura 112.-</b> H-Q para MLP (2013) en Rama Descendente $Q = 124,10H - 1,53553 R^2=0,87$ . ....	89
<b>Figura 113.-</b> Condición de Entrada Aguas Arribas, Hidrograma de Crecida del año 2013. ....	89
<b>Figura 114.-</b> Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D. ....	90
<b>Figura 115.-</b> Calibración de modelo unidimensional con imágenes satelitales (Corral 2010). ....	90
<b>Figura 116.-</b> Hidrograma Observado en MLP. ....	91
<b>Figura 117.-</b> Opciones de Cálculo y Tolerancias utilizadas para modelar. ....	93
<b>Figura 118.-</b> Comparación de Resultados de la Modelación con diferentes n de Manning, SRTM. ....	95
<b>Figura 119.-</b> Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación) Geometría SRTM. ....	96
<b>Figura 120.-</b> Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación), Geometría ASTER. ....	96
<b>Figura 121.-</b> Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER. ....	96

<b>Figura 122.-</b> Modelo Lateral impuesto a la modelación.....	97
<b>Figura 123.-</b> Sección en progresiva de El Chañaral.....	98
<b>Figura 124.-</b> Zona por debajo de los 273 m (en azul), se activa El Chañaral. ....	98
<b>Figura 125.-</b> Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT SRTM. ....	98
<b>Figura 126.-</b> Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT ASTER. ....	99
<b>Figura 127.-</b> Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT SRTM. ....	99
<b>Figura 128.-</b> Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT ASTER. ....	100
<b>Figura 129.-</b> Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER. ....	100
<b>Figura 130.-</b> Superposición Imagen Landsat 25/01/2013 y resultados HEC-RAS, en rojo. ....	101
<b>Figura 131.-</b> Esquema de modelación en HEC-HMS.....	103
<b>Figura 132.-</b> Almacenamiento por prisma y cuña en un canal (Chow, Maidment y Mays 1995). ....	104
<b>Figura 133.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP. ....	105
<b>Figura 134.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación. ....	105
<b>Figura 135.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	105
<b>Figura 136.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	106
<b>Figura 137.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP. ....	106
<b>Figura 138.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación. ....	107
<b>Figura 139.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	107
<b>Figura 140.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	107
<b>Figura 141.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP. ....	109
<b>Figura 142.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación. ....	110
<b>Figura 143.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	110
<b>Figura 144.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	110
<b>Figura 145.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.....	111
<b>Figura 146.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación.....	111
<b>Figura 147.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	112
<b>Figura 148.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	112
<b>Figura 149.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.....	113
<b>Figura 150.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación.....	113
<b>Figura 151.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	114

<b>Figura 152.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	114
<b>Figura 153.-</b> Comparación de Hidrogramas con diferentes n de Manning, Onda Cinemática.....	114
<b>Figura 154.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS .....	115
<b>Figura 155.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	115
<b>Figura 156.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.....	117
<b>Figura 157.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación.....	117
<b>Figura 158.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS .....	117
<b>Figura 159.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	118
<b>Figura 160.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.....	118
<b>Figura 161.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación.....	119
<b>Figura 162.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS .....	119
<b>Figura 163.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	119
<b>Figura 164.-</b> Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.....	120
<b>Figura 165.-</b> Hidrogramas del desborde según simulación.....	120
<b>Figura 166.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS .....	121
<b>Figura 167.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	121
<b>Figura 168.-</b> Comparación de Hidrogramas con diferentes n de Manning, Muskingum-Cunge.....	121
<b>Figura 169.-</b> Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS .....	122
<b>Figura 170.-</b> Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.....	122
<b>Figura 171.-</b> Lecho y superficie de Agua medidos en el Río Pilcomayo en la Sección misión la Paz, enero 2013.....	126
<b>Figura 172.-</b> Relación entre Caudal y Caudal Específico .....	126
<b>Figura 173.-</b> Elementos característicos de una sección considerados para el cálculo de la erosión potencial generalizada transitoria (Farías 2011).....	127
<b>Figura 174.-</b> Formulaciones de Erosión General Transitoria. (Baldissoni 2013) Modificada .....	127
<b>Figura 175.-</b> Tirante en relación al caudal específico para las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma. Crecida 2013.....	128
<b>Figura 176.-</b> Corrección del tirante para rama descendente del hidrograma .....	128
<b>Figura 177.-</b> Cotas relativas de la Superficie de Agua, del fondo y del fondo calculado.....	129
<b>Figura 178.-</b> Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.....	132

<b>Figura 179.-</b> Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz.....	132
<b>Figura 180.-</b> Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.....	133
<b>Figura 181.-</b> Imagen Landsat 2013025 (25/01/2013).....	134
<b>Figura 182.-</b> Relación Velocidad de Avance vs. Días transcurridos desde activación del desborde El Chañaral.....	135
<b>Figura 183.-</b> Relación Área Inundada vs Longitud del desborde El Chañaral.....	135
<b>Figura 184.-</b> Caudales que arriban a MLP, observado y modelado.....	136
<b>Figura 185.-</b> Hidrograma modelado de los desbordes, efecto del vertedero lateral.....	136
<b>Figura 186.-</b> Movimiento del Fondo y Superficie de Agua, Crecida año 2013.....	137
<b>Figura 187.-</b> Recorrido por zona de la Embocadura, parte en camioneta, parte en lancha (Img Landsat 08/10/2013).....	155
<b>Figura 188.-</b> Canal Las Torres y taponamiento del cauce seco argentino, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	156
<b>Figura 189.-</b> Río Pilcomayo visto hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	156
<b>Figura 190.-</b> Sección de aforo, aguas arriba de la Embocadura septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	157
<b>Figura 191.-</b> Sección de aforo, aguas arriba de Embocadura Sept 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	157
<b>Figura 192.-</b> Puesto Pintos septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	158
<b>Figura 193.-</b> Puesto Pintos septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	158
<b>Figura 194.-</b> Puesto Jeréz, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	158
<b>Figura 195.-</b> Defensas en D'Orbigny (Bolivia) y en Hito 1 (Argentina).....	159
<b>Figura 196.-</b> Defensa de D'Orbigny (Bolivia) septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	159
<b>Figura 197.-</b> Encuentro de Defensas de Hito 1 y D'Orbigny. La de Hito 1 es 50 cm más baja, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	160
<b>Figura 198.-</b> Recorrido desde Hito 1 (Img Landsat 08/10/2013).....	160
<b>Figura 199.-</b> Monte Carmelo. Vista aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	161
<b>Figura 200.-</b> Monte Carmelo. Vista aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	161
<b>Figura 201.-</b> Identificación alcantarillas y badenes, entrada a Bajada Delfín y Marca Borrada, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	162
<b>Figura 202.-</b> Camino a La Garrapata, zona de desborde, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	162
<b>Figura 203.-</b> La Garrapata, vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	163
<b>Figura 204.-</b> La Garrapata, vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	163
<b>Figura 205.-</b> Barranca en Marca Borrada, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	163
<b>Figura 206.-</b> Recorrido desde Misión La Paz hacia Santa Victoria y La Gracia.....	164

<b>Figura 207.-</b> Pilcomayo sobre el puente MLP - Pozo Hondo, vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	164
<b>Figura 208.-</b> Pilcomayo sobre el puente MLP - Pozo Hondo, vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	165
<b>Figura 209.-</b> Defensa de Santa Victoria, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	165
<b>Figura 210.-</b> Defensa de La Gracia, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013). .....	165
<b>Figura 211.-</b> Alisos (Palos Bobo) en La Gracia, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).....	166
<b>Figura 212.-</b> Sección en La Gracia, Vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	166
<b>Figura 213.-</b> Sección en La Gracia, Vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	166
<b>Figura 214.-</b> Sección en La Gracia, Vista hacia aguas arriba, continuación de la anterior, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013) .....	167
<b>Figura 215.-</b> Recorrido desde Misión La Paz – Pozo hacia Villamontes por Margen Izquierda (Img Landsat 08/10/2013).....	168
<b>Figura 216.-</b> Identificación de Zonas Bajas y obras de arte en el camino de Cuitaiqui a Ibibobo. ....	169
<b>Figura 217.-</b> Cuitaiqui, hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	169
<b>Figura 218.-</b> Cuitaiqui, cauce entrelazado, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).....	170
<b>Figura 219.-</b> Cuitaiqui, hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).....	170
<b>Figura 220.-</b> Cuitaiqui, segundo nivel de barrancas, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).....	170
<b>Figura 221.-</b> Recorrido en Villamontes .....	171
<b>Figura 222.-</b> Villamontes, Hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	171
<b>Figura 223.-</b> Villamontes. Sección de aforos, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	171
<b>Figura 224.-</b> Villamontes, medidor automático de niveles, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).....	172
<b>Figura 225.-</b> Villamontes hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	172
<b>Figura 226.-</b> Estación de aforo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	172
<b>Figura 227.-</b> Molinete de aforo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	173
<b>Figura 228.-</b> Aguas Arriba del puente Ustarez, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	173
<b>Figura 229.-</b> Aguas Abajo del Puente Ustarez, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	173

<b>Figura 230.-</b> Aguas Arriba del Puente Carretero, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	174
<b>Figura 231.-</b> Aguas Abajo del Puente Carretero, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa Tacchino 2013) .....	174
<b>Figura 232.-</b> Recorrido desde Misión La Paz hacia Las Vertientes (Img Landsat 08/10/2013). .....	175
<b>Figura 233.-</b> Identificación de Defensas, Bajos Naturales, y Zonas de Escurrimiento (Img Landsat 08/10/2013). .....	176
<b>Figura 234.-</b> Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	176
<b>Figura 235.-</b> Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	177
<b>Figura 236.-</b> Las vertientes, hacia aguas arriba, en punto sur, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	177
<b>Figura 237.-</b> Las vertientes, hacia aguas abajo, en punto sur, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	177
<b>Figura 238.-</b> Suelo Agrietado y Alisos, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	178
<b>Figura 239.-</b> Cauce del Río con Resaca, vista hacia aguas abajo en punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	178
<b>Figura 240.-</b> Cauce del Río con Resaca, vista hacia aguas abajo en punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	178
<b>Figura 241.-</b> Zona de Desbordes, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	179
<b>Figura 242.-</b> Zona de paso de agua en desbordes, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	179
<b>Figura 243.-</b> Cauce del Río, vista hacia aguas arriba, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	179
<b>Figura 244.-</b> Aforo con Moliente sobre vagoneta. Sección MLP, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	180
<b>Figura 245.-</b> Escalas en sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	181
<b>Figura 246.-</b> Curva H-Q a partir de aforos con molinete desde vagoneta del 16 al 24 de enero de 2014. .....	182
<b>Figura 247.-</b> Llenado de botellas para aforo con flotadores, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	182
<b>Figura 248.-</b> Preparación de botellas para el aforo con flotadores, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	182
<b>Figura 249.-</b> Curva H-Q a partir de aforos de enero a marzo 2014. Con círculo se identifican los aforos con flotadores desde vagoneta. .....	184
<b>Figura 250.-</b> Croquis Ubicación de escalas de EVARSA de CTN, Distancia entre escalas: 825 m. .....	184
<b>Figura 251.-</b> Izq.) Sensor del Kalesto. Der.) Panel solar y Panel de Control y transmisión de datos del Kalesto (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	186
<b>Figura 252.-</b> Esquema de funcionamiento del sensor Kalesto (OTT 2008). .....	186
<b>Figura 253.-</b> Esquema del Sistema de Transmisión de Datos (BIOSIS 2014) .....	187

<b>Figura 254.-</b> Sistema de sostén para la cámara digital, ancho del cauce (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	188
<b>Figura 255.-</b> Captura de video con distancias de referencia para rectificación (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	188
<b>Figura 256.-</b> Reconstrucción de la sección a partir de las Capturas de video de las 11 subsecciones del río, ancho total de superficie de agua 90 m. Se observan las ramas depositadas en las pilas centrales (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).....	189
<b>Figura 257.-</b> Palo bobo pintado como referencia de escala (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	190
<b>Figura 258.-</b> Sistema de sostén para la cámara digital perpendicular al flujo (Cristanchi y Testa Tacchino 2014) .....	190
<b>Figura 259.-</b> Imagen de la sección desde Aguas Abajo sobre la vagoneta. Se observan las ramas en las pilas (Cristanchi y Testa Tacchino 2014) .....	191
<b>Figura 260.-</b> Metodología de Cálculo de la Velocidad Superficial, Imágenes obtenidas por software PTVlab (CETA-UNC), (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	192
<b>Figura 261.-</b> Perfil de Velocidades, resultados de aforo por seguimiento de partículas. Se consideraron nulos los valores de velocidad negativa (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). .....	193
<b>Figura 262.-</b> Configuración del sistema para la implementación de la técnica de PIV. La cámara digital se ha montado sobre una grúa desde la margen izquierda del río (Szupiany, y otros 2014). .....	194
<b>Figura 263.-</b> Contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos en la región cercana a la superficie libre con las diferentes técnicas (Szupiany, y otros 2014). .....	195
<b>Figura 264.-</b> Contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas en la sección de aforo de Villamontes (Szupiany, y otros 2014). .....	196
<b>Figura 265.-</b> Campo de Velocidades de flujo [m/s] registrado con ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz de frecuencia, utilizando una plataforma móvil. Las progresivas indican distancia desde margen izquierda (Szupiany, y otros 2014). .....	196
<b>Figura 266.-</b> Clasificación Climática de la cuenca en el Río Pilcomayo. Fuente: (Halcrow-Serman 2007). .....	199
<b>Figura 267.-</b> Mapa de Precipitación Medias Anual en la cuenca del Río Pilcomayo. Fuente: (Halcrow-Serman 2007). .....	201
<b>Figura 268.-</b> Mapa de Evapotranspiración Potencial Media Anual en la cuenca del Río Pilcomayo. Fuente: (Halcrow-Serman 2007). .....	201
<b>Figura 269.-</b> Arte de Pesca utilizada en la zona, red Tijera (De Simone 2014). .....	203
<b>Figura 270.-</b> Arte de Pesca utilizada en la zona, red Propia (De Simone 2014). .....	203
<b>Figura 271.-</b> Localización de Pueblos indígenas de la cuenca del Río Pilcomayo (Colegio mayor Sto Tomás de Aquino, 2014). .....	204
<b>Figura 272.-</b> Mapa de densidad Poblacional en la cuenca del Pilcomayo (Halcrow-Serman 2007). .....	205
<b>Figura 273.-</b> Ubicación en la cuenca (Kopaliani y Georgievsky 1993).....	208
<b>Figura 274.-</b> Laudo Hayes.....	209
<b>Figura 275.-</b> Aportes interanuales líquidos, aportes interanuales sólidos y tasa de erosión interanual en la cuenca alta del Pilcomayo (Malbrunot y Amarilla 2007) .....	212



<b>Figura 276.-</b> Transporte Sólido Anual del Río Pilcomayo (De Lío, y otros 2007). .....	213
<b>Figura 277.-</b> Complejos de Acuíferos (Tujchneider, y otros 2007) .....	215
<b>Figura 278.-</b> Mapa de Isopiezas (Tujchneider, y otros 2007).....	215
<b>Figura 279.-</b> Ubicación de Diques de Cola en la cuenca alta del Río Pilcomayo (Menéndez 2014) .....	217
<b>Figura 280.-</b> Localización de Localidades importantes en el recorrido de la mancha contaminante. Fuente: Elaboración Propia .....	218
<b>Figura 281.-</b> Rotura dique de Colas, Mina Santiago Apóstol (Menéndez 2014).....	218
<b>Figura 282.-</b> Series de Caudales Líquidos y Sólidos fino y grueso entre 1993 y 2012 ....	221
<b>Figura 283.-</b> Relación entre caudal líquido y caudal sólido de fondo o grueso (serie 1993-2014). .....	222
<b>Figura 284.-</b> Relación entre caudal líquido y caudal sólido fino, carga en suspensión (serie 1993-2014).....	222
<b>Figura 285.-</b> Relación entre caudal sólido grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).....	223
<b>Figura 286.-</b> Relación entre caudal líquido y caudales sólidos grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).....	223
<b>Figura 287.-</b> Relación entre caudal líquido y caudal sólido total (serie 1993-2014). ....	224



## ÍNDICE DE TABLAS

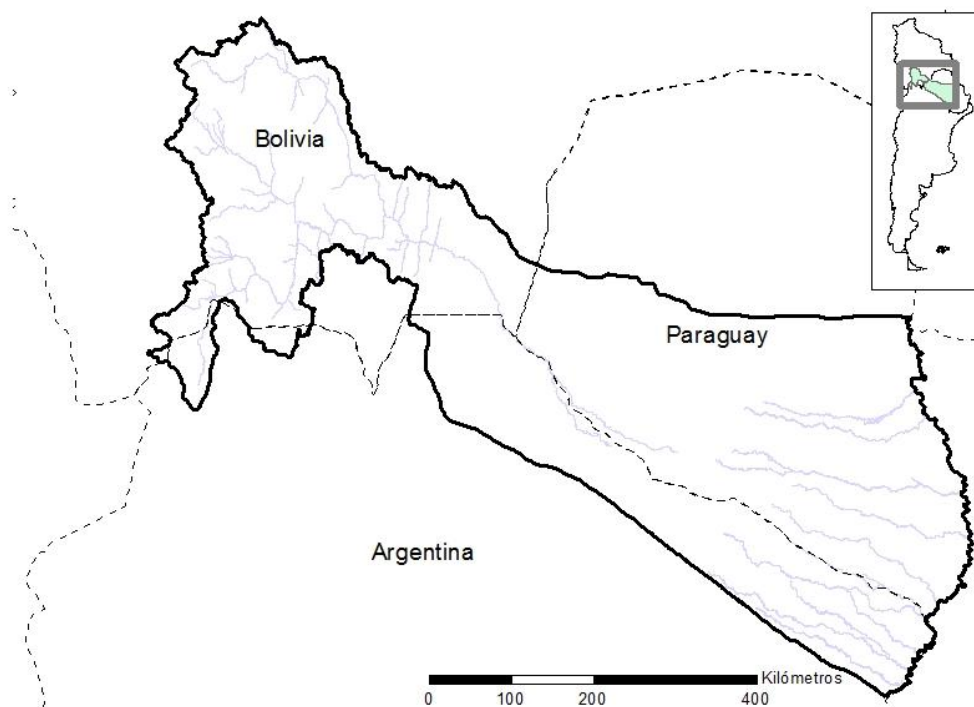
Tabla 1.- Cotas de Localidades de la cuenca del Río Pilcomayo. ....	3
Tabla 2.- Comparación de Caudales diarios líquidos máximos, mínimos anuales y módulo de los Ríos Pilcomayo, Bermejo y Paraná. ....	4
Tabla 3.- Ríos con mayor transporte de sedimentos, tasa media anual.....	4
Tabla 4.- Aportes de Caudales sólidos, líquidos y tasa de erosión (Jack Klzobzi, Ramette y Roquero 1997) .....	14
Tabla 5.- Localización de Zonas de Desbordes y Estado de Avulsión (Farías y Cafaro 2010). .....	27
Tabla 6.- Caudales máximos medios anuales para duración de: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 días. .....	45
Tabla 7.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Gumbel.....	46
Tabla 8.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Log-Pearson III.....	46
Tabla 9.- Ejemplo de utilización de las curvas para el caso de la crecida del año 2013 ...	47
Tabla 10.- Tamaño de Finos en Suspensión, MLP (Brea y Spalletti 2011). ....	49
Tabla 11.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en el centro del cauce, MLP (Brea y Spalletti 2011). ....	49
Tabla 12.- Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	51
Tabla 13.- Resolución y características del Satélite Landsat 7.....	57
Tabla 14.- Resolución y características del Satélite Landsat 8.....	58
Tabla 15.- Caudales pico del hidrograma de crecida y Caudales en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes.....	60
Tabla 16.- Características MDT de ASTER-GDEM (ERSDAC 2003).....	80
Tabla 17.- Características MDT de SRTM (USGS 2014), .....	81
Tabla 18.- Progresivas de puntos de interés.....	86
Tabla 19.- Coeficientes de Rugosidad de Manning (Cafaro y Ramonell 2007).....	94
Tabla 20.- Cálculo de n de Manning a partir de formulaciones potenciales. ....	95
Tabla 21.- Guía para la selección del modelo de tránsito (USACE 2000).....	102
Tabla 22.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	104
Tabla 23.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	106
Tabla 24.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	109
Tabla 25.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	111
Tabla 26.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	112
Tabla 27.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	115
Tabla 28.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	116
Tabla 29.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	118
Tabla 30.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	120
Tabla 31.- Parámetros utilizados en la simulación. ....	122
Tabla 32.- Coeficientes utilizados en las diferentes corridas.....	123
Tabla 33.- Comparación de resultados de los diferentes modelos y valores observados. .....	123

Tabla 34.- Coeficientes para las formulaciones de Erosión generalizada transitoria (Farías 2011). .....	127
Tabla 35.- Tiempo de tránsito y propagación de la Crecida a partir de lecturas de escala en VM y MLP .....	133
Tabla 36.- Duración base del hidrograma de crecida y duración del Pico .....	134
Tabla 37.- Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes. ....	135
Tabla 38.- Aforos con molinete desde vagoneta, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	181
Tabla 39.- Resultados de aforos con flotadores desde el puente y desde vagoneta, enero 2014 y comparación con los resultados de molinete (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	183
Tabla 40.- Resultados de aforos con flotadores desde vagoneta para lectura de escala mayor a 5 m, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014). ....	183
Tabla 41.- Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).....	185

## 1. 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).

La Cuenca del Plata en el eje Paraguay – Paraná tiene tres características distintivas: La primera es el sistema orográfico de la Cordillera de los Andes hacia el oeste, así como el Amazonas, el segundo es el Escudo Brasileño hacia su cuadrante noreste, la tercera es una gran planicie entre ambas, que disminuye su pendiente suavemente hacia el río de la Plata. Otros elementos geomorfológicos importantes de la Cuenca del Plata son el Pantanal, una red de humedales poco profundos que abarca más de 140.000 km<sup>2</sup> hacia el norte, y el Chaco Americano, una extensa planicie que se desarrolla hasta el este de la cuenca. El Chaco tiene un clima semiárido y un escaso sistema de drenaje debido a su poco gradiente. Los ríos Bermejo, Pilcomayo y Salado son los encargados de drenar esta región. Estos ríos se originan en la cara este de los Andes con una elevada carga de sedimento que no puede ser soportada por las llanuras del Chaco. Como consecuencia, los ríos en el chaco, por lo general, están en situación de agradación con inestabilidades de las márgenes que dificultan la utilización de los recursos hídricos que son vitales en las regiones semiáridas (Khalid y Bazoberry Otero 1990).



**Figura 1.-** Mapa Político de la cuenca del Río Pilcomayo, (Dirección Ejecutiva 2014).

La cuenca del Río Pilcomayo abarca una superficie de aproximadamente 290.000 km<sup>2</sup>, con una población estimada de 1.500.000 de habitantes. A lo largo de su vasta superficie la variabilidad climática y geológica-geomorfológica han conformado un gran número de paisajes, con 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. 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. 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. Dentro de la cuenca Chaqueña se divide el Río Pilcomayo en el Río Pilcomayo Superior y Río Pilcomayo Inferior respectivamente, que corresponde a un tramo de 545 y 240 kilómetros. El Río Pilcomayo Superior se halla entre la ciudad de Villamontes en Bolivia y las poblaciones de Salto Palmar/Fortín Cabo en Argentina/Paraguay. 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 tapones, denominadas “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 retroceso del cauce se podría deber a las bajas pendientes, en esta zona de 0,3 ‰ y a leves movimientos orogénicos (Martín Vide, y otros 2006). El taponamiento actual se sitúa en el Río Pilcomayo Superior a una distancia de 220 kilómetros aguas abajo de Villamontes y 65 kilómetros aguas abajo del Punto Trifinio Esmeralda, punto límite entre Argentina, Paraguay y Bolivia.

Vale destacar que no hay, y no habría tampoco en la historia reciente, una conexión superficial directa o física entre el Río Pilcomayo en la cuenca alta y su desembocadura en el Río Paraguay, es decir, no existe una conexión superficial entre el Río Pilcomayo Superior e Inferior.

El año hidrológico para el Río Pilcomayo ha sido establecido desde el 1 de agosto al 30 de julio. Las precipitaciones pluviales en la cuenca alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90 % de la que precipita durante todo el año, repartiéndose el 10 % restante en los ocho meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial. (Pool y Van Duijne 1996)

En la Figura 2 se puede observar una esquematización de las pendientes medias a lo largo del cauce, siendo ésta del orden del 1 % aguas arriba de Villamontes y de 0,41 ‰ aguas abajo.

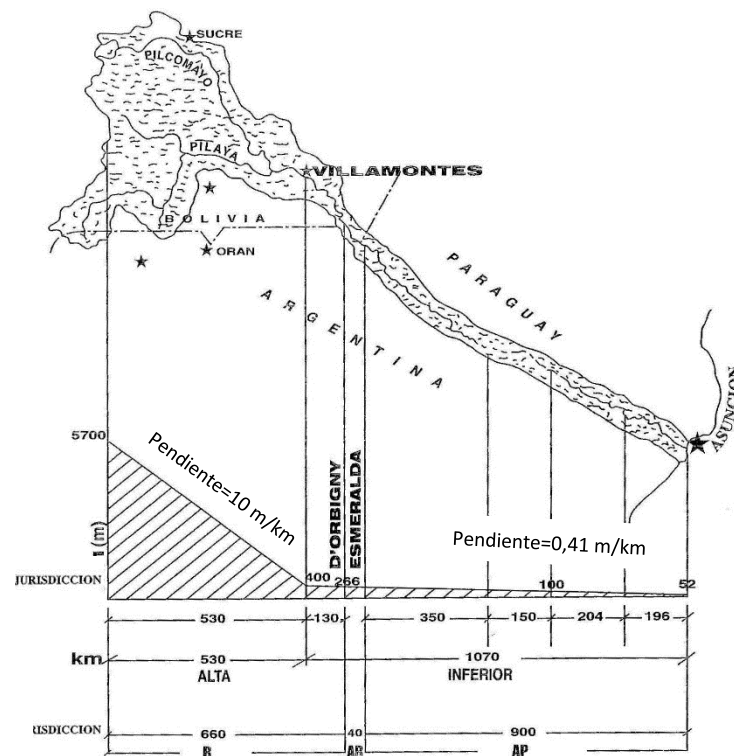


Figura 2.- Esquema de Pendientes medias, cuenca alta y cuenca baja (Lagranja 2001).

Tabla 1.- Cotas de Localidades de la cuenca del Río Pilcomayo.

Localidad	Cota msnm
Potosí	3976
Sucre	2790
Villamontes	400
Ibibobo	340
Misión La Paz	230
Santa María	275
La Dorada	200
Salto Palmar	108

El Río Pilcomayo presenta un gran rango de caudales con estiajes desde 1,4 m<sup>3</sup>/s en la estación de aforo de Misión La Paz (MLP) y máximos de 6500 m<sup>3</sup>/s en épocas de crecidas en la estación de aforo de Villamontes (VM). El máximo calculado en MLP ha sido de 4750 m<sup>3</sup>/s, 3300 veces mayor que el mínimo y 26 veces mayor que el modulo en esta sección, estimados en 1,47 m<sup>3</sup>/s y 180 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Estos números dan una clara idea de la gran irregularidad del río, especialmente si se los compara, por ejemplo, con los del río Paraná en Corrientes o el río Bermejo en Pozo Sarmiento. En la Tabla 2 se observa que la diferencia entre caudales máximo y mínimo es de solo 5,6 veces para el Paraná y de 136,5 para el Bermejo. Los máximos se obtuvieron a partir de curvas H-Q.

**Tabla 2.-** Comparación de Caudales diarios líquidos máximos, mínimos anuales y módulo de los Ríos Pilcomayo, Bermejo y Paraná.

Río	Estación	Q <sub>máx</sub> m <sup>3</sup> /s	Módulo m <sup>3</sup> /s	Q <sub>mín</sub> m <sup>3</sup> /s	Q <sub>máx</sub> /Q <sub>mín</sub>	Q <sub>máx</sub> /Mód
Pilcomayo	Villamontes	6500	266	32,88	228,10	28,19
	Misión La Paz	4750	180	1,45	3300	26,38
Bermejo	Pozo Sarmiento	3488	375	25,55	136,55	9,30
Paraná	Corrientes	60215	17189	10615	5,67	3,50

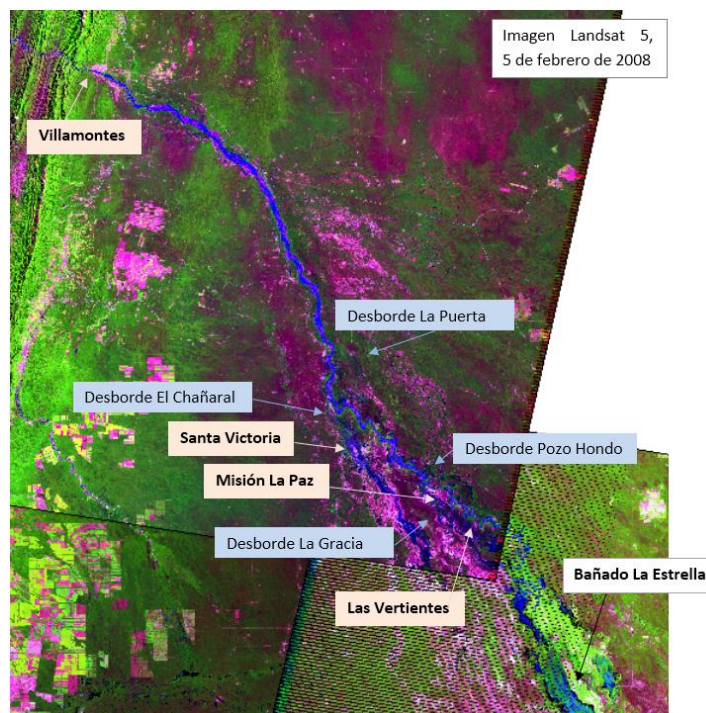
El Río Pilcomayo también presenta una gran variación en la concentración de sedimentos a lo largo del año hidrológico, la concentración es más elevada en los meses de crecida y reducida en los meses de estiaje. En aguas altas se tiene una concentración media de C=23,6 g/l y en estiaje esta es sólo de 0,011 g/l, como concentración máxima se ha obtenido 60 g/l (Martín Vide, y otros 2006). El 95 % del transporte del sedimento ocurre en los meses de aguas altas.

En la Tabla 3 se presentan los ríos con mayor transporte de sedimentos, incluido el Pilcomayo entre los principales

**Tabla 3.-** Ríos con mayor transporte de sedimentos, tasa media anual.

Río	Sedimentos (Kg/m <sup>3</sup> )
Yukón (Alaska)	26,0
Pilcomayo (Arg-Par)	23,1
Huanghe (Asia)	22,4
Bermejo (Argentina)	12,0
Nilo (África)	3,7
Ganges (Asia)	1,7

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. En la Figura 3 se presentan los desbordes mencionados.



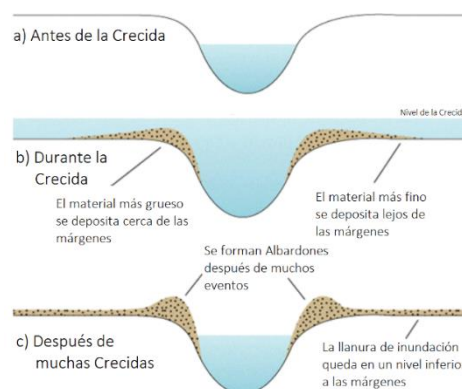
**Figura 3.-** Identificación de Desbordes, Localidades de Referencia y el origen del bañado La Estrella.





**Figura 4.-** Zona de Desborde en Misión Las Vertientes, Campaña enero 2014.

En el Río Pilcomayo las inundaciones o desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. Este río posee un cauce de tipo “colgado”, sus llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes. Al sobrepasarse el nivel de las márgenes durante las crecidas; el agua escurre por la llanura de inundación con velocidades bajas, al retirarse el agua, ya sea porque regresa al río, sigue su camino aguas abajo o después de unas semanas se infiltra y evapora, queda depositado sobre el suelo sedimento muy fino, a este proceso se lo conoce como enlame. El enlame trae como consecuencias la elevación de la cota de llanura de inundación.



**Figura 5.-** Esquema de cauce “colgado” y del proceso de formación.

Las problemáticas más comunes consecuencia de los desbordes son: inundaciones con importantes pérdidas materiales, anegamiento de zonas por largos periodos de tiempo, aislamiento de poblaciones y evacuaciones regulares, pérdida de terreno porque el río erosiona las márgenes, perdidas de suelo por enlame o deposición de finos que perjudica el crecimiento de alimentos y el pastoreo del ganado. Por tal motivo es de interés caracterizar estos eventos, determinar el área de la mancha de inundación, su longitud, su tiempo de permanencia, velocidad de avance y de evacuación por la importancia que representa para las comunidades.

## 1.1. Objetivos

Como objetivo principal de esta tesis se plantea el estudio de los desbordes del Río Pilcomayo, esto comprende determinar las áreas afectadas y su velocidad de avance, caudales para los que se activan los desbordes, así como estimar el volumen de agua que pierde el sistema entre Villamontes y Misión la Paz y encontrar una forma simplificada del hidrograma de pérdidas.

A los fines de cumplir con el objetivo general mencionado anteriormente, se detallan los siguientes objetivos particulares:

- Determinar los hidrogramas en Villamontes y Misión La Paz a partir de las lecturas de escalas en estas estaciones y aforos.
- Determinar caudales que activan los desbordes utilizando diferentes metodologías que garanticen la fiabilidad de los resultados: análisis de probabilidad de excedencia y estudio de hidrogramas de forma conjunta con imágenes satelitales.
- Cuantificar caudales y volúmenes distribuidos a cada país por los desbordes.
- Proponer una metodología de análisis de crecidas. En esta tesis se aplica a la crecida del año 2013.

Como complemento se aplicaron modelos matemáticos, hidrodinámico e hidrológicos, que permiten comparar los resultados obtenidos por otras metodologías.

## 1.2. Metodología

### 1.2.1. Revisión de Antecedentes

A partir de la lectura de diversa bibliografía, se realizó un compendio en lo que se refiere a aspectos fundamentales para la comprensión del comportamiento del Río Pilcomayo, reconocido por su unicidad en el mundo. Además, se hace énfasis en la información que sirve como punto de partida para los estudios presentados en esta tesis.

### 1.2.2. Determinación de Hidrogramas

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 poseen 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 (OTT 2008). 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 (Capítulos 3 y 4). 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 alcanza 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.

#### 1.2.2.1. Curvas Intensidad – Duración – Recurrencia

Fue necesario realizar estas curvas para tener una noción clara de los periodos de retorno de los diferentes caudales durante la crecida. Esta información es de mucha utilidad, ya que permite encuadrar las crecidas en relación con su magnitud.

#### 1.2.3. Determinación de caudales que activan los desbordes por Imágenes Satelitales

##### 1.2.3.1. Análisis de probabilidad de excedencia

A partir de la serie de caudales obtenidos en Villamontes y Misión La Paz se ordena la información de cada serie de acuerdo a su probabilidad de excedencia o periodo de retorno. Se grafican ambas curvas y la comparación permite observar saltos en la diferencia de caudales que implican pérdidas en el sistema, entre ellas la activación de desbordes (Capítulo 4.2).

##### 1.2.3.2. Análisis de imágenes satelitales.

La utilización de sensores remotos permite identificar las manchas de inundación y sus propiedades físicas como son, forma, área de cobertura y longitud. Si se posee más de una imagen para un evento, se puede estimar velocidades medias de avance, y junto a la topografía, volúmenes almacenados (Capítulo 6). Al vincular las imágenes con datos hidrológicos permite estimar los caudales de activación de desbordes. El análisis de imágenes puede considerarse el eje de esta tesis.

##### 1.2.3.3. Modelación Matemática

En esta tesis se utilizan modelos hidráulicos (Capítulo 8.1) e hidrológicos (Capítulo 8.2) unidimensionales para todo el tramo comprendido entre Villamontes y Misión la Paz. Estas herramientas numéricas presentan fuertes limitaciones a la hora de predecir el comportamiento de este río con alta movilidad en las 3 dimensiones y alta carga de sedimentos. Sin embargo, sí nos ofrecen información cualitativa de gran importancia, una estimación del hidrograma de desbordes e incluso en el caso hidrodinámico valores de velocidad y tirantes con cierta precisión para ser utilizados posteriormente como datos de entrada en estudios a mayor escala

#### 1.2.4. Campañas y Aforos

Una parte fundamental del desarrollo del trabajo está relacionado con las tres campañas que se realizaron (Capítulo ANEXO - II. ). Estas campañas permitieron reconocer las zonas de desbordes, los procesos de erosión de márgenes, movilidad del lecho, sedimentación y enlame, cambios del paisaje y las defensas que muchas localidades han construido. También se realizaron aforos y se verificaron las técnicas y metodologías que se emplean, esto nos permitió sugerir modificaciones enriquecedoras para la base de datos. También se pudo observar y registrar una crecida, fundamental para comprender este río, así como ver las consecuencias de las mismas para la población que se observa en aislamiento de

poblaciones, cortes de acceso y en algunos casos evacuación. En definitiva, se recorrió desde la zona de embocadura hasta aguas arriba de Villamontes, en tres oportunidades y con objetivos diferentes y complementarios que fortalecen cualquier enfoque desde la teoría o análisis de datos que se pueda aportar desde el trabajo en gabinete.

El conjunto de estas metodologías permitirán arribar a un método para el análisis de crecidas y desbordes del Río Pilcomayo (Capítulo 10), que podrá ser replicado año a año contribuyendo a la constitución de una base de datos sólida y consistente.

## **2. Revisión de Antecedentes**

El Río Pilcomayo nace y forma la red fluvial de su cuenca activa casi totalmente en la república de Bolivia. En esta región de la cuenca alta se produce casi la totalidad de las lluvias que forman la parte más significativa de los caudales de su curso principal. No existen caudales por deshielo en este río (Lagranja 2001).

Las características climáticas de la cuenca del Río Pilcomayo se encuentran dominadas por los efectos topográficos de la Cordillera de los Andes. Ya que limita los efectos del Pacífico y modifica la circulación general de los vientos tropicales y subtropicales en altura.

El año hidrológico para el Río Pilcomayo ha sido establecido desde el 1 de agosto al 30 de julio. Las precipitaciones pluviales en la cuenca alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90 % de la que precipita durante todo el año, repartiéndose el 10 % restante en los ocho meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial. (Pool y Van Duijne 1996)

Las precipitaciones medias anuales para el mes de enero varían entre 100 mm y 170 mm. Los valores más bajos se registran entre Misión La Paz y la zona dónde ya no existe el cauce del Río Pilcomayo (aguas abajo del bañado la Estrella). En julio la precipitación media mensual es muy baja, en la cuenca alta no se superan los 5 mm y aguas abajo del Bañado La Estrella se encuentran valores entre 15 mm y 45 mm. Si observamos la precipitación acumulada anual hay un gradiente positivo de Oeste a Este, con valores desde 250 mm a 1400 mm anuales.

### **2.1. Abanico aluvial**

Los frecuentes cambios laterales del cauce y la gran disponibilidad de sedimentos sueltos en la cuenca alta han generado el abanico aluvial más grande de América del Sur en el cuaternario, aún activo. Abarca un área de Bolivia, la parte Noreste del sector Argentino de la provincia de Formosa y gran parte del Chaco Paraguayo. Este abanico aluvial tiene un área de 210.000 km<sup>2</sup>, caracterizada por una gran cantidad de cauces abandonados con una típica forma triangular. Su ápice se encuentra en el flanco oriental de las sierras subandinas en Bolivia, próximo a la localidad de Villamontes; la zona distal abarca un ancho de 700 km en Argentina y Paraguay. Los cauces abandonados muestran un relleno sedimentario de arena fina limosa con un relieve interno del orden de 1 m, sin arcillas ni sedimentos gruesos. La Figura 6 muestra las principales características geológicas del abanico aluvial del Río Pilcomayo.

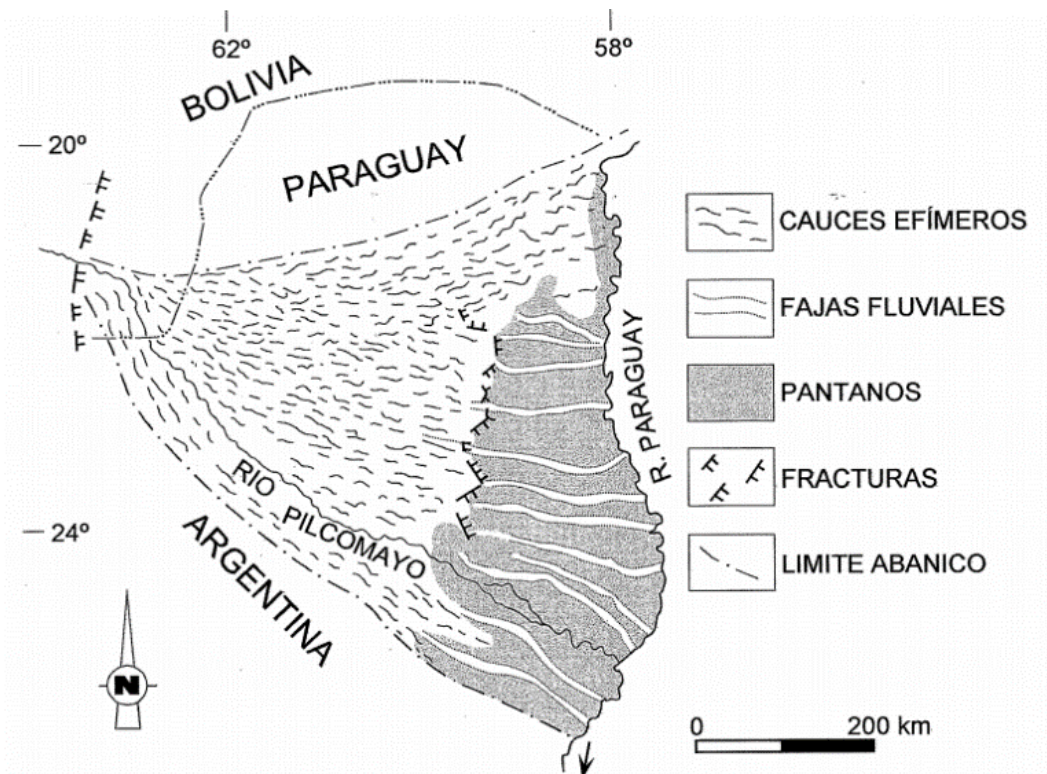


Figura 6.- Características Principales del abanico aluvial del Pilcomayo (Iriondo, Colombo y Kröhling 2000).

Algunos de los cauces abandonados transportan caudales de desborde considerables en la estación húmeda, cuyos sedimentos van rellenándolos. Durante los últimos siglos, el Río Pilcomayo desembocó en una depresión de origen tectónico con unos 15.000 km<sup>2</sup> de extensión desarrollada en la frontera argentino-paraguaya, situada a unos 250 km de distancia del río Paraguay y denominada "Estero Patiño". El mecanismo de acumulación sedimentaria en el Estero Patiño consistía en la generación de diques compuestos por fragmentos vegetales (ramas y hojarasca) durante las crecidas. Esos diques actuaban como eficaces trampas para los sedimentos que se acumulaban en esas áreas, generando un tapón importante y por tanto determinando la migración del cauce funcional. En 1980 el Estero Patiño acabó por rellenarse completamente y dejó de ser funcional como trampa de sedimentos. Así se produjo una colmatación progresiva del segmento inferior del cauce activo con arenas finas y limos de manera que este se fue acortando aguas arriba hacia las cabeceras. El Río Pilcomayo empezó un proceso de avulsión generalizada. Este proceso condiciona el retroceso aguas arriba del punto de desbordamiento en crecientes sucesivas (Iriondo, Colombo y Kröhling 2000).



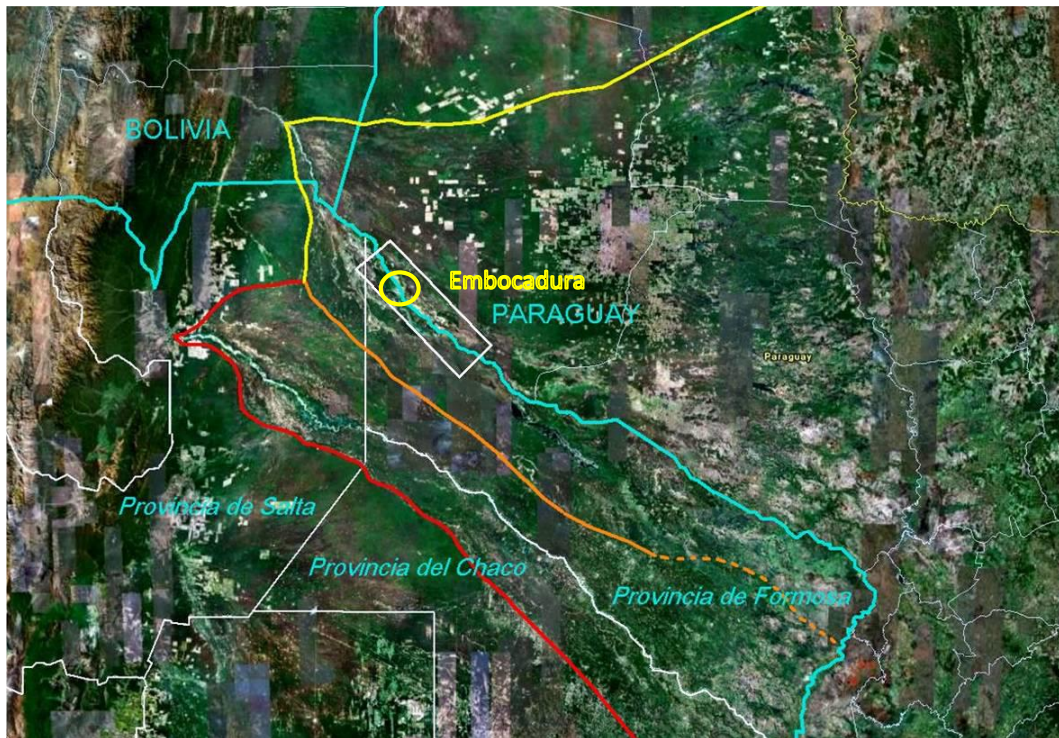


Figura 7.- Ubicación de la zona de Embocadura dentro del abanico fluvial (Halcrow 2010).

El ritmo de retroceso es muy elevado rondando los 10 km por año. Este retroceso se ha detenido desde la implementación de obras de distribución de caudales, como la obra *El Pantalón* construido en 1991 o el *Sistema Embocadura* (Figura 7) a partir de la construcción del actual *Canal Paraguayo* en 1999. La Figura 8 esquematiza los retrocesos del cauce del Río Pilcomayo, según Halcrow (2010).

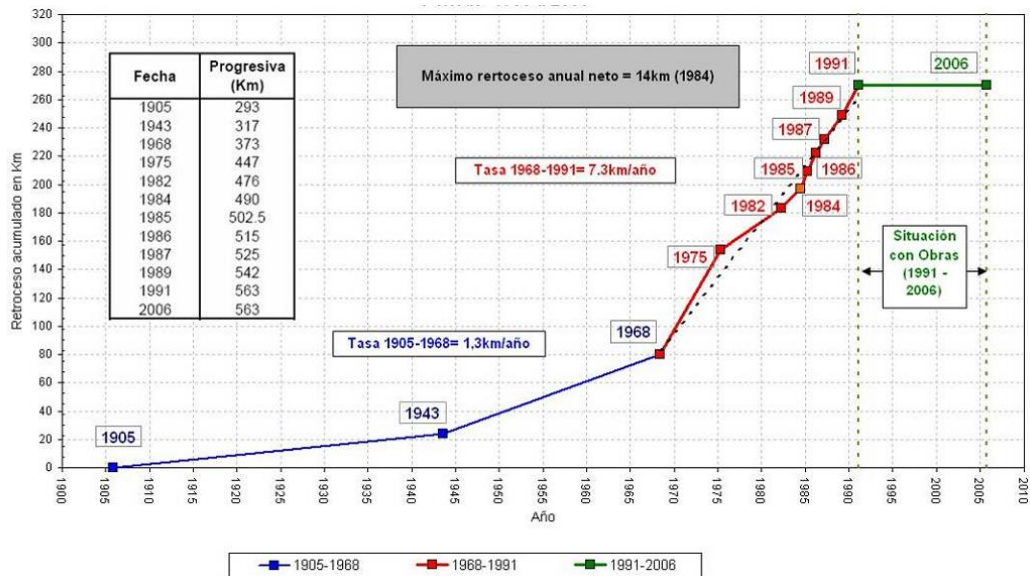


Figura 8.-Retroceso del Río Pilcomayo entre 1905 y 2006, (Halcrow 2010).

Kopaliani y Georgievsky (1993) presentan otros valores para el retroceso del cauce, que se presentan en la Figura 9 y se comparan con los datos por Halcrow (2010) en la Figura 10. En su trabajo aseguran que, consecuencia del funcionamiento conjunto de los canales experimentales argentino y paraguayo, ubicados a 150 km aguas debajo de los actuales, en el período entre 1977 y 1983 se detuvo el avance del frente del cauce seco.

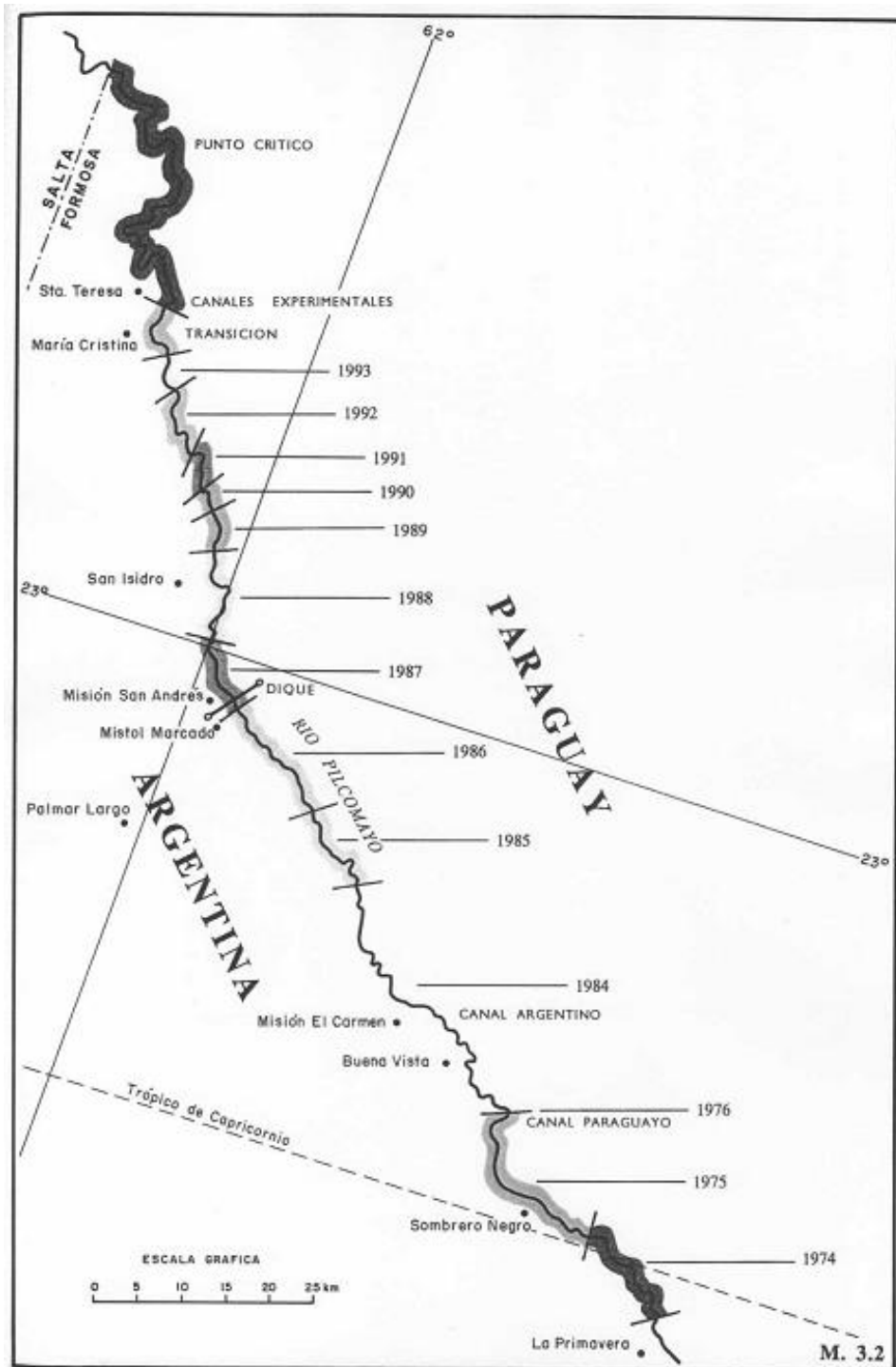
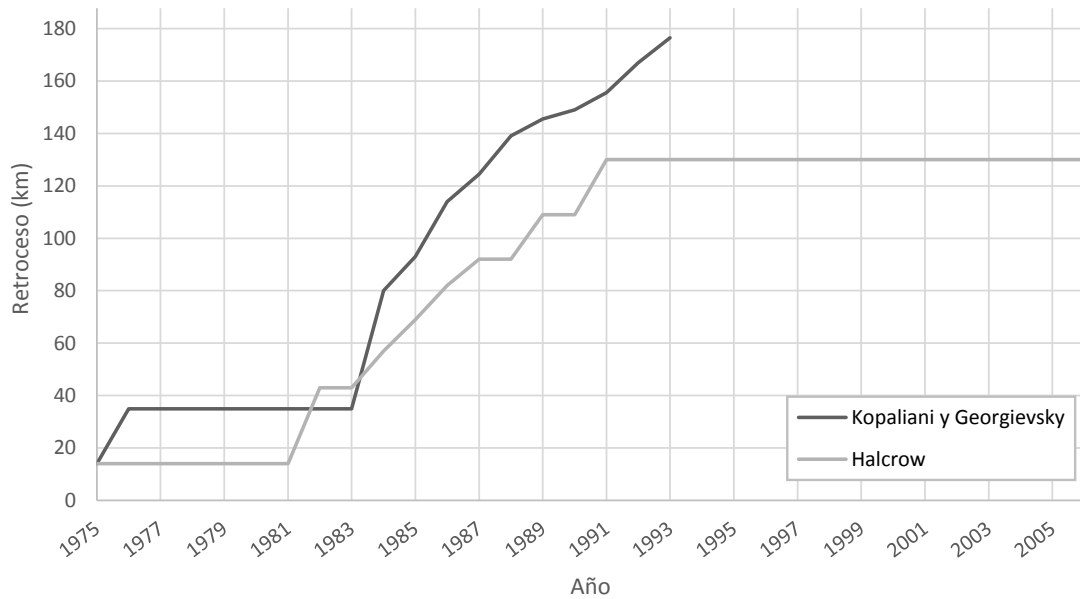


Figura 9.- Mapa del Retroceso del Cauce del Río Pilcomayo, 1974- 1993 (Kopaliani y Georgievsky 1993).





**Figura 10.-** Retroceso del Río Pilcomayo desde 1975 (Kopaliani y Georgievsky 1993) (Halcrow 2010).

## 2.2. Fluviomorfología

El río puede ser considerado como estable desde su origen hasta alrededor de Villamontes debido a que los sedimentos son gruesos e incluso hasta Ibibobo, más aguas abajo, a pesar de encontrarse sedimentos arenosos más finos. Aguas abajo de Ibibobo hasta Santa María (Fortín D'Orbigny), en una extensión aproximada de 60 km, el lecho es trenzado y mucho más ancho que en los tramos aguas arriba. Durante las crecidas, es una zona de desborde en la que podría iniciarse un desvío total o parcial del Río Pilcomayo y por consiguiente es una zona crítica. Desde Santa María aparecen meandros, pero el río es siempre bien marcado hasta la estancia La Dorada donde el lecho va desapareciendo tapado con la masa de sedimentos que vienen de aguas arriba. Aguas abajo de La Dorada se presenta una zona de expansión de las aguas durante las crecidas con deposición de sedimentos finos y formación de un «delta interior» con lechos secundarios muy inestables. Esta zona se prolonga hasta Salto Palmar donde en su parte de arriba se llama «Estero Patiño». La Dorada está cerca de la zona donde, al inicio del siglo XX, serían disociados los Ríos Pilcomayo y Montelindo.

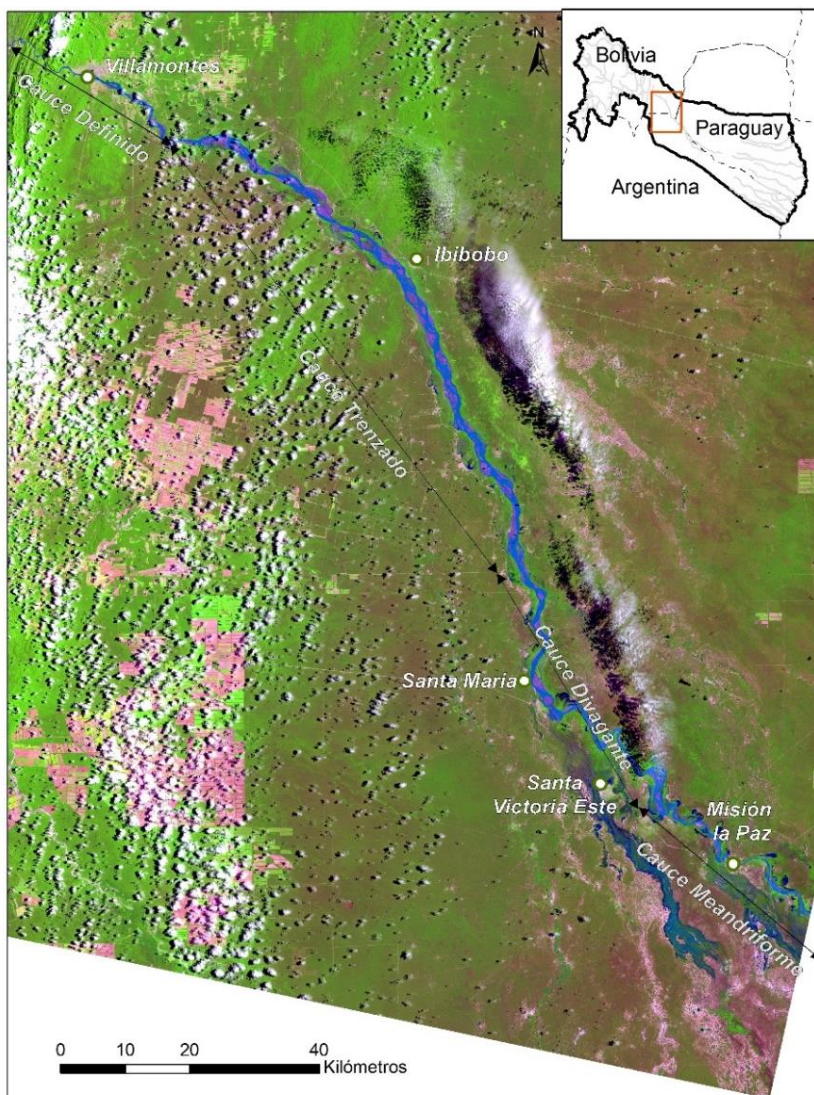
No parece que haya existido en el pasado histórico reciente una solución de continuidad del río a ambas partes del Salto Palmar. De hecho, la zona aguas abajo que tiene una longitud aproximada de 240 km hasta el Río Paraguay es abastecida, por una parte, de una manera difusa desde el Estero Patiño (es también la fuente de abastecimiento de los Ríos Confuso, Negro, Aguaray, Guazú, etc.) y por otra parte, desde su propio impluvio. (Jack Klzobzi, Ramette y Roquero 1997)

**Tabla 4.- Aportes de Caudales sólidos, líquidos y tasa de erosión (Jack Klzobzi, Ramette y Roquero 1997)**

ESTACIONES	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )	APORTE LIQUIDO 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /a	APORTE SÓLIDO 10 <sup>6</sup> tn/a	CONCEN-TRACIÓN kg/m <sup>3</sup>	TASA DE EROSIÓN tn/km <sup>2</sup> /a
Fortín Pilcomayo	100.000	4.960	69	14	690
La Paz	96.000	5.330	98,5	18,5	1.030
Villamontes	82.000	5.330*	100*	19*	1.200*
Viña Quemada	13.200	1.720	35	20,5	2.650
Talula	6.400	?	14,5	?	2.300

\* aproximación

Se compararon imágenes satelitales del periodo 1999-2014 y se determinaron los tipos de cauces que se muestran en la Figura 11, lo concluido se corresponde con lo que presenta Cafaro (2010).



**Figura 11.- Tipos de cauce en el tramo de Villamontes a Misión La Paz. Imagen Landsat 25/01/2014.**

Analizando el tipo de erraticidad tanto de la planicie de inundación como del valle del río, Kopaliani y Georgievsky (1993) deducen que son asimilables a tipos de procesos fluviales comunes a los valles montañosos amplios o a las zonas de transición entre las zonas

montañosas, zonas precordilleranas y la llanura. En el fondo de los valles de los ríos se identifican tres elementos característicos del relieve: planicie de inundación, cauce de creciente y cauce de bajante. Una propiedad característica del valle de inundación lo constituye la presencia de vegetación cuya estabilidad está condicionada por la estabilidad del substrato (suelo) que cubre el valle, la cual depende del régimen de escurrimiento del agua y de la distribución del flujo en el cauce de creciente. El tramo entre Villamontes y la frontera con Argentina, puede ser asociado al de salidas de montaña a la llanura, mediante un amplio valle, con la particularidad de que el cauce en la estación de aforos Misión La Paz carece prácticamente de valle de inundación, situación atípica en el Río Pilcomayo.

La cuenca Chaqueña del Río Pilcomayo o cuenca baja y subdivida en la cuenca del *Pilcomayo Superior e Inferior*, se puede dividir en cuatro zonas, aguas abajo desde Ibibobo:

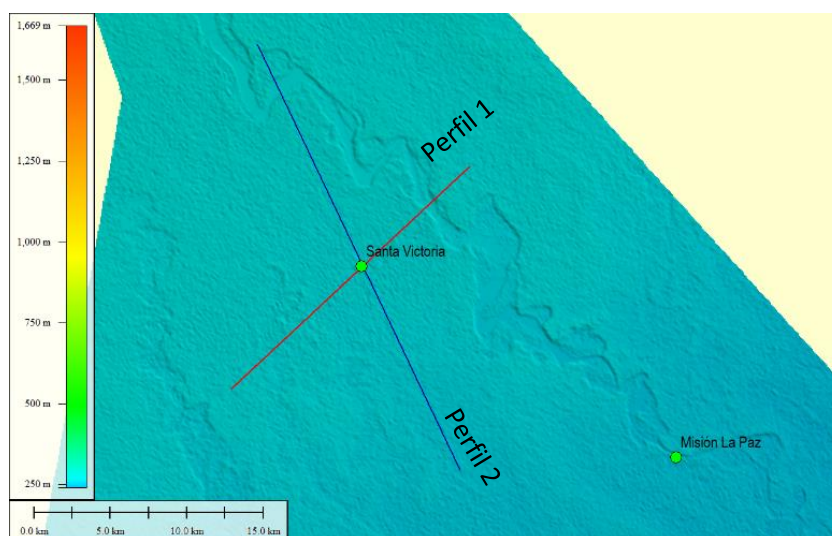
### 2.3. Naturaleza del lecho y márgenes

El río tiene en su curso meandriforme un lecho muy inestable, compuesto de arena fina. El río está bordeado en el tramo de desbordes de orillas sobrealzados (albardones) compuestas de arena muy fina y limo. En las llanuras de inundación (esteros y bañados) se deposita limo y arcilla. El cauce colmatado dentro y a nivel de sus albardones asoma entonces por encima de los aledaños, que está por encima del nivel del terreno natural adyacente. (Pool y Van Duijne 1996)

### 2.4. Cauce de tipo "Colgado"

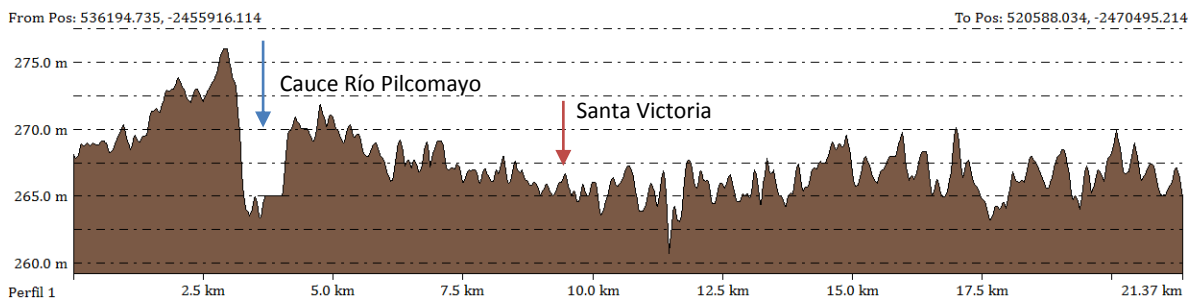
Se ha comentado que el Río Pilcomayo tiene un cauce de tipo "colgado", es decir su llanura de inundación tiene cota inferior a las de sus márgenes. Esta característica es una de las condiciones necesarias para que haya riesgo de avulsión.

A partir de un DEM de SRTM se han extraído dos perfiles topográficos con el objetivo de observar esta característica.

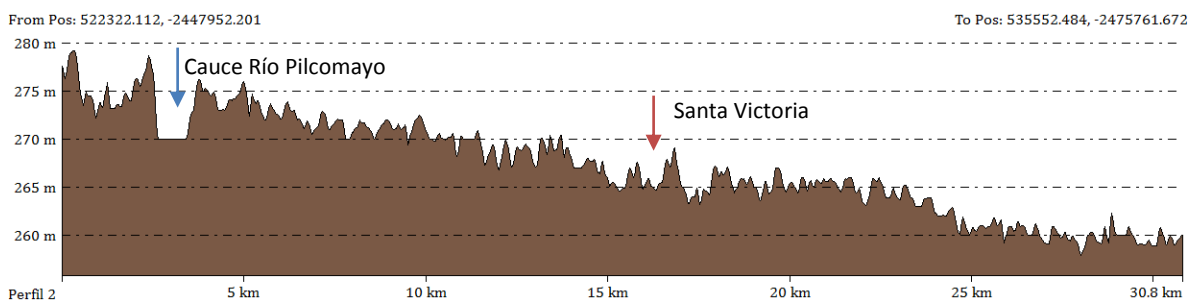


**Figura 12.-** Imagen SRTM de zonas próximas a Santa Victoria. Se identifican dos perfiles Transversales.  
Fuente: Elaboración Propia

El Perfil 1 tiene dirección Noroeste-Sureste y pasa por la localidad de Santa Victoria, se observa en la Figura 13 que las márgenes del río están por encima de la llanura de inundación.



El Perfil 2 con dirección Noroeste-Sureste pasa por el cauce del río en las cercanías del desborde El Chañaral y en la dirección de dicho desborde, pasando también por la localidad de Santa Victoria, se puede observar en la Figura 14 la pendiente en bajante hacia la llanura de inundación, con las márgenes del río nuevamente por encima de la llanura adyacente.



## 2.5. Puntos críticos

Se distinguen dos sistemas de delta correspondientes a diferentes épocas geológicas. El primer delta (superior) se extiende desde Ibibobo en Bolivia hasta Santa María en la Argentina, casi en el límite con Bolivia. El segundo delta (inferior) a su vez comienza en la zona de Santa María, extendiéndose hasta la desembocadura en el río Paraguay, constituyendo la continuación del primero.

También se han identificado dos puntos singulares del cauce, ubicados en la región del segundo delta: uno en Santa María, y el otro a 30 km del actual canal argentino. Se supone que a medida que avance el atarquinamiento y el desplazamiento del lecho seco hasta los puntos mencionados, es posible que ocurran cambios bruscos en la dirección del cauce del Río Pilcomayo y, como consecuencia de ello, se produzca una invasión del agua más allá de los límites del actual valle de inundación en territorio argentino, desde Santa María, o en territorio paraguayo, a 30 km del actual canal argentino (Kopaliani y Georgievsky 1993).

En la Figura 15 se muestra uno de los dos mapas rescatado del informe de Cafaro (2010). En el mismo se muestra para las cercanías de la zona de Embocadura, además de las zonas



de escurrimiento y detención, los posibles puntos de avulsión y su grado de evolución referido a las posibilidades de avulsión.

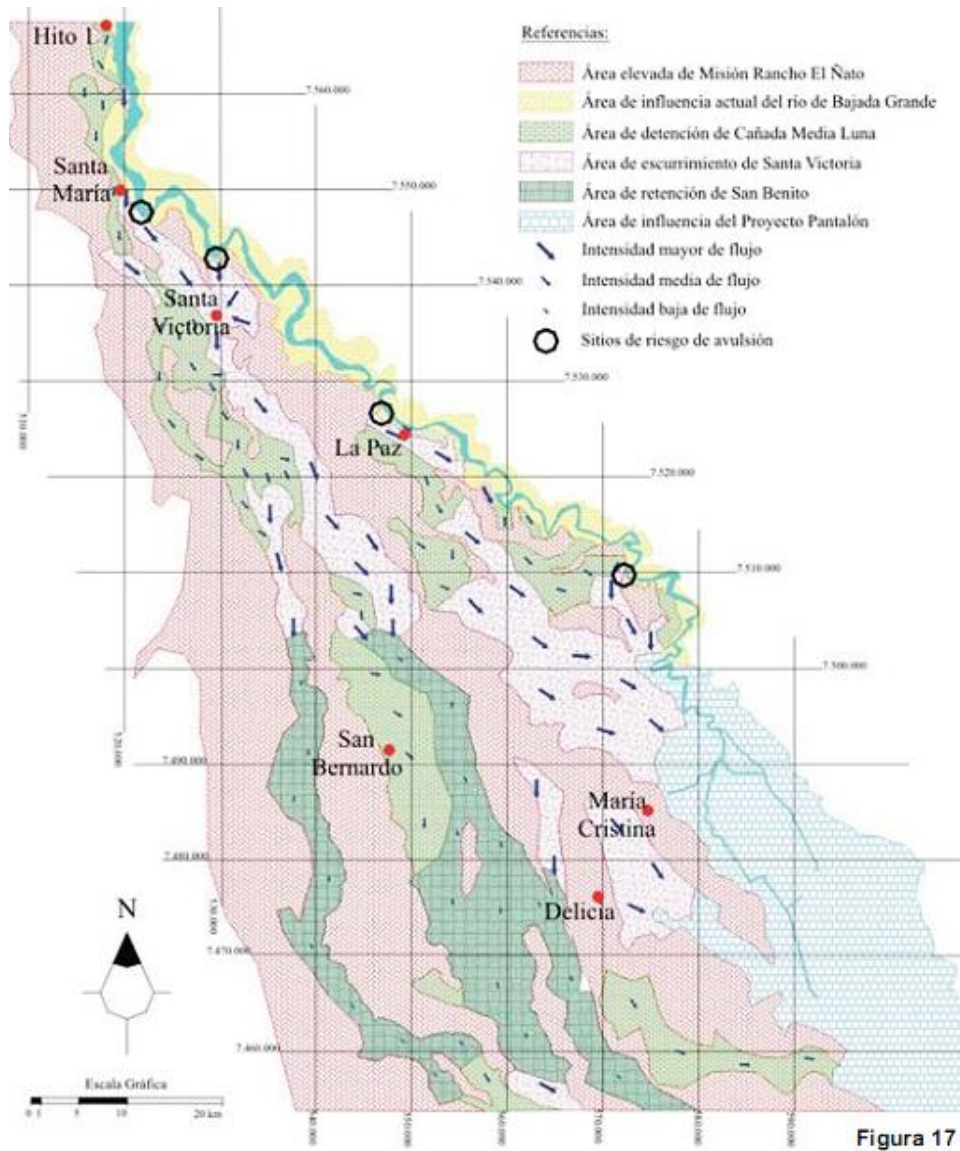


Figura 15.- Mapa de puntos críticos y de escurrimientos (E. D. Cafaro 2010).

Los autores afirman que es necesario advertir que la determinación del grado de criticidad de los puntos señalados en el Río Pilcomayo requiere un profundo estudio y análisis, sobre todo basado en datos topográficos, dado que el problema a resolver es la interacción de los efectos de diversos fenómenos de naturaleza geológica y de los actuales procesos de dinámica fluvial. Ciertamente el cambio de dirección del curso del río en los puntos críticos N° 1 y N° 2 pueden ser anticipados y artificialmente controlados mediante obras hidráulicas de bajo costo (Kopaliani y Georgievsky 1993).

## 2.6. Retroceso del Cauce Río Pilcomayo

Una gran particularidad del Río Pilcomayo incluye la problemática del retroceso y divagación de su cauce, que se refiere, en términos generales, al progresivo taponamiento de su curso que, desde comienzos del siglo pasado a la actualidad, ha retrocedido en términos netos aproximadamente 290 km causando serios trastornos con relación al

reparto equitativo del recurso hídrico entre los dos países de la cuenca baja Argentina y Paraguay. Pocos kilómetros aguas abajo del ingreso a la provincia de Formosa, en Argentina, el Río Pilcomayo con su alta carga de sedimentos, no tiene suficiente energía para socavar y mantener un cauce estable, produciéndose sedimentaciones recurrentes que han segado el cauce original, forzando a las aguas a desbordar en forma de manto (Halcrow y Serman 2007). No obstante, el fenómeno es aún más complejo, ya que el taponamiento en sí no se debe originariamente a las arenas que lleva el río, sino al biocestrón depositado en forma de enormes cantidades de troncos de alisos, arboles conocidos también como palo bobo, que posibilita la formación de una malla o trabazón sobre la que, a su vez, se depositarán las arenas (Cordini 1947). Esta especie (*Tessaria integrifolia*), no fija mayormente los materiales sueltos de las márgenes por las características de sus raíces, que no llegan a compactar el suelo. En la zona de taponamiento es común observar que los troncos forman un verdadero enrejado. Otras veces se los ve en montones dentro del curso del río. En ambos casos también son frecuentes los troncos de *Gourliea* (chañar), *Pithecollobium* (palo flojo) y *Sapium* (lecherón).

Como consecuencia de este retroceso se produce un avance de otros problemas hidrológicos en dirección de aguas arriba. Se observa una distorsión en el abastecimiento de agua en la región y sus consecuencias para el medio ambiente. También se observa un proceso de desertificación aguas abajo del taponamiento. Al retroceder el cauce principal se produce un retroceso contemporáneo de la zona de divagación, ésta incluye la zona donde las aguas desbordan y la zona donde las aguas entran en los bañados. La salinización es otro problema que acompaña el retroceso de la zona de divagación. La geohidrología de la zona muestra que el nivel de aguas salobres se ubica muy cerca de la superficie. La crecida anual en la zona tiene un mayor efecto en la zona de aguas abajo del taponamiento, en una región confinada por bañados y esteros, los cuales reciben sus aguas de la crecida y también, más hacia aguas abajo, por la infiltración de las aguas y la nueva aparición de cauces en forma de cañadas, en función de la topografía existente. La cuantificación de los daños en relación con la densidad de la población, y sus modos de vivir, la agricultura, la pesca, la explotación forestal y la cría de ganado vacuno, no está bien definida. El desarrollo de la zona depende mucho del alcance, en dirección aguas abajo, de las aguas de la crecida (M. Pool 1994).

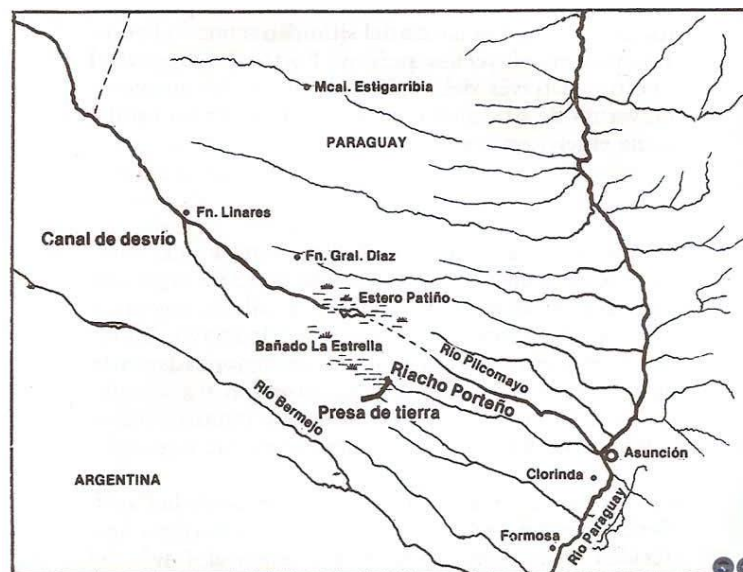
## 2.7. Desbordes

El Río Pilcomayo desborda todos los años como consecuencia de las crecidas cuyo caudal supera la capacidad de encauzamiento del río. Los desbordes ocurren aguas abajo de Villamontes cuando el río entra en su cuenca baja, en lo que se ha denominado Pilcomayo Superior. Las aguas de desbordes son importantes para la alimentación de bañados, recarga de acuíferos y el sector agropecuario, pero perjudiciales para las poblaciones que sufren inundaciones con las consecuentes pérdidas materiales, aislamiento debido a la rotura de infraestructura vial o anegamiento de los ingresos además de la pérdida de terreno para cultivo por enlame, encharcamiento y erosión de barrancas.



**Figura 16.-** Erosión de Barrancas (Gobierno de la Provincia de Salta 2013)

El cauce del Río Pilcomayo, en su retroceso, no solo es abandonado por otro nuevo, sino y lo que es más importante, es rellenado al igual que su área de influencia, lo que trae aparejado un cambio total en la fisiografía del lugar. Esto hace que numerosos bañados, esteros y lagunas, que existían en una época dada, ya no existan en la actualidad, como el Estero Patiño, seco desde el año 1972.



**Figura 17.-** Mapa que muestra dónde se encontraba el Estero Patiño (Salúm Flecha 1983).

En cuanto a la hidrología, los cambios han sido tan drásticos que, datos de hace pocos años, ya no nos sirven. Así por ejemplo, toda la información de la estación de aforo de Fortín Nuevo Pilcomayo, en seco y abandonada desde 1968, ya no tiene ningún valor actual y solo sirve para correlacionarla con estaciones aguas arriba (Misión La Paz y Villamontes) en los años de su funcionamiento.

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. La causa radica en el volumen extraordinariamente grande de sedimentos que transporta este río y en el idéntico régimen de escurrimiento al de ríos de montaña y precordillera, en el cual resultan característicos los aumentos periódicos y relativamente cortos de nivel de aguas, que escurren con diferentes intensidades. Este tipo de régimen fluvial que se establece en valles totalmente inundados y con pequeñas profundidades, se transforma en el mecanismo determinante del carácter errático del lecho del río, el cual adopta la forma de cauce con múltiples brazos en un valle rocoso (Kopaliani y Georgievsky 1993). También es importante recordar que el río durante la crecida transporta una numerosa cantidad de troncos y material vegetado que son depositados principalmente en la rama descendente del hidrograma.



**Figura 18.-** Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (L. Amarilla 2014)





**Figura 19.-** Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (L. Amarilla 2014)

Los desbordes tienen el comportamiento de surcos de derrame digitado (como dedos de una mano) 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 la llanura de inundación sobre margen derecha (E. D. Cafaro, Evaluación de la información necesaria para el Diagnóstico de una posible zona de avulsión del río Pilcomayo 2007).



**Figura 20.-** Derrame en tapón, aguas relativamente altas, ver la desaparición del cauce (Martín Vide, y otros 2006)

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 sí con distancias que no superan los 20 metros. 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 metros 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 metros.

En la zona distal se produce el depósito 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 (E. D. Cafaro 2007).



**Figura 21.-** Desborde la Gracia (Gobierno de la Provincia de Salta 2013)



**Figura 22.-** Desborde del Río Pilcomayo (Gobierno de la Provincia de Salta 2013)



La Figura 23 y Figura 24 identifican las zonas de desbordes del Río Pilcomayo.

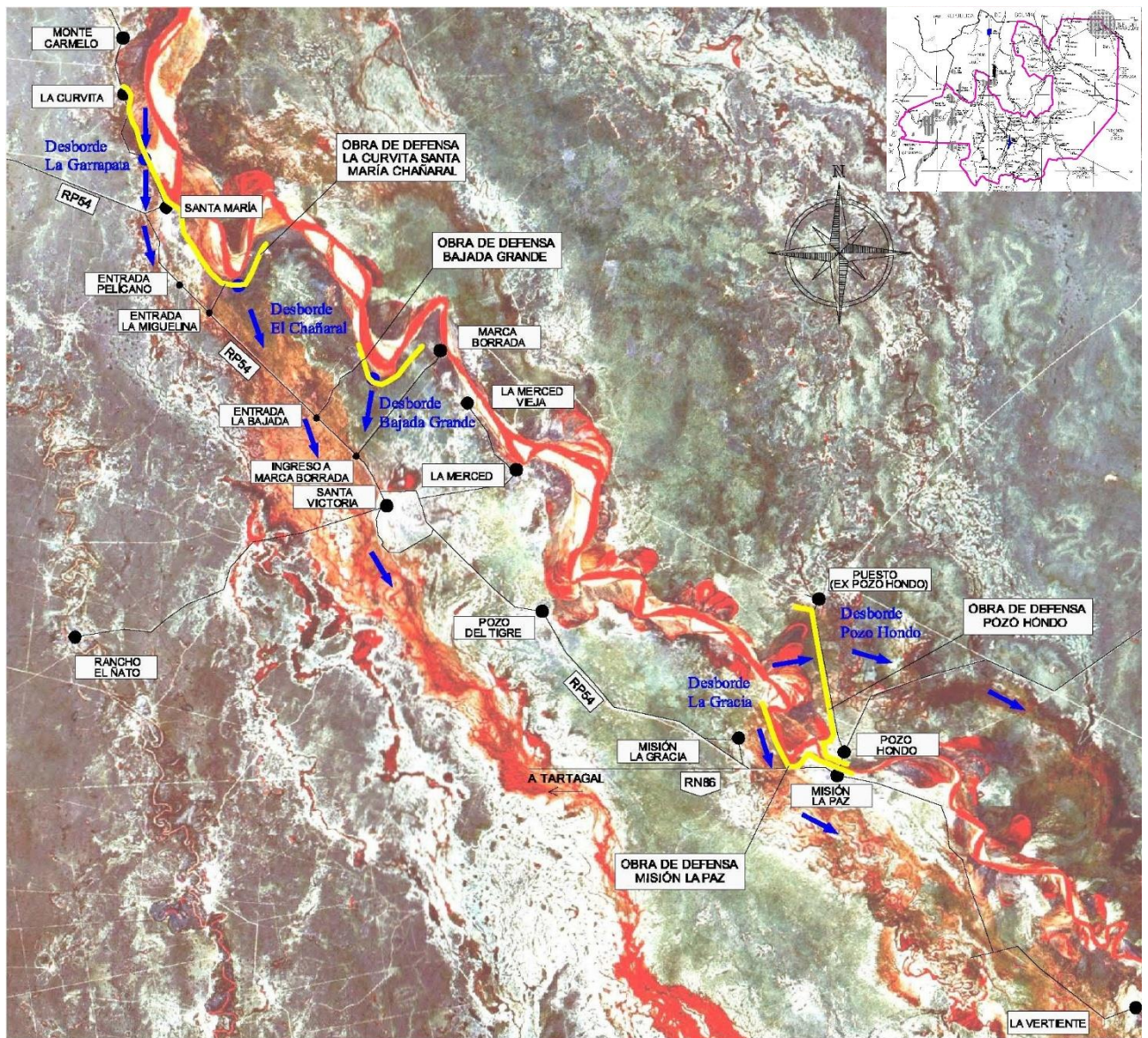


Figura 23.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas arriba de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral 2012).



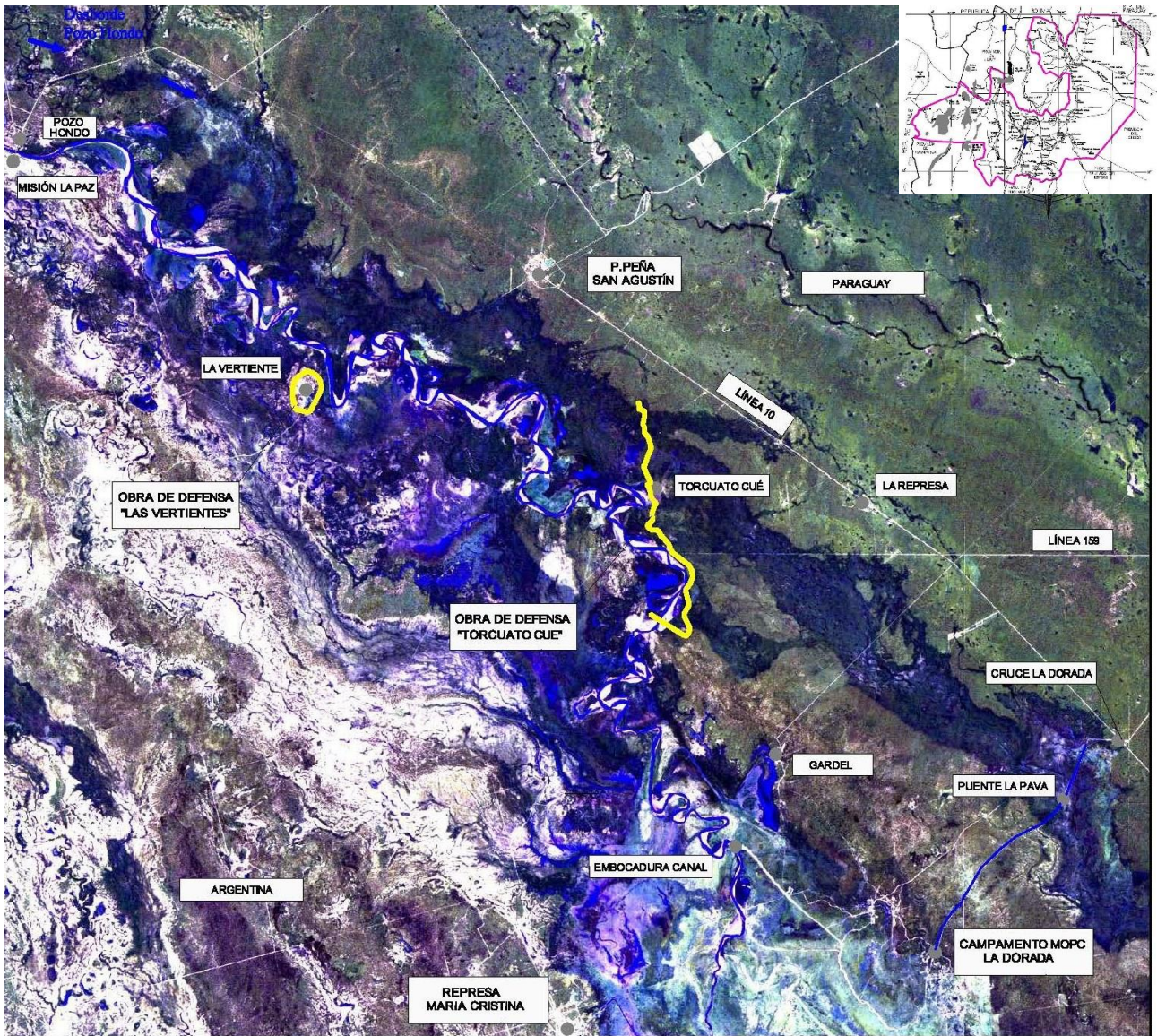


Figura 24.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas debajo de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral 2012).

## 2.8. Avulsión

La avulsión es el proceso natural por el cual el flujo de un río diverge del cauce hacia un nuevo curso permanente en la planicie de inundación adyacente. La avulsión es una de las características principales de las planicies en proceso de sedimentación.

Los geomorfólogos denominan avulsión a la relocalización abrupta de ríos. Además de este efecto inmediato hay otros efectos relacionados: cerca del ápice del cono aluvial resultante, el suelo fértil queda metros enterrado por sedimento nuevo y el drenaje y los canales de irrigación se colmatan. Aguas abajo, luego de que el flujo se ha desprendido de la carga de sedimento, el agua relativamente limpia erosiona nuevos canales y desestabiliza las márgenes. Incluso más lejos aguas abajo, en la costa deltaica, la erosión costera aumenta dramáticamente al cortarse la carga de sedimentos. Aguas arriba del sitio de avulsión, el río se desestabiliza por un quiebre abrupto de la pendiente en el perfil longitudinal o knickpoint. No obstante, la avulsión también trae beneficios, al forzar un

reposicionamiento a gran escala del cauce del río es la mayor causa de humedales y un mecanismo dominante en la generación de planicies de inundación, deltas, conos aluviales y sus depósitos sedimentarios asociados, incluyendo reservorios de agua potable e hidrocarburos.

Los principales componentes de una avulsión son el canal principal, que es aquel cauce estable cuyo flujo divergirá, y un cauce de avulsión que se forma como consecuencia de la avulsión. La avulsión puede ser completa, todo el flujo es transferido desde el cauce principal o parcial, cuando solo se transfiere una parte del flujo. La avulsión completa resulta en un abandono del cauce principal aguas abajo del punto de divergencia, mientras que la avulsión parcial lleva a nuevos canales que coexisten con el cauce principal. La avulsión parcial resulta en canales entrelazados (si los canales son activos y se juntan aguas abajo) y canales distribuidores (si no se juntan), esta última es una característica de los conos de avulsión y deltas (Figura 25).

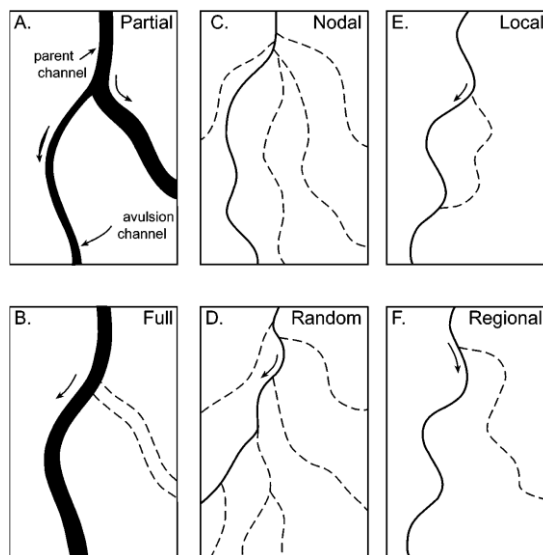


Figura 25.- Esquemas de tipos de avulsión (Slingerland y Smith 2004).

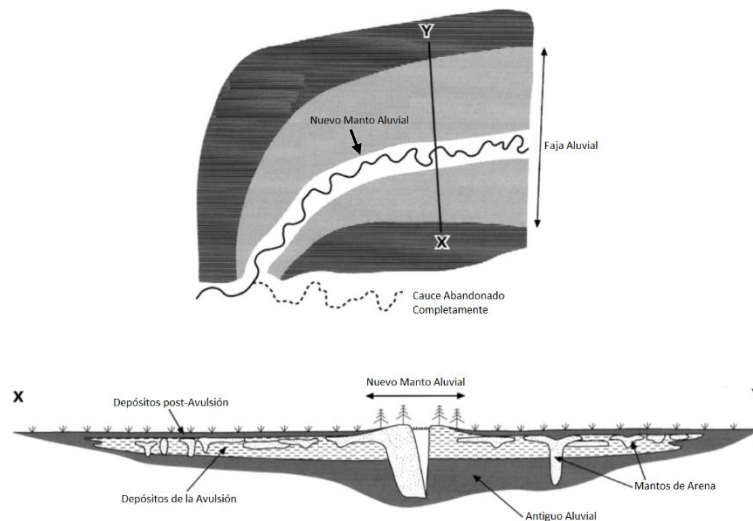
Clasificaciones adicionales para distinguir el comportamiento de la avulsión incluyen: nodal versus aleatoria y local versus regional. Las avulsiones nodales son eventos recurrentes que ocurren en una misma zona, mientras que las aleatorias pueden ocurrir en cualquier parte dentro del cauce activo. Una avulsión local es la que se une al cauce principal aguas abajo, la avulsión regional ocurre a mayor escala y afecta la localización del cauce en cualquier lugar aguas abajo. Las avulsiones son generalmente jerárquicas, por ejemplo, una divergencia aguas arriba, total o parcial, puede desarrollar un nuevo sistema de canales que presenta variadas avulsiones, más pequeñas, mientras evoluciona. Las avulsiones pueden ser abruptas o graduales, estas últimas pueden llevar siglos para completarse.

La avulsión es una de las características principales de las planicies en sedimentación, la frecuencia de avulsión varía ampliamente desde 28 años (Río Kosi que corre entre India y Nepal) a 1400 años (Río Misisipi en Estados Unidos). Cualquier evolución del sistema fluvial que lleve a aumentar la capacidad de transporte de sedimentos en una divergencia debe ser una condición necesaria para que ocurra la avulsión. Se piensa que altas tasas



de sedimentación en el canal principal son un proceso clave en este fenómeno. Diversos autores han observado que la frecuencia de avulsión aumenta cuando se eleva la tasa de sedimentación y entre diferentes ríos trezados las frecuencias de avulsión declinan cuando disminuyen las tasas de agradación.

En muchos sistemas fluviales, elevadas tasas de sedimentación están correlacionadas con márgenes del canal aluviales sobreelevadas (alluvial ridges) y canales dominantes (Figura 26). Quizás por esta razón los investigadores se han enfocado en la relación entre pendientes elevadas de superficies de agua en los trasvases de albardones con la pendiente del canal principal como criterio principal para que ocurra la avulsión. Este criterio ha sido expresado de varias maneras: a) diferencia de elevación límite entre albardones y su llanura de inundación adyacente b) una sobreelevación normalizada (por ej. elevación natural de albardones por sobre la llanura de inundación adyacente dividida por la profundidad del canal principal) o c) una pendiente crítica topográfica o de energía desde la sobreelevación aluvial hasta la llanura de inundación, medida como múltiplo de la pendiente del canal o del valle.



**Figura 26.-** Esquema de componentes principales de un sistema con avulsión (Makasse 2000).

Según se explica en (Guccione, Burford y Kendall 1999), el bajo Mississippi ha sufrido avulsiones con cocientes de pendientes en el rango de 3 a 5, consistente con predicciones teóricas. No obstante en algunos casos se han medido relaciones de pendientes con un orden de magnitud mayor y no ha ocurrido avulsión.

Las causas de mayor sedimentación pueden ser: aumento de la carga de sedimentos en relación con la capacidad de transporte, cambio en el caudal pico o descenso del gradiente del canal debido a factores como: aumento de sinuosidad, extensión del delta, disminución del nivel base que impone al río una menor pendiente, levantamiento tectónico aguas abajo, o elevación del nivel base.

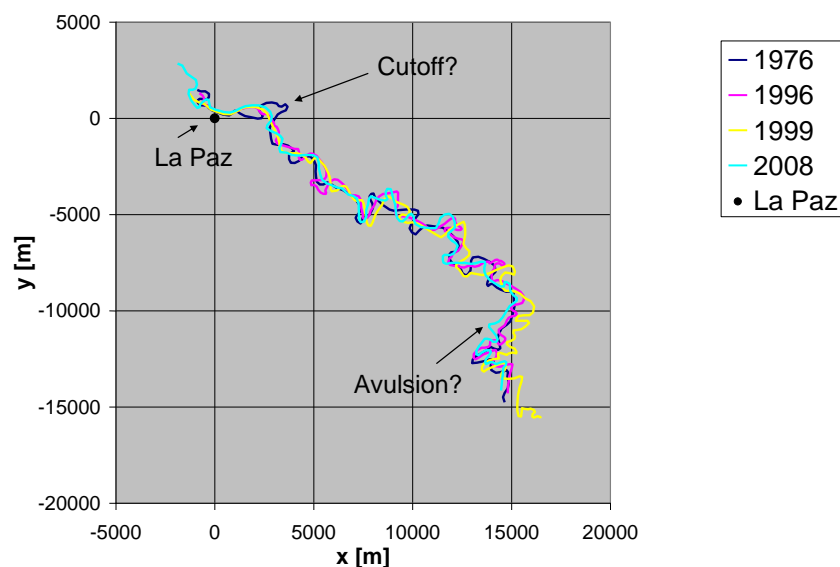
En el caso del Pilcomayo, el retroceso de su cauce, la elevada cantidad de desbordes, la alta tasa de transporte de sedimentos, las bajas pendientes en la cuenca baja, el cauce colgado y los anegamientos obligan a considerar en el análisis del río la posibilidad de una avulsión. Entre las posibles zonas de avulsión sobre el Río Pilcomayo se pueden

contabilizar las zonas de desbordes denominados “El Chañaral”, “La Gracia”, “La Puerta” y “Pozo Hondo”, ya presentados en la Figura 3. La Tabla 5 resume las zonas de Desborde aguas abajo de Misión La Paz y su estado de avulsión.

**Tabla 5.-** Localización de Zonas de Desbordes y Estado de Avulsión (Fariás y Cafaro 2010).

Margen	Coordenadas		Estado de Avulsión
	X	Y	
MD	560036.681	7516602.783	Alto
MD	557198.750	7518801.510	Alto
MD	555982.495	7518917.232	Alto
MI	579806.216	7504046.720	Medio
MI	578247.457	7500941.108	Medio
MD	577406.137	7505132.038	Medio
MI	578299.267	7509481.540	Medio
MD	574982.403	7499611.916	Medio
MD	572053.067	7509119.177	Medio
MD	571898.054	7512113.209	Medio
MD	569572.862	7512577.800	Medio
MD	564664.124	7513094.012	Medio
MD	5775810.857	7506899.465	Baja
MD	5748940.967	7508448.101	Baja
MI	5746180.138	7512536.782	Baja
MI	5662630.205	7517630.523	Baja
MI	5625320.884	7518199.885	Baja
MI	5613930.064	7519700.930	Baja
MI	5594240.281	7521201.975	Baja
MI	5589510.246	7522509.052	Baja
MI	5579510.799	7523676.655	Baja
MI	5570170.219	7526266.683	Baja

La Figura 27 muestra las líneas centrales del río del cauce digitalizadas para caudal de estiaje aguas abajo de Misión La Paz. En la parte de aguas abajo del tramo, el desplazamiento dramático de la línea central del cauce, puede sugerir la ocurrencia de avulsiones o la re-ubicación del thalweg del cauce para caudal de estiaje dentro de la anchura aluvial más amplia (García, y otros 2014).

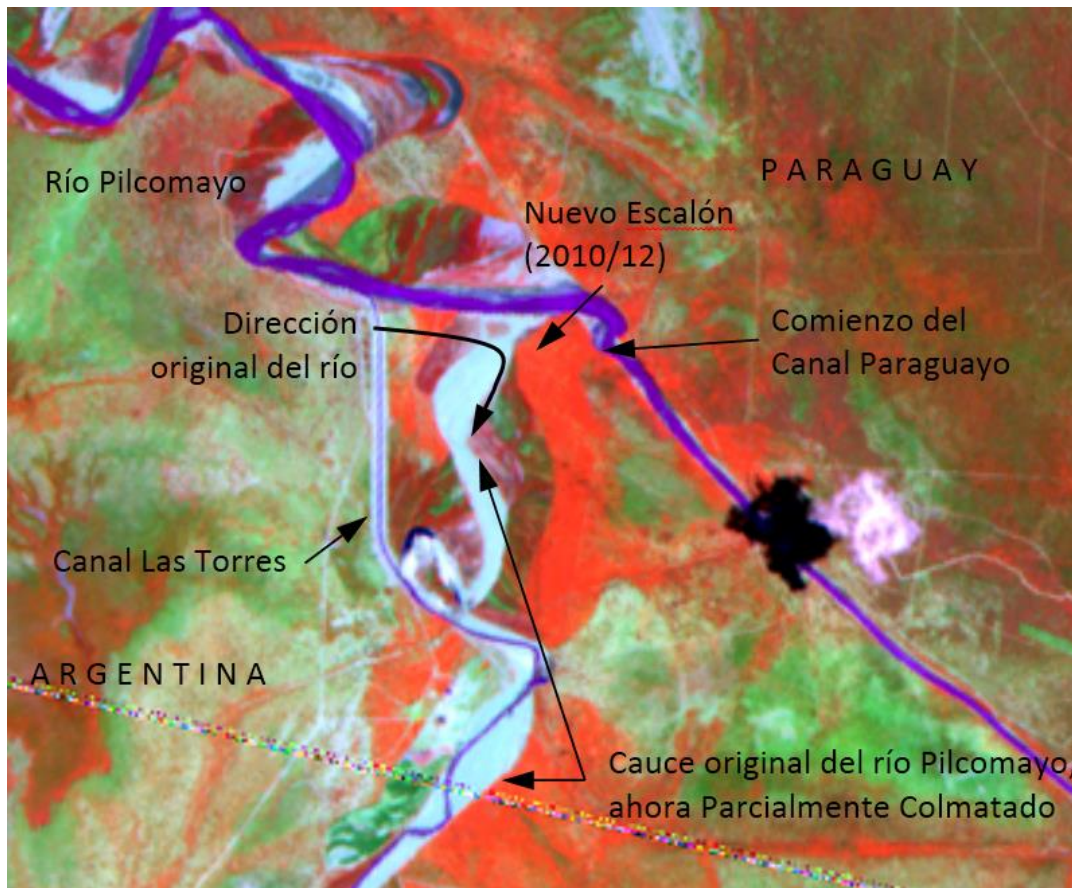


**Figura 27.-** Líneas de centro del cauce en los años 1976, 1996, 1999 y 2008 digitalizadas (García, y otros 2014)

## 2.9. Distribución de aguas entre Argentina y Paraguay

Gran parte del Río Pilcomayo fluye entre el límite de Argentina y Paraguay, lo que ha llevado a estos países a suscribir acuerdos binacionales para su gestión, como la Comisión Binacional creada en el año 1998. En dichos acuerdos se estipula la coordinación de acciones para lograr el uso equitativo del recurso, es decir, que cada país pueda aprovechar la mitad del caudal de agua. La materialización en el cauce de las acciones tendientes a cumplir con estos convenios se encuentra ubicada a unos 25 km aguas abajo de la entrada del río a la provincia argentina de Formosa a los 22.661621° de Latitud (S), 62.199912 ° de Longitud (O) en una zona llamada Embocadura.

Este sistema partididor de caudales, está compuesto principalmente por un canal que toma el agua del río a territorio paraguayo, mientras que el agua que continúa por el río, por otras obras de canalización entra en territorio argentino.



**Figura 28.-** Vista de la zona de Embocadura. Satélite IRS, fecha 14/11/12 (Baldissoni 2013).

A pesar de los esfuerzos de mantenimiento en ambos cauces (canal paraguayo y Río Pilcomayo), la inestabilidad geomorfológica inherente al sistema y las condiciones hidráulicas operantes en el mismo han ido favoreciendo una mayor entrada de caudales a territorio paraguayo. A partir de julio de 2010 la entrada de agua a territorio argentino por el río comenzó a producirse de manera intermitente, ocurriendo sólo en temporadas de aguas medias y altas. Las altas tasas de transporte de sedimentos y material vegetal flotante durante las crecidas generaron una tendencia a la sedimentación del tramo de cauce del río aguas abajo de la embocadura del canal paraguayo. Este proceso continuó



hasta mayo de 2012 de manera tal que el fondo del cauce quedó de dos a tres metros por encima del cauce anterior del río, generando un “escalón” por el cual los caudales bajos y medios no pueden pasar hacia territorio argentino (Zambón, 2012). Desde entonces el tramo del Pilcomayo aguas abajo del canal Paraguayo recibe agua sólo en temporadas de crecidas y actualmente se encuentra parcialmente colmatado (Baldissone 2013).

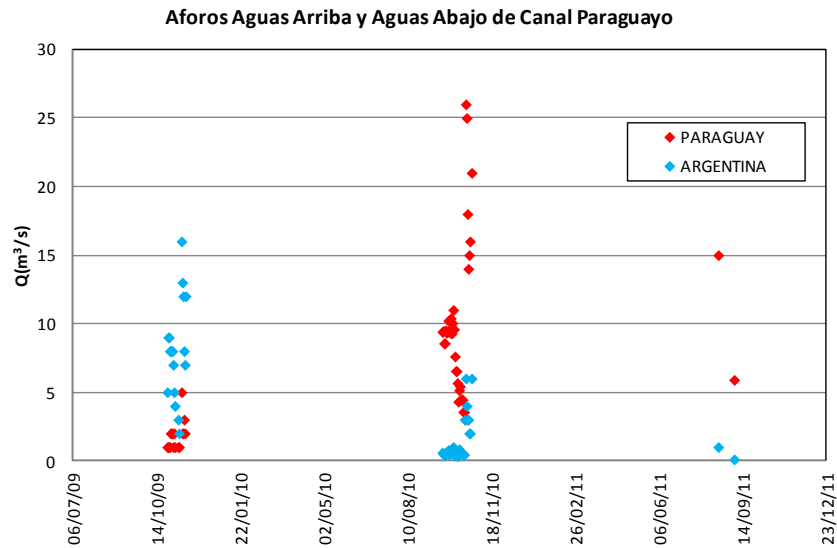


Figura 29.- Erogación de caudales hacia Argentina y Paraguay entre los años 2009 y 2011 (Baldissone 2013).

La Información presentada en este capítulo, que comprende material fundamental para la elaboración de la tesis, se complementa con la presentada en el ANEXO - III. que se centra en aspectos necesarios para comprender el comportamiento del Río Pilcomayo.



### 3. Caracterización de las Estaciones de Aforo

Se poseen dos estaciones hidrométricas de importancia para la cuenca baja, una localizada en Villamontes, Bolivia, en la entrada de la cuenca baja y otra localizada en Misión La Paz, Argentina, en el límite con Pozo Hondo, Paraguay.

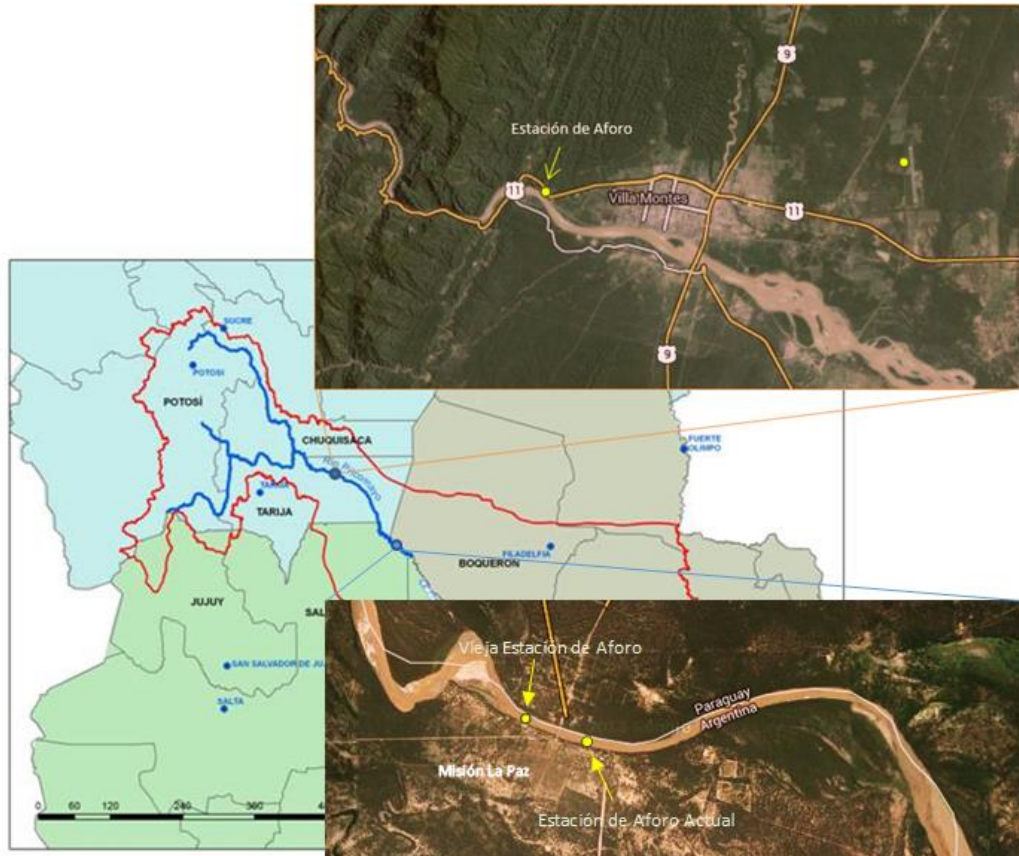


Figura 30.- Localización de las Estaciones en Villamontes y Misión La Paz (Dirección Ejecutiva 2014).

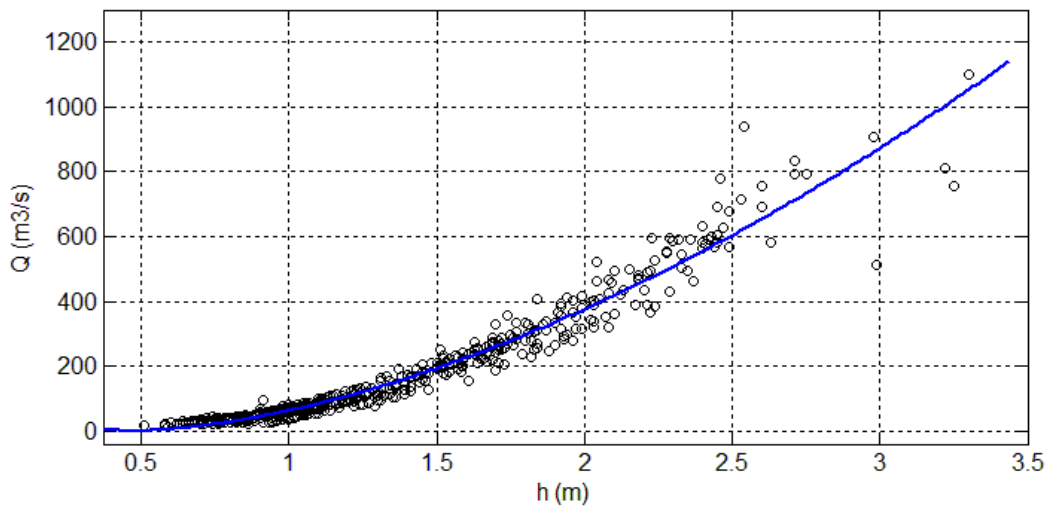
#### 3.1. Estación en Villamontes

La sección de aforo de Villamontes (Figura 30) se encuentra en la localidad de mismo nombre en Bolivia, en el departamento de Tarija a los 21,26 ° Latitud (S) y 63,50 ° Longitud (O) a 407 msnm y es operada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). Es una sección bastante estable ubicada al pie de los Andes unos kilómetros aguas arriba del comienzo de la cuenca baja, donde sus sedimentos todavía son gruesos. Aguas abajo de la localidad de Ibibobo el río se vuelve trezado e inestable. La importancia de esta estación es que proporciona los caudales tanto líquidos como sólidos de ingreso a la cuenca baja. En la estación de Villamontes se posee instrumental Pluviométrico, de Calidad de Agua e hidrometría. Los datos pluviométricos y de niveles se transmiten en tiempo real.

En esta estación se poseen registros de caudales medios diarios desde agosto de 1976 y registros de sedimentos en suspensión y granulometría desde 1981. El caudal más frecuente es del orden de 37 m<sup>3</sup>/s, el caudal medio anual de 237 m<sup>3</sup>/s y los picos de crecidas han llegado a 6500 m<sup>3</sup>/s.

Se poseen aforos para lecturas de escala que no superan los 3,30 m. Actualmente no se afora con molinete y vagoneta en lecturas de escalas que superen los 3,00 m por cuestiones de seguridad. Cuando se supera esta lectura se afora con flotadores. A partir de enero del 2014 se ha comenzado a aforar durante crecidas, no obstante todavía no hay datos de picos de crecida.

Se poseen aforos desde septiembre de 1976, no obstante para la curva H-Q se utilizan valores a partir del año 2004, cuando se empieza a aforar desde la vagoneta, ya que los valores anteriores no son lo suficientemente confiables. Se espera en el futuro poder corregir y vincular ambas series 1976-2004 y 2004-2014. Se ajustan los puntos a una curva de la forma  $Q = C (H - H_0)^{5/3}$



**Figura 31.-** Curva Altura-Caudal a partir de aforos en Villamontes desde 26/03/2004 al 29/4/2014, SENAMHI. Fuente: Elaboración Propia.

La relación entre la lectura de Escala y el Caudal es:  $Q = 187,1 (H - 0,48)^{5/3}$ ,  $R^2 = 0,95$



**Figura 32.-** Estación de aforo en Villamontes, Bolivia, Vista hacia aguas abajo, julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 33.-** Sensor Kalesto y Torre de sección de aforo julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 34.-** Vista hacia aguas arriba, julio 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 35.-** Sección de aforo por vagoneta; septiembre 2013 (Baldissoni, Cristanchi y Testa 2013).

### 3.1.1. Análisis Curva H-Q

Se superpuso una topografía para mostrar cómo es la sección fuera de la sección de aforo de Villamontes (La Figura 36). Los datos topográficos son del 20 de noviembre de 2013 y fueron proporcionados por la DE-CTN del Río Pilcomayo. A la topografía se le superpuso un aforo, en el cual la superficie de agua se encuentra a los 0,88 m de lectura de escala. Se puede dividir la sección de aforo en secciones horizontales, donde se observan cambios de pendiente en las márgenes: una hasta 0,88 m de lectura de escala, otra hasta 2,08 m y otra hasta los 4,10 m. Se calculó una curva H-Q para cada rango de lecturas de escala (Figura 37, Figura 38 y Figura 39).

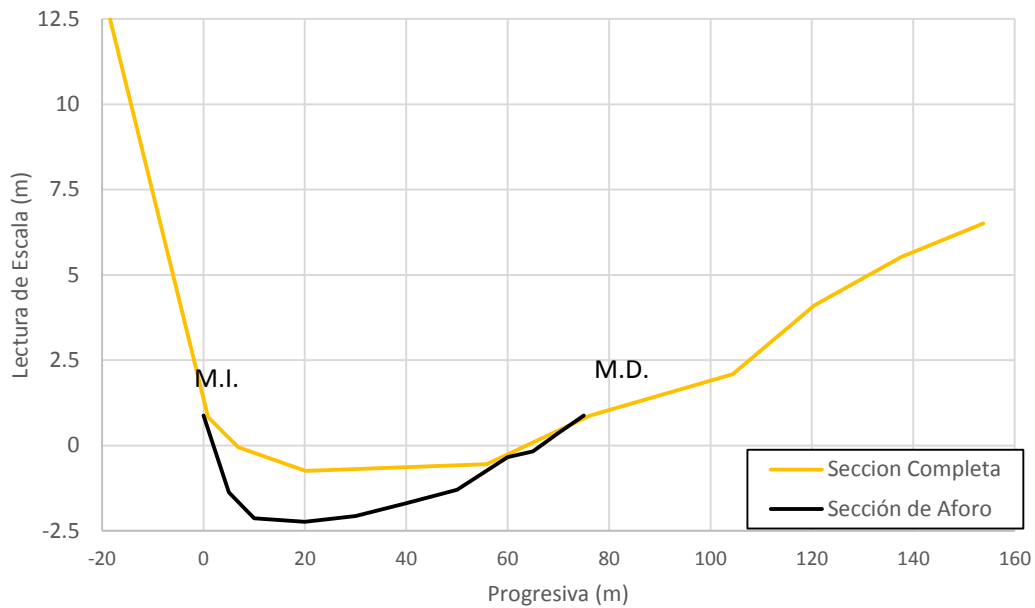


Figura 36.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.

La Figura 37 presenta la relación h-q para los aforos con lectura de escala hasta 0,88 m. Se observa que la correlación no es muy buena. Esto se debe a que la sección varía año a año para caudales bajos. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 51,64(H)^{5/3} \quad R=0,56$$

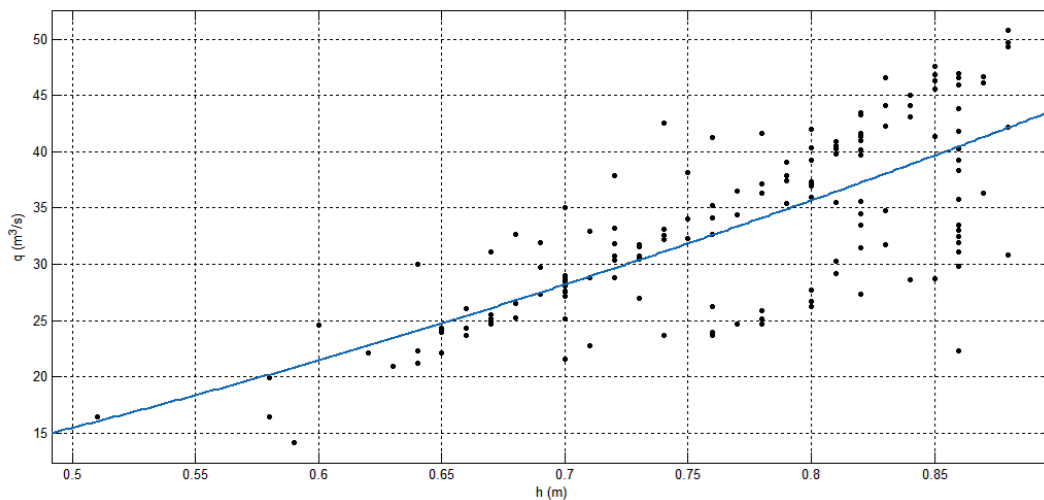


Figura 37.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 0,88 m.

Para valores de lectura de escala entre 0,88 m y 2,08 m se observa menos dispersión. La Figura 38 presenta los puntos de aforos, una curva de ajuste y un rango que contiene el 90% de los puntos que se obtiene variando  $H_0$  entre 0,470 y 0,489, si se toma C fijo.

$$Q = 183,2 (H - 0,48)^{5/3} \quad R=0,93$$

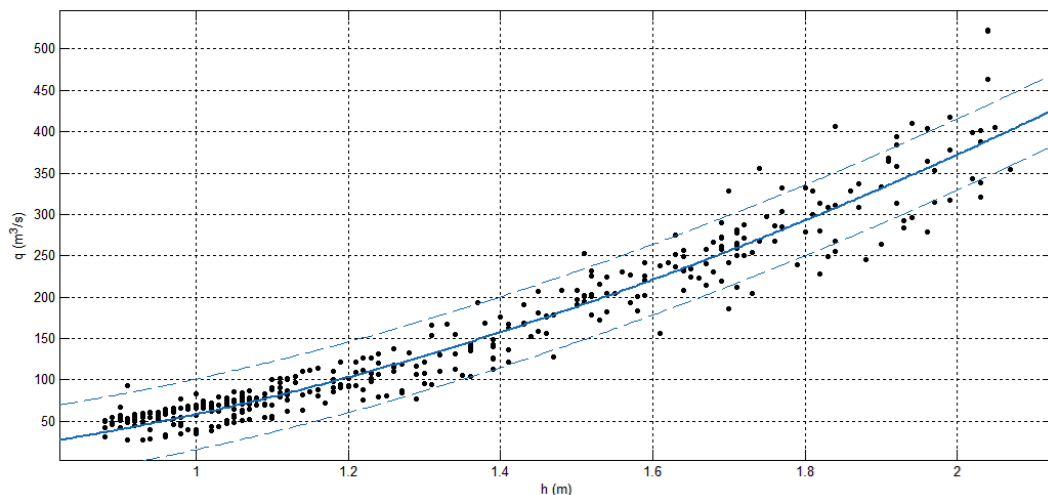


Figura 38.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 0,88 m a 2,08 m.

La Figura 39 presenta los valores de h y q para los aforos con lectura de escala mayor a los 2,08 m. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 189,7 (H - 0,48)^{5/3} \quad R=0,56$$

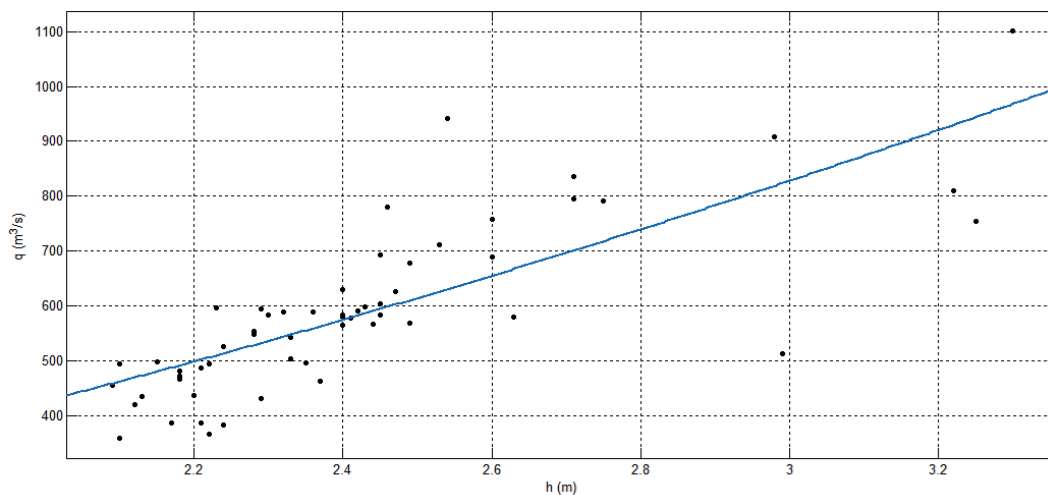


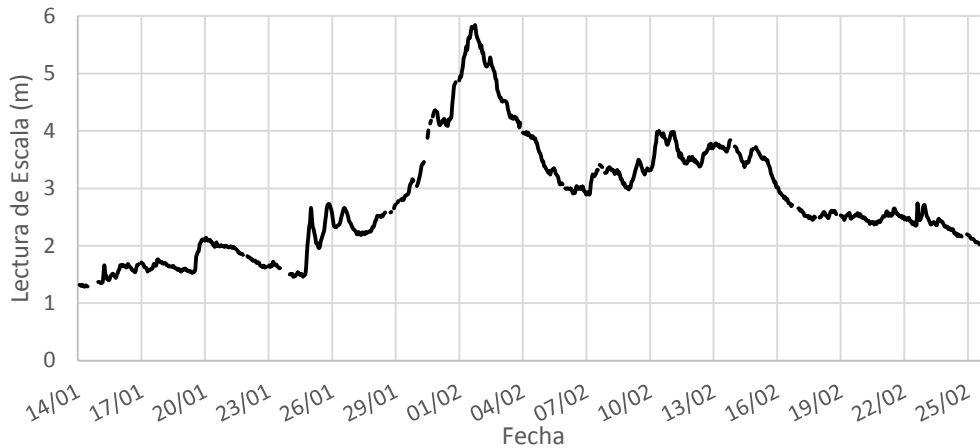
Figura 39.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 2,08 m.

### 3.1.2. Movimiento del Fondo

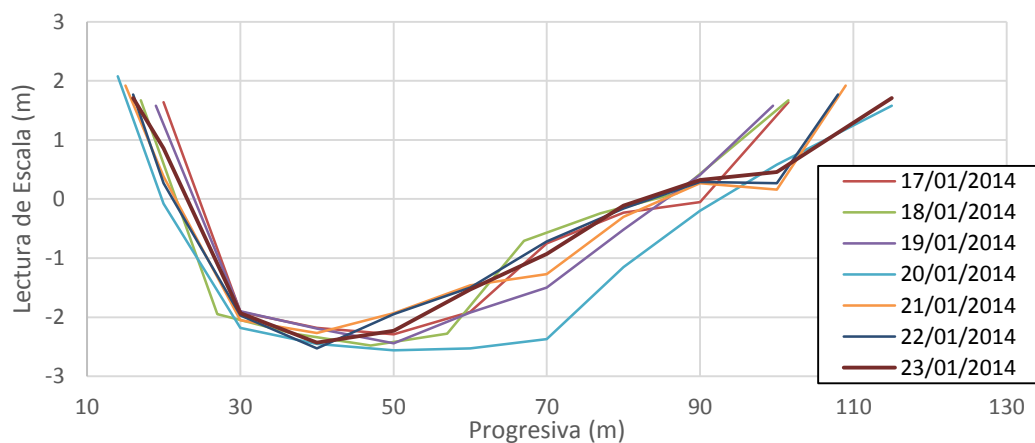
La Figura 41 presenta la variación del fondo de la sección de aforo en Villamontes, consecuencia de la erosión general transitoria durante el paso aguas altas en enero de 2014. La Figura 43 muestra el movimiento de fondo para aforos diarios en febrero de 2014 y la Figura 42 los niveles registrados por el sensor durante el periodo de aforos. Es importante tener presente la variabilidad del fondo en el momento de utilizar o calcular las curvas H-Q.



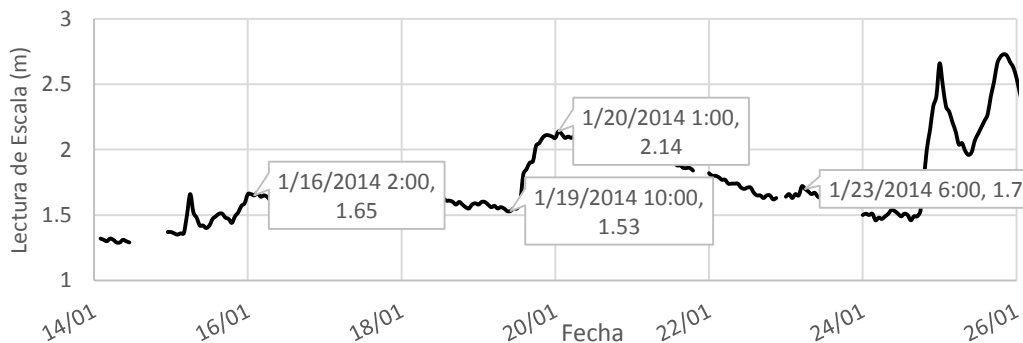
Si observamos la Figura 41, antes de la crecida, y la Figura 43, después de la crecida, se puede observar que el lecho se encontraba a los -2,50 m de lectura de escala antes del paso de la crecida y luego se encuentra en los -7,00 m, para ir subiendo nuevamente con el transcurso de los días hasta los -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.



**Figura 40.-** Lecturas de escala durante enero y febrero de 2014.

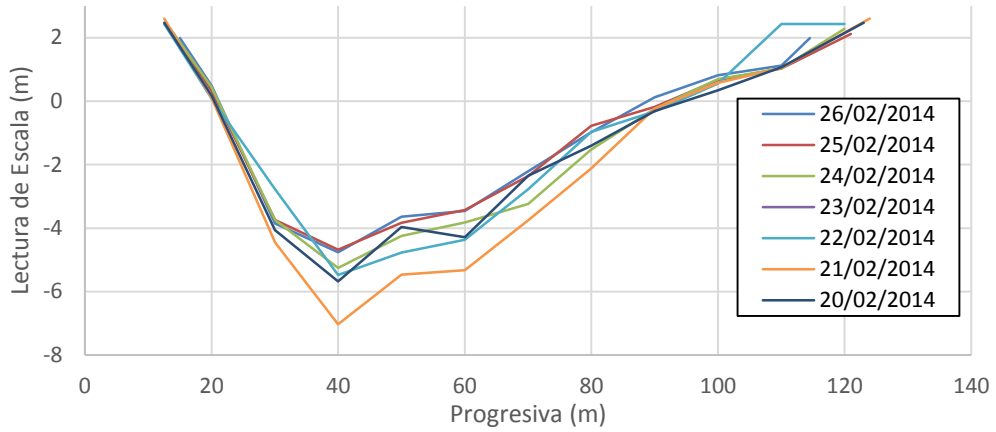


**Figura 41.-** Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

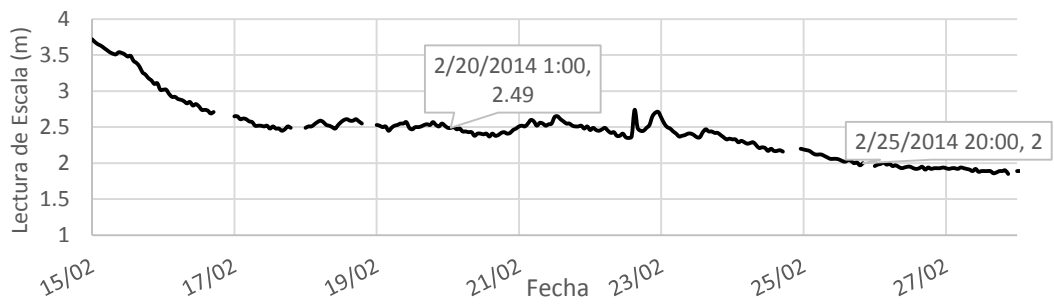


**Figura 42.-** Niveles durante los aforos enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)





**Figura 43.-** Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

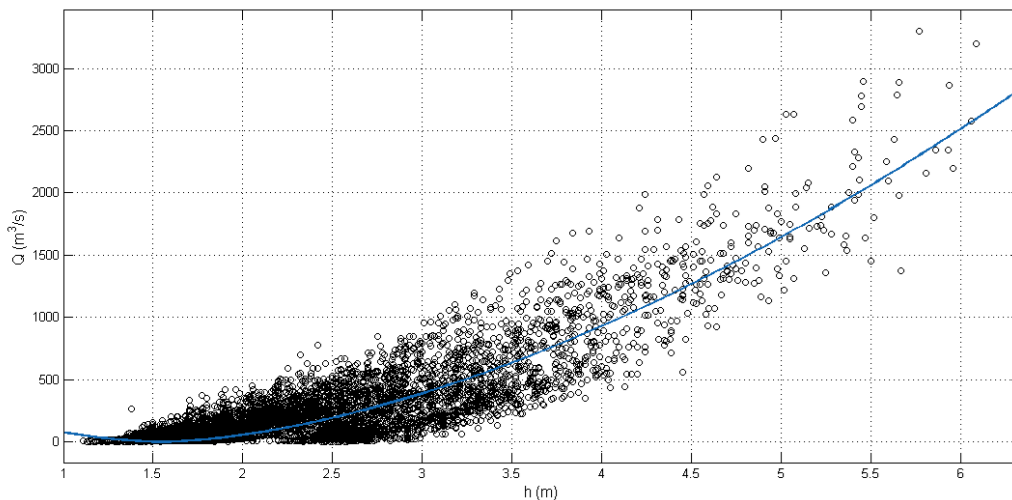


**Figura 44.-** Niveles durante los aforos febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti 2014)

### 3.2. Estación en Misión La Paz

La sección de aforo de Misión La Paz se encuentra en la localidad homónima de Salta (Figura 30), 300 m aguas abajo del Puente Internacional que une Argentina con Paraguay a los 22°22'49.730" Latitud (S) y 62°30'55.275" Longitud (O) a 230 msnm. La estación de aforo es operada por EVARSA, empresa concesionaria dependiente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La sección es nueva, ya que antes se encontraba unos 500 m aguas arriba, donde se localiza la Casa de EVARSA, estación que en el año 2009 fue destruida por una crecida. La sección actual entró en funcionamiento el 20 de noviembre de 2009. Se poseen registros de Caudales medios diarios para Misión La Paz desde el año 1961. La sección en Misión La Paz se caracteriza por ser altamente variable, las curvas altura-caudal se deben calcular para cada crecida. La estación de MLP incluye estaciones pluviométrica, de calidad de agua, climatológica ordinaria, termométrica e hidrométrica. Los datos de niveles se transmiten en tiempo real.

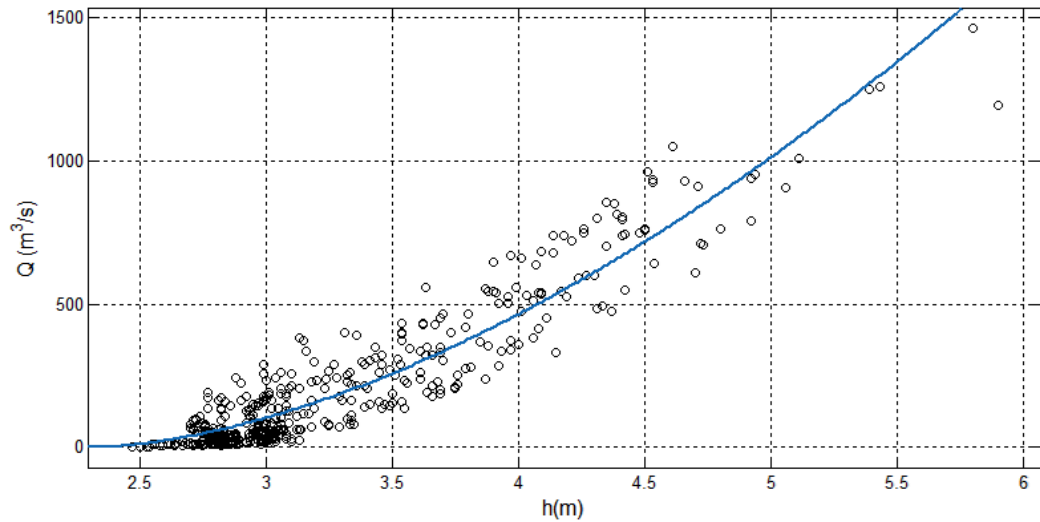
La Figura 45 presenta los valores de lectura de escala y caudal para los aforos en la vieja sección, dónde se puede observar la gran dispersión de valores.



**Figura 45.-** Curva Altura- Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/9/1972 al 20/8/2009, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.

$$Q = 208,1 (H - 1,545)^{5/3} R^2 = 0,78$$

La Figura 48 presenta las lecturas de escala y los caudales aforados, a partir de enero de 2010 en la nueva sección. Se observa que la dispersión de resultados es menor que en el caso anterior, no obstante debido a la gran variabilidad de la sección se debe calcular, como ya se ha mencionado, una H-Q para cada evento.



**Figura 46.-** Curva Altura - Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/1/2010 al 24/5/2014, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se presenta una formulación del tipo H-Q que solo debe tomarse como una primer valor de referencia. Es importante recordar de nuevo que hay que calcular una H-Q para cada crecida.

$$Q = 195,9 (H - 2,319)^{5/3} R^2 = 0,88$$



**Figura 47.-** Sección de aforo en Misión La Paz, Argentina, al frente Pozo Hondo, Paraguay, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 48.-** Vista hacia aguas abajo de la sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 49.-** Vista hacia aguas arriba de la sección de aforo de Misión La Paz, se observa el puente internacional, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 50.-** Puente internacional y Sensor de Nivel (OTT), vista desde aguas abajo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

3.2.1. Análisis de Curva H-Q

Se superpuso una topografía para mostrar cómo es la sección fuera de la sección de aforo en Misión La Paz (Figura 51). Los datos topográficos son del 26 de Septiembre de 2013 y fueron proporcionados por la DE-CTN del Río Pilcomayo. A la topografía se le superpuso un aforo, en el cual la superficie de agua se encuentra a los 2,94 m de lectura de escala. Se puede dividir la sección de aforo con dos horizontales, donde se observan cambios de pendiente en las márgenes: una hasta 3,12 m de lectura de escala, otra hasta 4,90 m. Se calculó una curva H-Q para cada rango de lecturas de escala

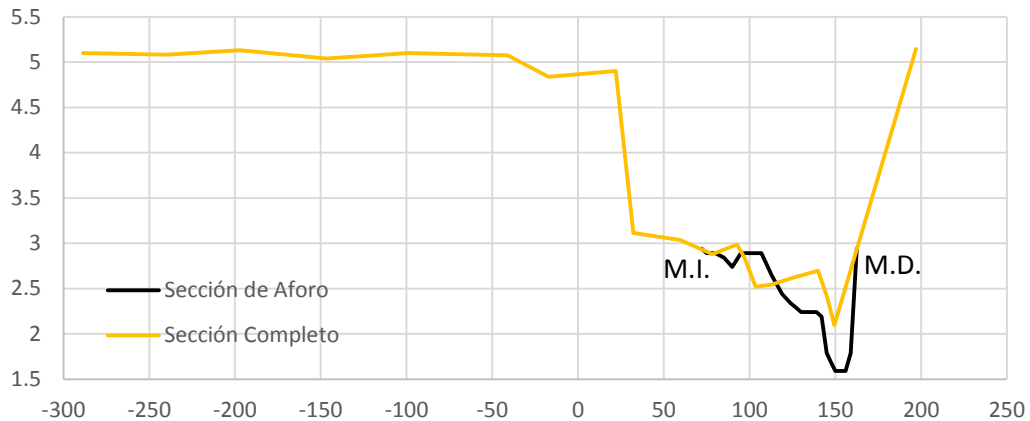


Figura 51.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.

La Figura 52 presenta todos los aforos disponibles hasta una lectura de escala de 3,12 m. Se observa mucha dispersión, que impide ajustarla a una curva. Esto se debe a que la sección es muy variable.

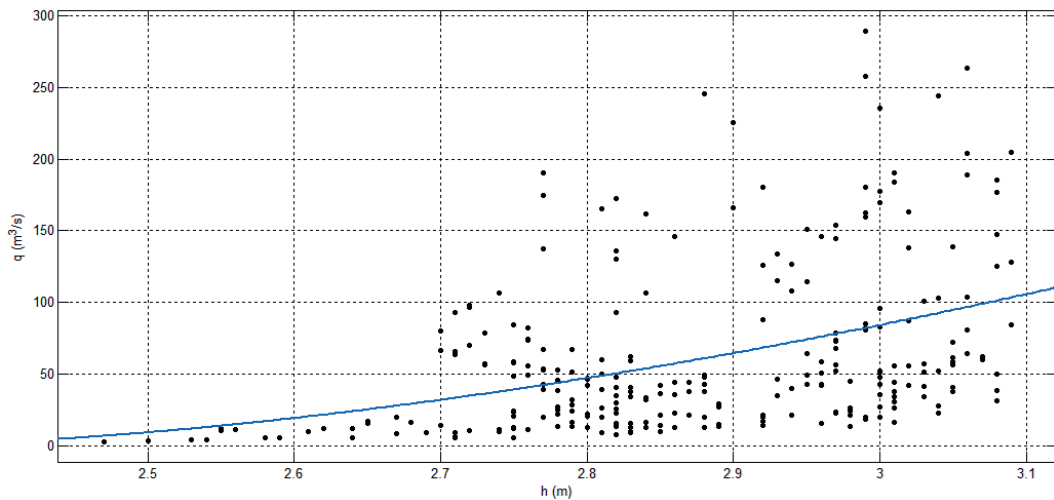
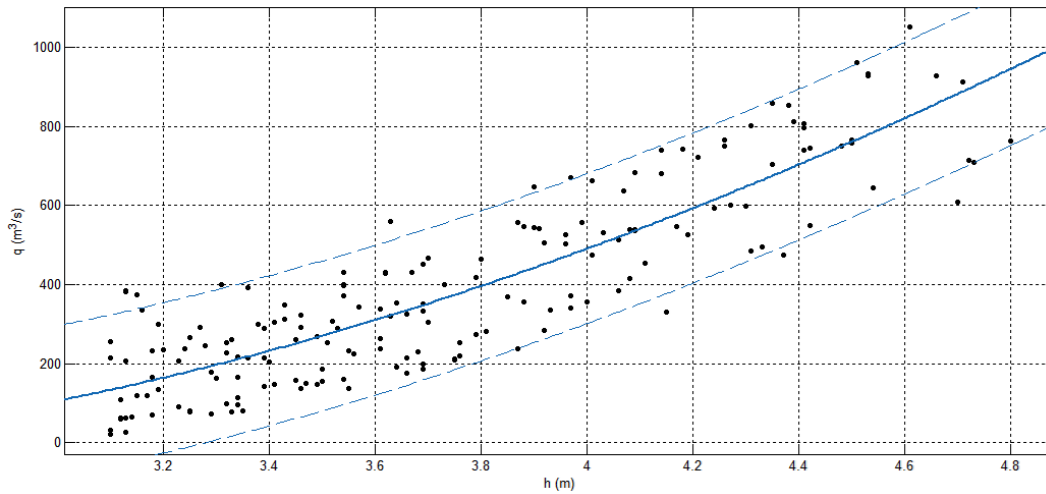


Figura 52.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 3,12 m.

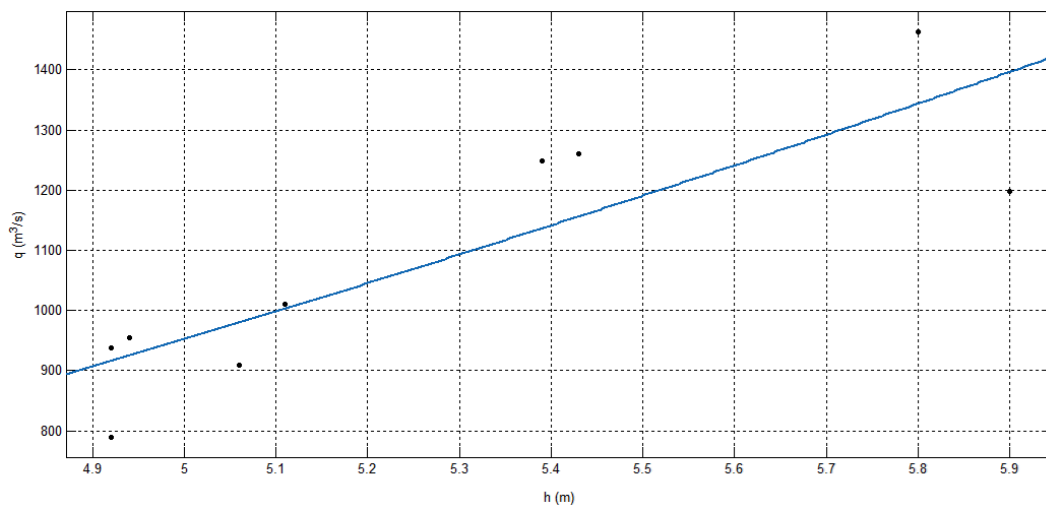
La Figura 53 presenta los aforos con lectura de escala en 3,12 m y 4,10 m, se observa poca dispersión y se ha delimitado un rango que contiene el 90% de los aforos. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 206,7 (H - 2,319)^{5/3} \quad R^2=0,78$$



**Figura 53.-** Curva H-Q para lecturas de escala desde 3,12 m hasta 4,10 m.

Para lecturas de escala mayores a los 4,10 m no se disponen muchos aforos. Se presentan en la Figura 54 los valores disponibles y a continuación la función que mejor ajusta los datos.



**Figura 54.-** Curva H-Q para lecturas de escala por encima de los 4,10 m.

$$Q = 118,7 (H - 1,511)^{5/3} \quad R=0,74$$

3.2.2. Movimiento del Fondo

La Figura 55 muestra la gran variación de la sección durante aforos diarios en Misión La Paz en enero de 2014 y la Figura 56 los niveles registrados. Se observa que la vaguada ha descendido hasta 1,6 m con efectos también de gran movimiento en el resto del lecho.

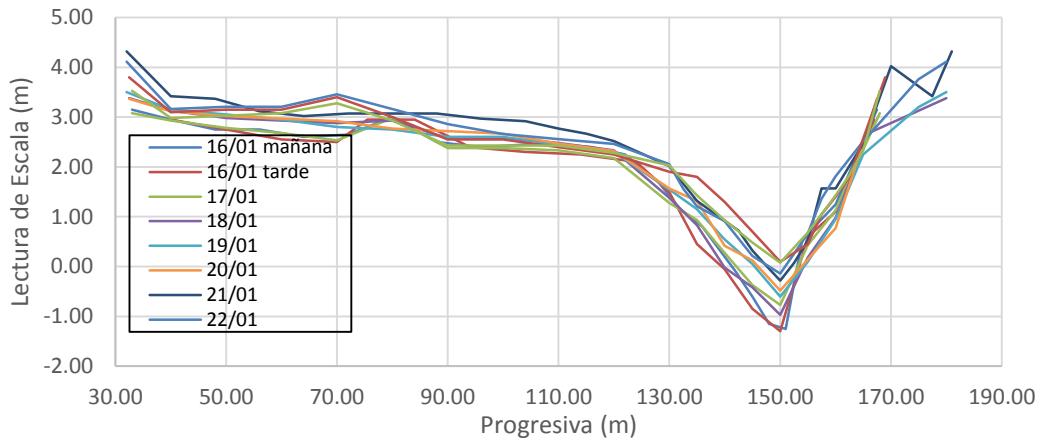


Figura 55.- Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)

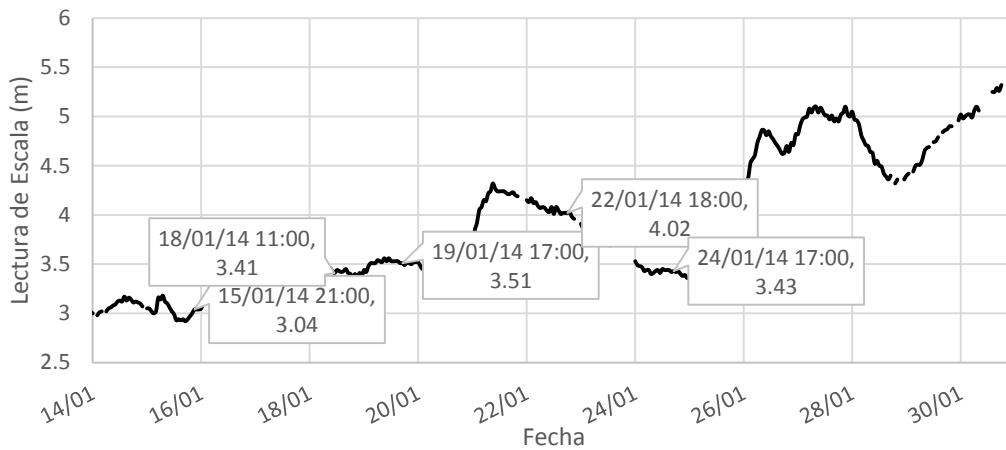


Figura 56.- Niveles durante los aforos 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)





## 4. Caracterización Hidrológica

### 4.1. Curvas Caudal, Duración y Recurrencia para la Estación Misión La Paz, sobre el Río Pilcomayo.

En base a una serie histórica de caudales en Misión La Paz, proporcionada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, de libre disponibilidad en su sitio web <http://www.hidricosargentina.gov.ar>, se realizó una curva Q-d-T (caudal, duración y recurrencia).

Se contó con una serie de caudales diarios, desde el primero de enero de 1960 hasta el 31 de agosto de 2011, fecha en la que se deja de medir por la inestabilidad de la sección. Se dividen las mediciones en años hidrológicos, desde 1 septiembre a 31 de agosto de cada año.

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 diarios de ese día y del día posterior.

**Tabla 6.-** Caudales máximos medios anuales para duración de: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 días.

Año Hidrológico	Duración							
	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5	d=6	d=7	d=10
1960	763	738	681	636	619	599	586	556
1961	840	814	793	765	744	726	696	623
1962	1672	1460	1452	1454	1443	1436	1431	1357
1963	902	847	724	669	668	648	633	648
1964	963	943	904	835	777	721	716	699
1965	922	811	717	643	568	517	472	459
1966	1240	1134	1063	1004	932	867	818	728
1967	1969	1964	1784	1680	1603	1561	1523	1435
1968	886	842	853	784	751	751	759	673
1969	1715	1537	1351	1182	1122	1137	1086	908
1970	1676	1662	1519	1427	1341	1331	1286	1246
1971	1144	1060	988	900	827	796	780	714
1972	1361	1173	1016	924	904	870	823	716
1973	2290	2200	2149	2138	2125	2022	1933	1904
1974	2032	1874	1793	1720	1720	1703	1622	1530
1975	1623	1539	1470	1399	1379	1371	1362	1173
1976	1218	1187	1116	1010	1013	1009	984	924
1977	2103	2004	1892	1850	1789	1729	1659	1465
1978	3781	3609	3487	3284	3056	2899	2739	2454
1979	1817	1588	1475	1434	1448	1400	1304	1094
1980	1868	1776	1723	1615	1544	1502	1489	1459
1981	3589	2955	2709	2431	2371	2314	2291	1987
1982	499	495	438	416	397	378	351	313
1983	4585	4570	4187	3936	3669	3531	3425	3067
1984	3489	3283	3082	2969	2812	2617	2438	2277
1985	3295	3086	2850	2694	2554	2425	2306	2087
1986	2366	2277	2125	2042	2078	2082	2043	1866
1987	2465	2369	2316	2237	2141	2052	1974	1786
1988	1086	892	841	819	729	667	635	563
1989	738	657	629	601	569	555	536	510
1990	1799	1695	1588	1535	1566	1534	1468	1264
1991	1927	1784	1567	1453	1389	1333	1286	1147
1992	1561	1444	1286	1119	968	885	829	775
1993	1081	1010	911	877	850	837	788	717
1994	1342	1245	1199	1132	1082	1003	942	787
1995	965	723	606	553	518	507	508	471
1996	2374	2303	2135	1983	1850	1766	1680	1608
1997	617	601	532	474	428	399	409	376
1998	2079	1949	1823	1749	1684	1600	1520	1396
1999	1786	1700	1609	1555	1506	1469	1403	1262
2000	2215	2035	1874	1756	1698	1609	1548	1427
2001	1579	1519	1377	1361	1308	1246	1172	974
2002	2089	1838	1538	1313	1206	1200	1189	1008
2003	2459	2112	1799	1565	1437	1392	1361	1118
2004	2973	2653	2250	1982	1772	1600	1454	1316
2005	2539	2350	2140	2025	2065	2008	1966	1887
2006	3009	2976	2659	2373	2150	2045	1902	1586
2007	2867	2857	2705	2584	2407	2255	2254	2136
2008	2265	2163	1931	1788	1688	1687	1673	1540
2009	2607	2330	2208	2152	2115	1998	1871	1592
2010	2151	1950	1899	1818	1727	1624	1521	1441

Una vez obtenida la tabla con los caudales medios máximos anuales se procede al análisis estadístico de los datos previa verificación de independencia y homogeneidad. Se utilizaron las curvas de probabilidades de Gumbel y Log-Pearson tipo III.

A continuación se resumen los resultados para un día de duración.

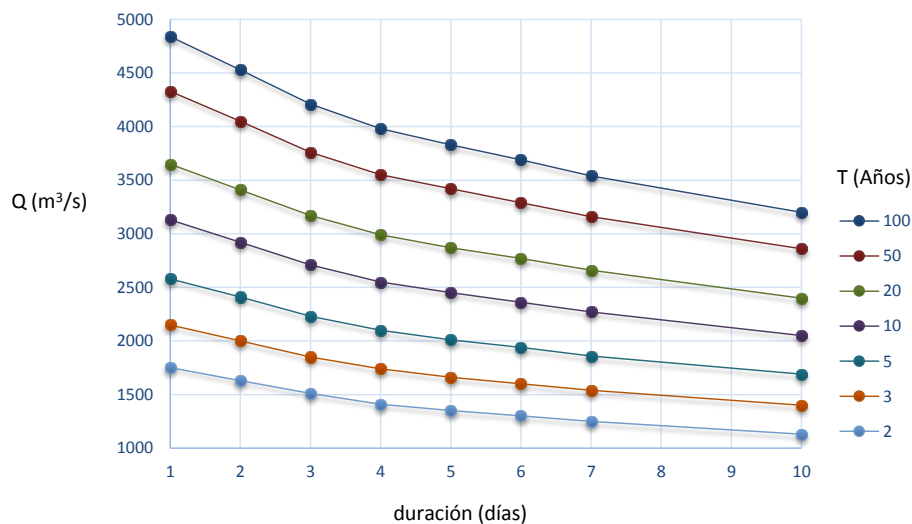
**Tabla 7.-** Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Gumbel.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza
Años	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /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 8.-** Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Log-Pearson III.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza
Años	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /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 presentado en la Figura 57.



**Figura 57.-** Curvas QDT para Misión La Paz, Curvas de Probabilidades Gumbel.

La función Potencial que representa la relación entre las 3 variables, con cuatro parámetros de ajuste es:

$$Q(D, T) = 37520 \frac{T^{0,1465}}{(D + 14,67)^{1,022}}$$

$$T = \left( \frac{Q \cdot (D + 14,67)^{1,022}}{37520} \right)^{6,8259}$$

Como ejemplo de una de las aplicaciones de este gráfico se analiza la crecida de enero 2013, con los siguientes datos en MLP.

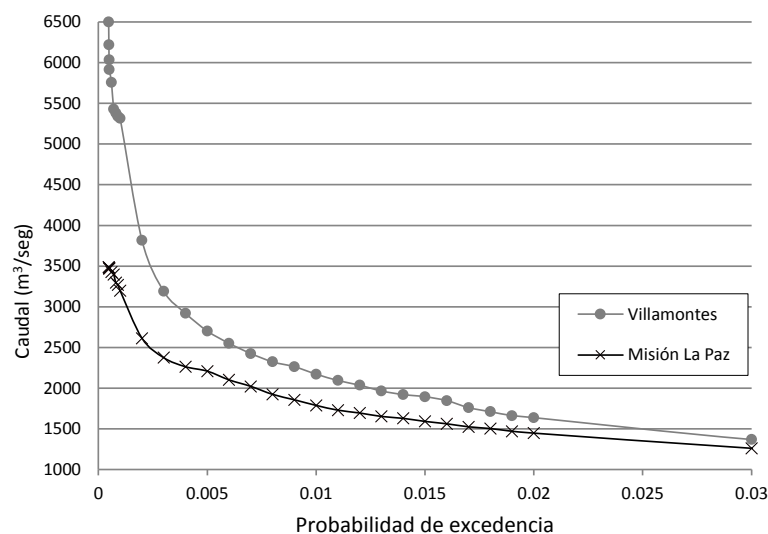
**Tabla 9.-** Ejemplo de utilización de las curvas para el caso de la crecida del año 2013

Fecha	Altura promedio diaria (m)	Caudal medio diario(m <sup>3</sup> /seg)
17/01/2013	3.94	295
18/01/2013	5.26	1116
19/01/2013	5.05	948
20/01/2013	5.83	1648
21/01/2013	6.23	2098
22/01/2013	6.52	2447
23/01/2013	6.61	2564
24/01/2013	5.83	1655
25/01/2013	4.57	610
26/01/2013	4.36	493
27/01/2013	3.99	312

Para el Pico 2564 m<sup>3</sup>/s, con 1 día de duración, corresponde un periodo de retorno de 7 años. Si tomamos 6 días de duración desde el 19 de enero, con un caudal promedio de 1893 m<sup>3</sup>/s obtenemos un periodo de retorno, en este caso, también de 7 años.

**4.2. Curva de Probabilidad de Excedencia de Caudales**

También se calcularon las curvas de probabilidad de excedencia de caudales para las estaciones de Villamontes y Misión La Paz (Díaz y Testa Tacchino 2014). Ésta grafica resulta interesante porque nos permitirá analizar los caudales desbordados. En la Figura 59 se observa que hay pérdidas del orden de 15 m<sup>3</sup>/s entre VM y MLP con una excedencia superior al 3 %, que nos indicaría las perdidas 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. Las primeras pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de 2551 m<sup>3</sup>/s en VM y de 2100 m<sup>3</sup>/s en MLP. Caudales de 3817 m<sup>3</sup>/s en VM y 2613 m<sup>3</sup>/s en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 ‰, producen grandes desbordes de aproximadamente 800 m<sup>3</sup>/s. Estos valores parecerían ser congruentes con los que se observaron a partir del análisis con imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados (Ver Sección 6). Para caudales de 5400 m<sup>3</sup>/s en VM y 3200 m<sup>3</sup>/s en MLP, se acrecentaría notablemente el caudal desbordado.



**Figura 58.-** Curvas de Excedencia para VM y MLP.

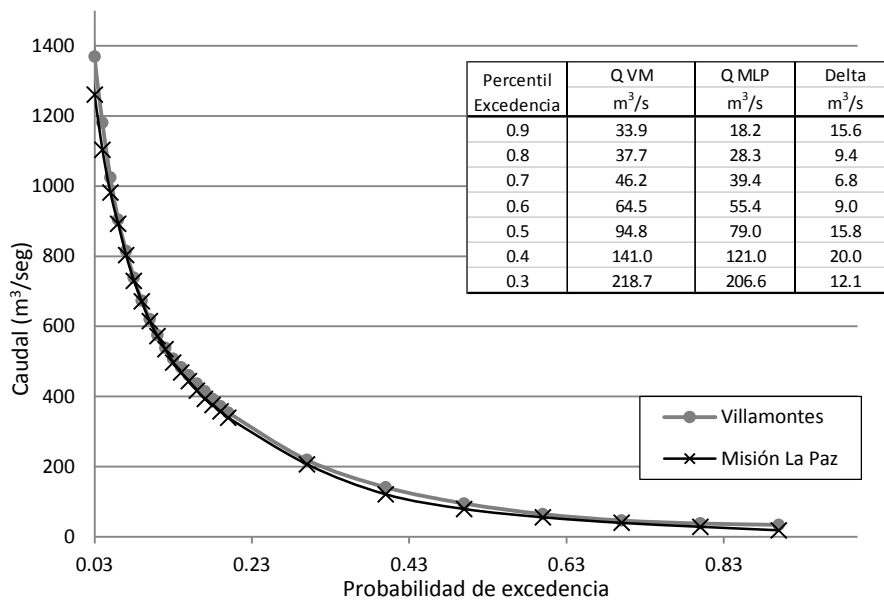


Figura 59.- Curvas de Excedencia para VM y MLP.

### 4.3. Caracterización de Sedimentos

#### 4.3.1. Granulometría

A continuación se presentan datos obtenidos a partir de diferentes bibliografías consultadas respecto a los tamaños de sedimentos para estaciones del Río Pilcomayo de relevancia para Argentina.

#### 4.3.2. Villamontes

En Villamontes la granulometría media del lecho del río es de arena media con diámetros de 0,250 mm a 0,500 mm, aunque existen sedimentos de tamaño de grano más grueso. Las gravas proceden también de los conglomerados de la cuenca alta y de las terrazas fluviales locales Cuaternarias. (Pool y Van Duijne 1996)

A partir de 12 muestras de material en suspensión se obtuvo el rango de granulometrías para Villamontes. Se obtuvo un D50 de 6,5  $\mu$ m, arena fina en la clasificación (Wentworth 1922). Las muestras analizadas poseen un 8,1 % de material grueso y 91,9 % de material fino compuesto por 68,1 % de material limoso y 31,9 % material arcilloso.

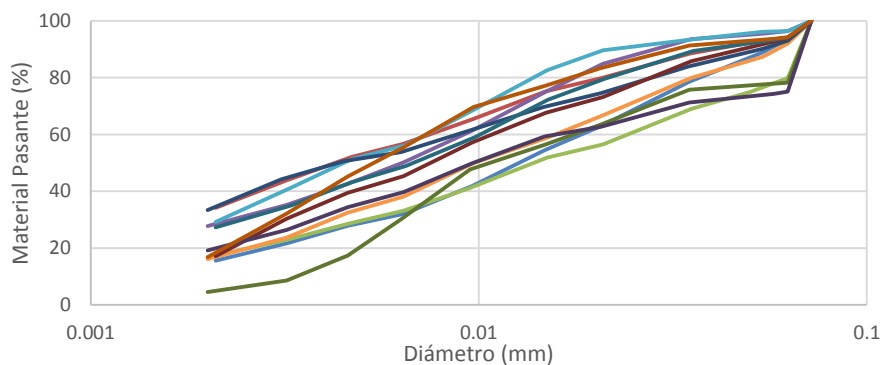


Figura 60.- Rango de curvas granulométrica del material del lecho del río en Villamontes (EVARSA 2007).

4.3.3. *Zona de Embocadura*

En la zona de la Embocadura, para el material del lecho, se ha encontrado que el D50 es de 1,57  $\mu\text{m}$ , arena muy fina en la clasificación (Wentworth 1922), con un contenido de limo (partículas menores a 0,062 mm) del 5 % (Pool, Usai y Baas 1993).

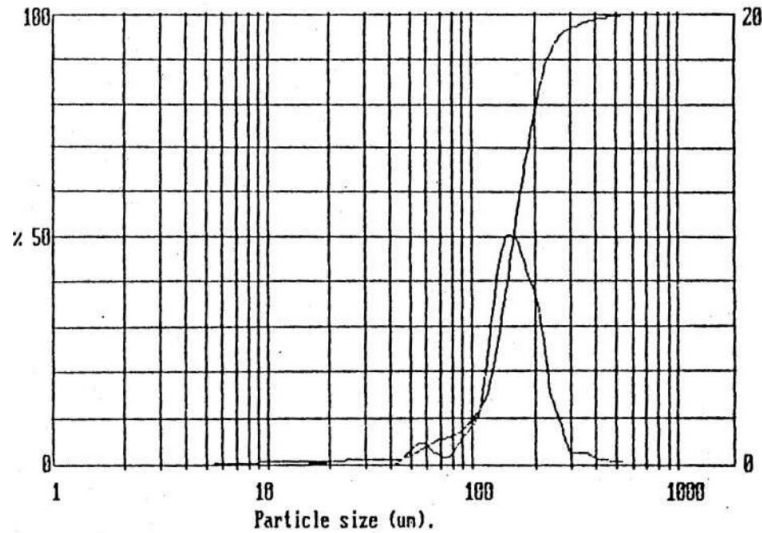


Figura 61.- Curva granulométrica del material del lecho del río en la zona de la embocadura (Pool, Usai y Baas 1993).

4.3.4. *Misión La Paz*

A partir de muestras del fondo del río en Misión La Paz (Kopaliani y Georgievsky 1993) concluyeron que durante el período de aguas bajas el 80-90 % de los sedimentos de fondo tienen dimensiones menores de 0,25 mm de los cuales la mayoría se hallan en la franja 0,10-0,25 mm, en el rango de las arenas finas.

En el período de aguas bajas (baja concentración de material sólido en el río), una gran parte de la composición de la carga de lavado, el 25-30 %, tiene dimensiones mayores de 0,04 mm (limos y arcillas) mientras que durante las crecidas (alta concentración de sedimentos), dichas partículas comprenden solo el 10-20 %.

Tabla 10.- Tamaño de Finos en Suspensión, MLP (Brea y Spalletti 2011).

Clases granulométricas (% en peso) de la fracción arena en suspensión					
Fecha	Muy gruesa	Gruesa	Mediana	Fina	Muy fina
24/07/2008	0,05	0,35	0,75	51,36	47,49
30/10/2008	0,10	0,55	1,22	60,05	38,09
19/02/2009	0,00	0,00	1,80	13,15	85,06

Tabla 11.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en el centro del cauce, MLP (Brea y Spalletti 2011).

Fecha	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA
11/02/2008	97,63	2,37	0,00
24/07/2008	69,22	27,36	3,42
30/10/2008	99,43	0,57	0,00
19/02/2009	99,47	0,13	0,40





## 5. Campañas

Se ha participado en 3 campañas de la DE-CTN a la región del Pilcomayo con los objetivos de reconocer el terreno, observar y relevar las zonas de desbordes. Además se han realizado aforos con Molinete en la zona de embocadura, en Misión La Paz y Villamontes. Se realizaron también aforos con flotadores en Misión La Paz y Villamontes, además de filmaciones para obtener velocidades superficiales por seguimiento de partículas.

Con el fin de hacer más ágil la lectura, el detalle de las campañas y sus resultados se presentan en el ANEXO - II. Aquí se presentan solo los puntos principales de cada una.

### 5.1. Primera Campaña

Se reconocieron los puntos de desbordes aguas arriba de Misión la Paz, y se conocieron las estaciones de aforo de Misión La Paz y Villamontes.

### 5.2. Segunda Campaña

Se acompañó al personal técnico de Misión La Paz y Villamontes durante sus tareas de aforo y lectura de escala para observar sus métodos y proponer mejoras. Además se probaron diferentes técnicas de aforo: Aforo tradicional con molinete desde vagoneta, Aforo por seguimiento de partículas a gran escala por video y Aforo con flotadores. Estos dos últimos métodos con el fin de probar técnicas de medición que se puedan aplicar durante crecidas.

Se obtuvo como resultado de los aforos coeficientes de Manning al medir la pendiente de superficie de agua a partir de dos escalas vinculadas una aguas arriba y otra aguas abajo de Misión La Paz. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12.-** Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

Fecha	Lectura de Escala (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Coeficiente "n" de Manning	Pendiente de la Superficie de Agua	Velocidad media aforada (m/s)	Velocidad calculada con "n"	V <sub>mediaaforada</sub> /V <sub>calculada</sub> "n" %	Caudal calculado con "n"	Q <sub>aforado</sub> /Q <sub>calculado</sub> "n" %
1/27/2014	5.07	372.55	0.0375	0.00186	1.979	1.98	100%	737.90	100%
1/30/2014	5.37	483.20	0.0400	0.00186	2.238	2.25	99%	1089.59	99%
2/5/2014	5.26	750.03	0.0570	0.00198	2.196	2.21	99%	1659.87	99%

En esta campaña también se visitó la zona de desborde Las Vertientes, aguas debajo de Misión La Paz.

### 5.3. Tercera Campaña

Los objetivos de esta campaña fueron el intercambio de información técnica y discusión sobre metodología de aforo y herramientas de procesamiento de las mediciones y la prueba de aforos con tecnología Doppler y la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala. También se realizaron aforos sólidos. Los aforos se realizaron en Villamontes.



## 6. Desbordes en el tramo Villamontes – Misión La Paz

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 estudian cuatro desbordes (Figura 62) 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.

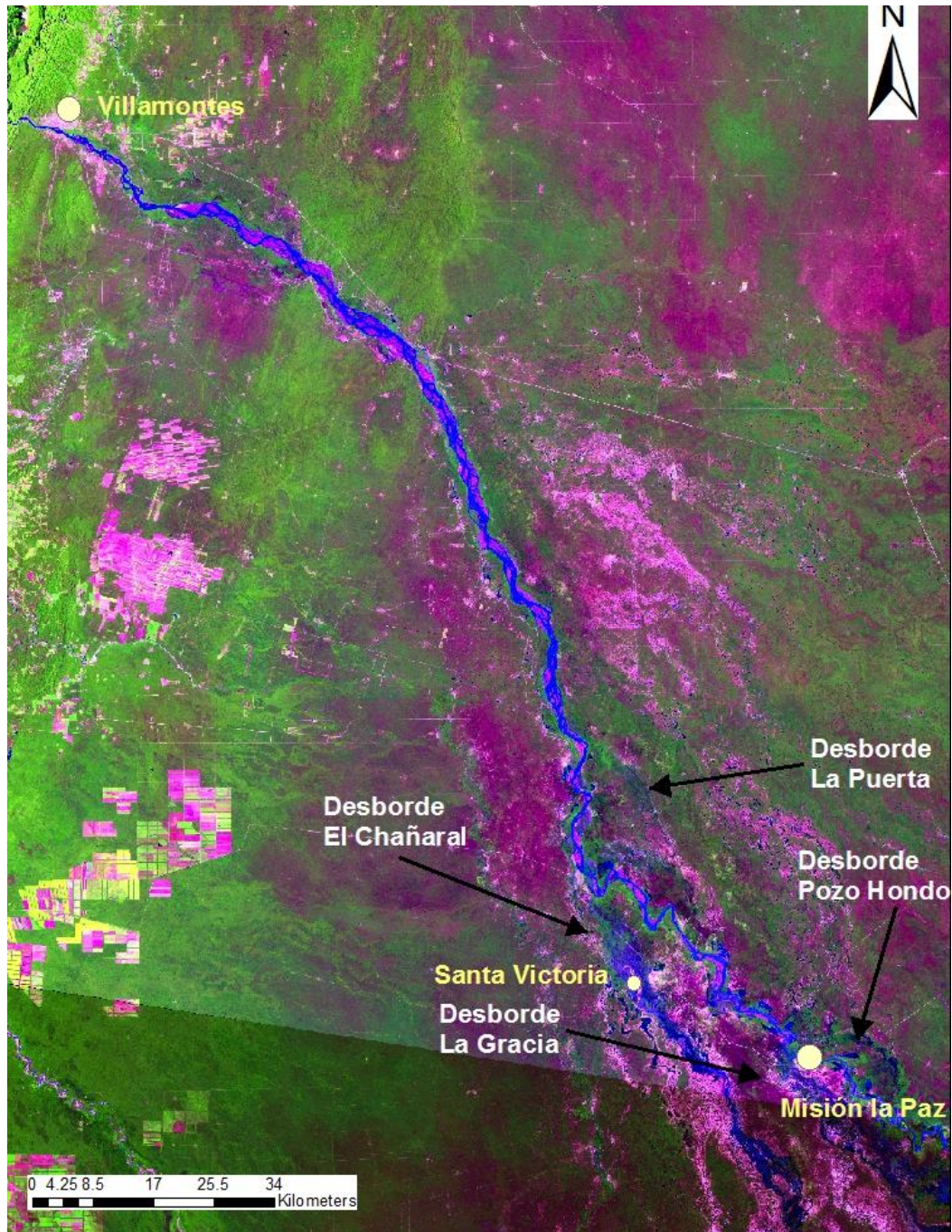
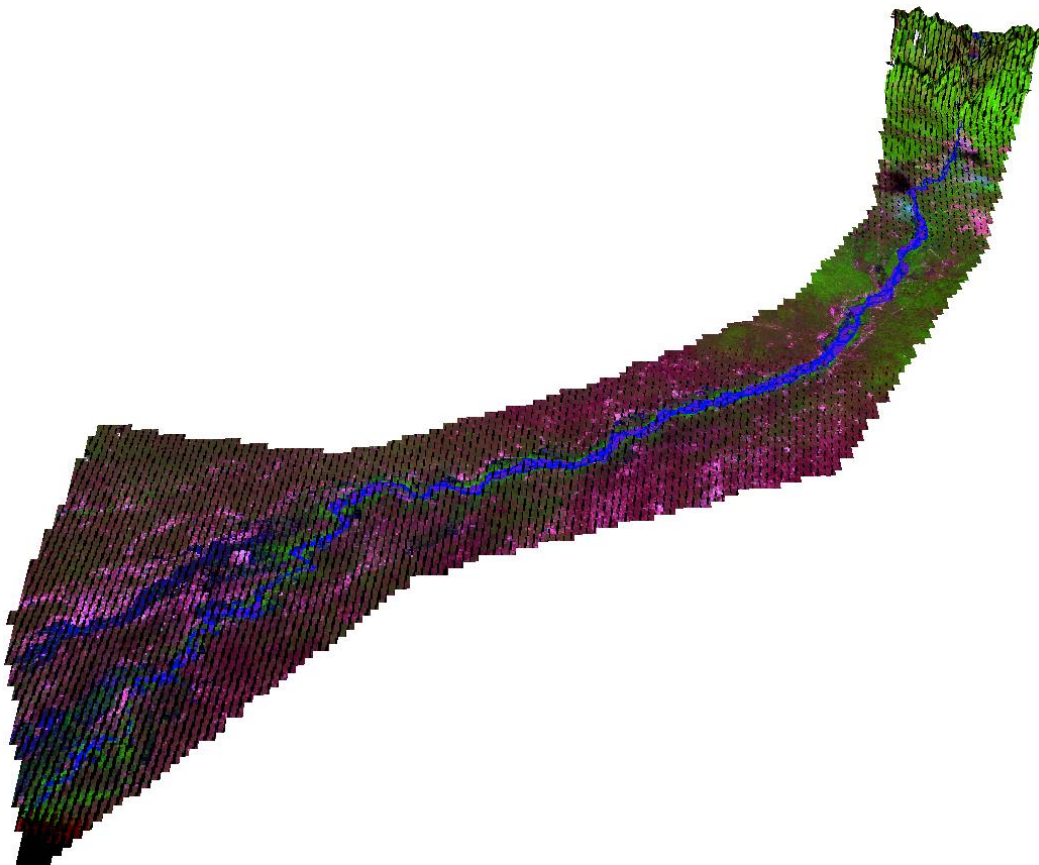


Figura 62.- Detalle de ubicación. (Elaboración Propia)

La avulsión es el proceso natural por el cual el flujo de un río diverge del cauce hacia un curso permanente en la planicie de inundación adyacente y es una de las principales características de las planicies en proceso de sedimentación. Los geomorfólogos denominan avulsión a la relocalización abrupta de ríos.

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, esto no es tan así, en el río Amarillo 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  $30 \text{ kg/m}^3$  (Slingerland y Smith 2004).

Es necesario caracterizar estos eventos, es decir determinar el área de la mancha de inundación, su longitud y su tiempo de permanencia por la importancia que representa para las comunidades.



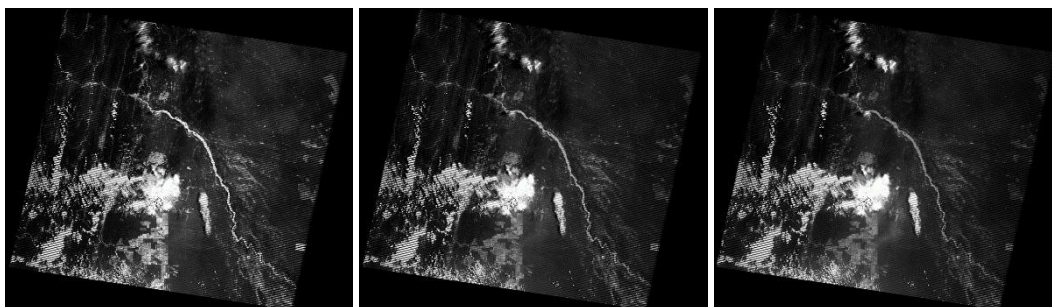
**Figura 63.-** Representación 3D de Imagen Landsat 25/01/2013 y DEM SRTM, Esc. vert. aumentada 12 veces (Elaboración Propia)



### 6.1. Trabajo con Sensores Remotos

La técnica de análisis por sensores remotos permite una visión global del área de estudio, incorpora información en regiones no visibles del espectro, así como observación a distintas escalas y frecuencia con homogeneidad en la adquisición.

La energía reflejada por las cubiertas terrestres es captada por el sensor y difiere en función de la región espectral (banda) a la que éste sea sensible. Esto permite realizar composiciones en color, combinando tres bandas, a las cuales se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo.



**Figura 64.-** Imagen Landsat 25/01/2013 – Bandas: 3 (roja), 2 (verde) y 1 (azul) en escala de grises.

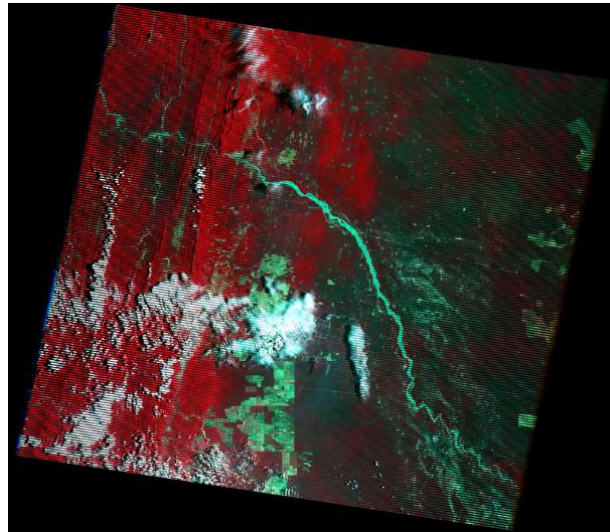
Las más frecuentes en fotografía aérea son las composiciones en color natural. Con imágenes espaciales no es tan frecuente porque pocos sensores incluyen un canal sensible al azul. Los sensores TM y ETM del programa Landsat sí permiten construir este tipo de combinaciones. En la Figura 285, a cada banda del espectro visible -azul (banda 1 del sensor ETM, en este caso), verde (banda 2) y rojo (banda 3)- se le asigna los colores primarios azul, verde y rojo, en el mismo orden. La Figura 65 presenta la combinación de estas bandas, que también se la conoce como composición ETM321 (RGB).



**Figura 65.-** Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición color natural, Bandas 321(RGB).

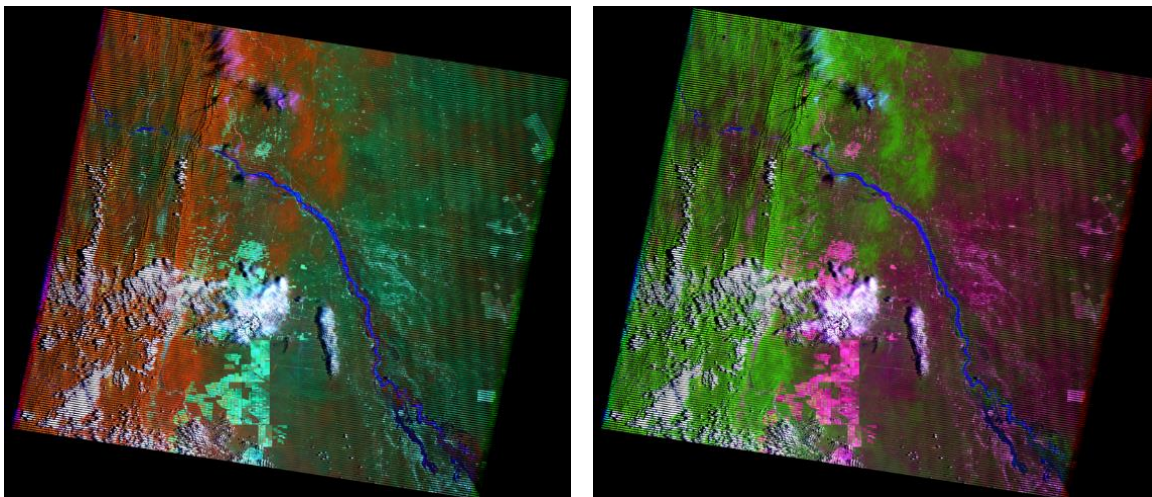
En el análisis con imágenes satelitales, tal vez la combinación más frecuente sea la conocida como falso color convencional. Una buena parte de los sensores de los satélites de observación de la Tierra relacionados con los recursos naturales disponen de canales sensibles a una parte del espectro visible y del infrarrojo próximo. En la Figura 66 , se eligen tres bandas, una del infrarrojo cercano (banda 4, en el caso del sensor ETM), a la

que se le asigna el color rojo, y otras dos del visible -rojo (banda 3) y verde (banda 2)- a las que se les asignan los colores primarios verde y azul, respectivamente (ETM432, RGB).



**Figura 66.-** Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición falso color convencional, Bandas 432.

Una variante de esta última composición coloreada es la denominada falso color mejorado. En este caso, se sustituye un canal del visible por el infrarrojo medio, que aporta información sobre las variaciones de humedad (Martinez Vega y Martín Isabel 2010). En la Figura 67 (Izq.) se muestra un ejemplo, que combina las bandas 453 del sensor ETM de Landsat-7. Esta combinación presenta la vegetación en color rojo, muchas veces se utiliza la combinación 543 que representa a la vegetación de color verde y facilita la comprensión a personas que no están acostumbradas a trabajar con imágenes. Esta última combinación es la que se utiliza en este trabajo (Figura 67, Der.)



**Figura 67.-** Imagen Landsat 25/01/2013 – Comp. falso color mejorado, Izq. Bandas 453 y Der. Bandas 543

Si comparamos la imagen presentada en la Figura 67 (Der.) con la Figura 65 podemos notar que es mucho más sencillo identificar el curso de agua y el desborde en la primera, a su vez hay una diferencia de tonalidad entre río y desborde.

### 6.1.1. Imágenes Landsat

El programa landsat es el registro global de la tierra desde el espacio más largo y continuo. Desde que se lanzó el primer satélite en 1972, los satélites Landsat observan la tierra

permitiendo a los científicos ver como la superficie de la tierra se transforma a lo largo del tiempo.

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat. La Figura 68 presenta la cobertura temporal histórica de cada misión.

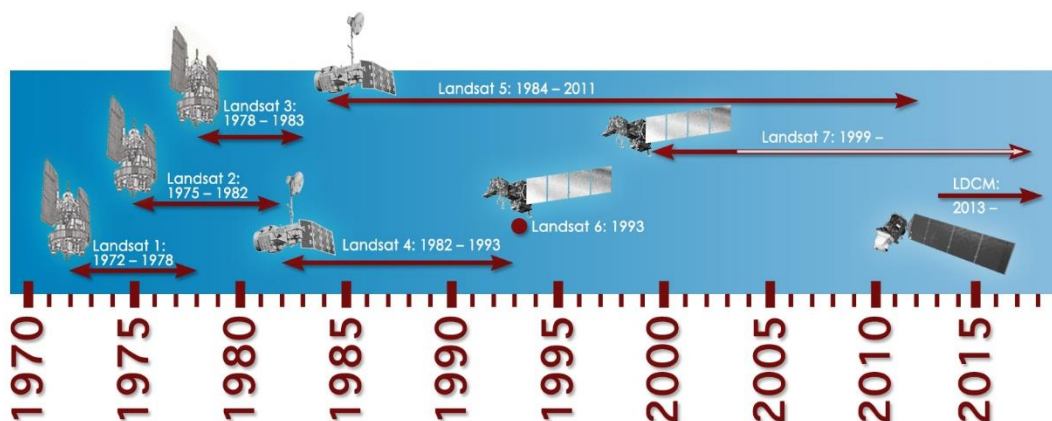


Figura 68.- Cobertura histórica de las imágenes Landsat

El satélite Landsat-7 fue diseñado para una vida útil de 5 años y tiene la capacidad de recolectar, así como transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita Heliosincrónica, es decir, pasa siempre a la misma hora por un determinado lugar. Tiene visión de toda la superficie terrestre en un lapso de tiempo de 15 días, y realiza 232 órbitas. Cada imagen cubre aproximadamente un área de 180 km por 172 km. El instrumento esencial a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). La Tabla 38 presenta las características del sensor del satélite Landsat 7 referidos a resolución espacial, temporal y espectral.

Tabla 13.- Resolución y características del Satélite Landsat 7.

Modo Espectral	Resolución Espacial	Espectro		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0,52 – 0,90 $\mu\text{m}$	8 bits	16 días
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - azul	0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$		
		Banda 2 - verde	0,53 – 0,61 $\mu\text{m}$		
		Banda 3 - rojo	0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$		
		Banda 4 - infrarrojo cercano 1	0,78 – 0,90 $\mu\text{m}$		
		Banda 5 - infrarrojo medio	1,55 – 1,75 $\mu\text{m}$		
		Banda 7 - infrarrojo medio	2,08 – 2,35 $\mu\text{m}$		
	60 metros	Banda 6 – infrarrojo térmico	10,4 – 12,5 $\mu\text{m}$		

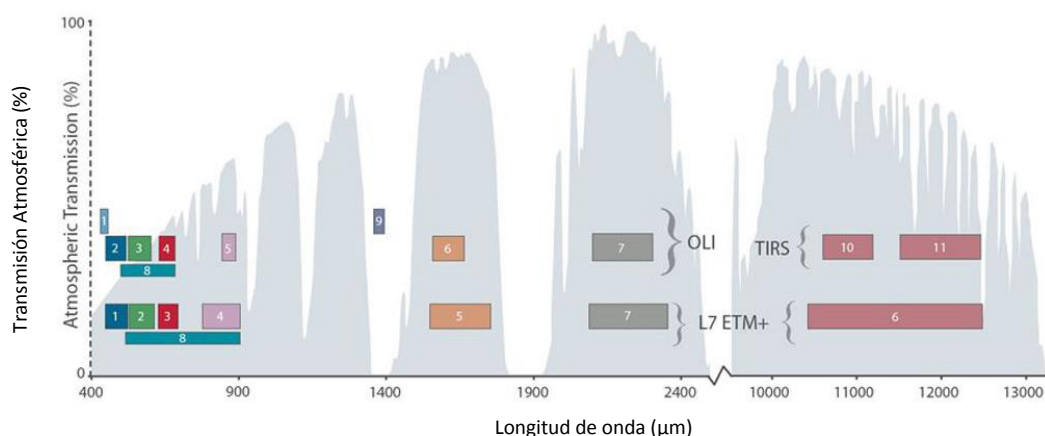
El Landsat 8 también es Heliosíncrono con 705 km de altura orbital, cruza del Ecuador a las 10:00 am  $\pm$  15' en nodo descendente (como en L4-7, no a las 9:45 como en L1-3). La superficie de cobertura es de 180 km por 180 km y la revisita máxima es de 16 días. La Tabla 14 presenta las características del sensor del satélite Landsat 8 referidos a resolución espacial, temporal y espectral.



**Tabla 14.-** Resolución y características del Satélite Landsat 8.

Modo Espectral	Resolución Espacial	Espectro		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0,52 – 0,68 $\mu\text{m}$	12 bits	16 días
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - litoral / aerosol	0,43 – 0,45 $\mu\text{m}$		
		Banda 2 - azul	0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$		
		Banda 3 - verde	0,53 – 0,61 $\mu\text{m}$		
		Banda 4 - rojo	0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$		
		Banda 5 - infrarrojo cercano 1	0,78 – 0,90 $\mu\text{m}$		
		Banda 6 - infrarrojo medio	1,55 – 1,75 $\mu\text{m}$		
		Banda 7 - infrarrojo termal	2,10 – 2,30 $\mu\text{m}$		
		Banda 9 - cirrus	1,36 – 1,39 $\mu\text{m}$		
		100 metros	Banda 10 – Infrarrojo térmico		
100 metros	Banda 11 – Infrarrojo térmico	11,50 – 12,50 $\mu\text{m}$			

La Figura 69 compara las frecuencias de onda que capta cada banda, en la fila superior están las características del Landsat 8 y en la inferior del Landsat 7. Se observa que el Landsat 8 tiene dos bandas termales, la banda 1 que cubre el área litoral o costero y aerosoles y la banda 9 o banda cirrus.



**Figura 69.-** Frecuencias de onda que capta cada Banda en Landsat 7 y Landsat 8

## 6.2. Metodología

Se han recolectado imágenes Landsat 5 y Landsat 7 disponibles en fechas cercanas a crecidas importantes del Río Pilcomayo, de acuerdo a caudales obtenidos en las estaciones de las ciudades Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP). Las imágenes fueron obtenidas del USGS para el periodo comprendido entre los años 1982 y 2013. 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 realizados dentro del mismo equipo de investigación del LH-CETA, ver la cita bibliográfica: Baldissone, 2011.

Una vez seleccionadas las imágenes se procede a la interpretación, identificando así los contornos de los espejos de agua para posteriormente calcular sus áreas y longitud máxima. Se obtuvieron 11 imágenes en total para los años 1995, 2005, 2006, 2008 y 2013.

La combinación de bandas seleccionada fue 5-4-3, infrarrojo medio (Banda 5), infrarrojo cercano (Banda 4) y rojo (Banda 3), que nos brinda información para delimitar agua continental y resalta ciertos detalles que no se observan en las bandas de espectros

visibles. Mientras más bandas infrarrojas utilicemos, con mayor precisión podremos ubicar lagos y ríos y en este caso particular las manchas de inundación. En esta combinación la vegetación se observa verde, permite ver diferencias de humedad y en general mientras más húmedo el suelo más oscuro aparece como consecuencia de la absorción infrarroja.

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

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

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

### 6.3. Resultados

#### 6.3.1. Análisis por crecida

A continuación se presentan diferentes apartados de acuerdo a los años de los desbordes registrados con las imágenes satelitales. Se presentan los hidrogramas así como también las imágenes satelitales ya procesadas dónde se han delimitado las áreas inundadas por los desbordes. Estos se identifican con diferentes colores los diferentes desbordes: Con Rojo "El Chañaral", con Cian "La Gracia", con Verde "La Puerta" y con marrón "Pozo Hondo".

Antes se presenta la Tabla 1 que resume la información que será de utilidad para continuar el análisis. En la primera parte de la tabla se detallan las fechas en que fueron obtenidas las imágenes satelitales, los caudales para estas fechas y los caudales pico así como su fecha de ocurrencia. También se ha calculado el tiempo entre los picos de crecida en Villamontes y Misión La Paz. A continuación en la misma tabla se ha realizado un resumen de las características de los desbordes, su longitud y área en el momento de la imagen satelital. Las imágenes están identificadas por el año y el día juliano (de 0 a 365), es decir, con el formato: aaaaddd.

**Tabla 15.-** Caudales pico del hidrograma de crecida y Caudales en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes.

Imagen	Fecha	Fecha del Pico VM	Qp VM m <sup>3</sup> /s	Fecha del Pico MLP	Qp MLP m <sup>3</sup> /s	Q VM m <sup>3</sup> /s	Q MLP m <sup>3</sup> /s	ΔT pico días	ΔT foto y pico días	Desbordes hacia Argentina		Desbordes hacia Paraguay					
										El Chañaral		La Gracia		Pozo Hondo		La Puerta	
										Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>
1999107	17/04/1999	22/03/1999	5609	24/03/1999	2079	532	337	2	24	61.37	178.68						
2005051	20/02/2005	15/02/2005	5335	16/02/2005	2973	539	743	1	4	19.59	32.10	12.02	60.97	13.96	35.42		
2006030	30/01/2006	23/01/2006	5321	24/01/2006	2539	850	955	1	6	21.53	36.51	36.04	108.42	6.25	14.92		
2006038	07/02/2006					559	527		14								
2006046	15/02/2006	13/02/2006	2743	15/02/2006	2445	1161	2445	2	0	20.89	59.67	7.58	5.39				
2006054	23/02/2006	13/02/2006	2743	15/02/2006	2445	348	474	2	8	28.07	46.91						
2008036	05/02/2008	26/01/2008	4402	28/01/2008	2867	771	929	2	8	61.00	158.74	37.56	136.23	8.90	10.60	12.89	23.61
2008044	13/02/2008					393	472		16	52.39	122.65	21.33	61.98				
2008060	29/02/2008	28/02/2008	2037	29/02/2008	2299	1076	2299		0	52.06	107.35	29.85	96.22			7.55	15.74
2008076	16/03/2008	11/03/2008	2297	13/03/2008	2422	904	1298	2	3	75.98	272.63	29.20	103.70	5.75	12.84	14.01	24.86
2013025	25/01/2013	18/01/2013	3860	23/01/2013	2446	964	573	5	2	42.38	135.00	28.27	111.72	14.21	20.09		

De la observación de las series de caudales (1961-2013), el caudal pico en Misión La Paz no supera los 4600 m<sup>3</sup>/s, y para el periodo de las imágenes no supera los 3000 m<sup>3</sup>/s independientemente del caudal pico aguas arriba en Villamontes, probablemente porque se encuentre regulada por los desbordes que ocurren unos kilómetros aguas arriba. Misión La Paz es una sección muy inestable con un cambio continuo en su geometría y cota de fondo, lo que obliga a calibrar la curva h-q con aforos después de cada crecida. Actualmente se afora tres veces a la semana.

A continuación se muestran los resultados del análisis de las imágenes

6.3.1.1. Año 1999

La crecida del año 1999 llegó a un caudal en VM de 5610 m<sup>3</sup>/s. Se puede ver en la Figura 71 que a 26 días aún persiste una gran mancha de inundación de 178,7 Km<sup>2</sup> en El Chañaral, y no se observa agua en las otras áreas de desborde. A partir de los hidrogramas de la Figura 70 se ha computado una diferencia de volúmenes entre ambas estaciones de 720 hm<sup>3</sup>. Llama la atención un caudal tan bajo en la estación MLP, quizás se pueda deber a problemas con la curva H-Q de esta estación.

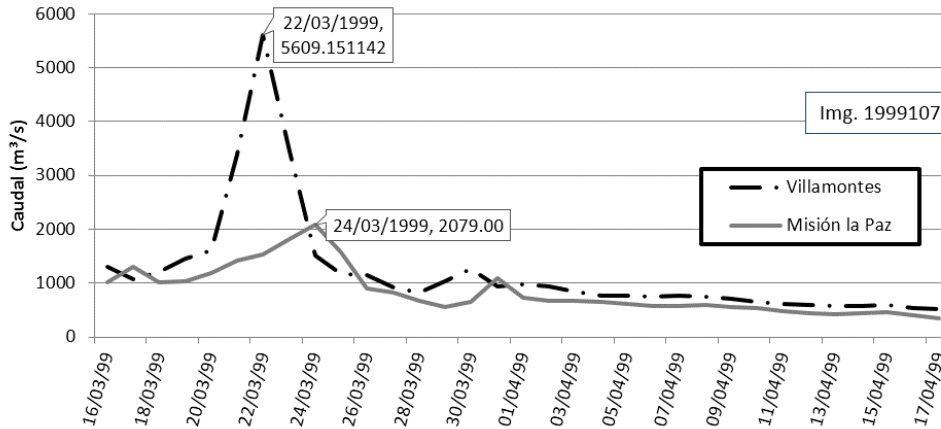


Figura 70.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 1999.

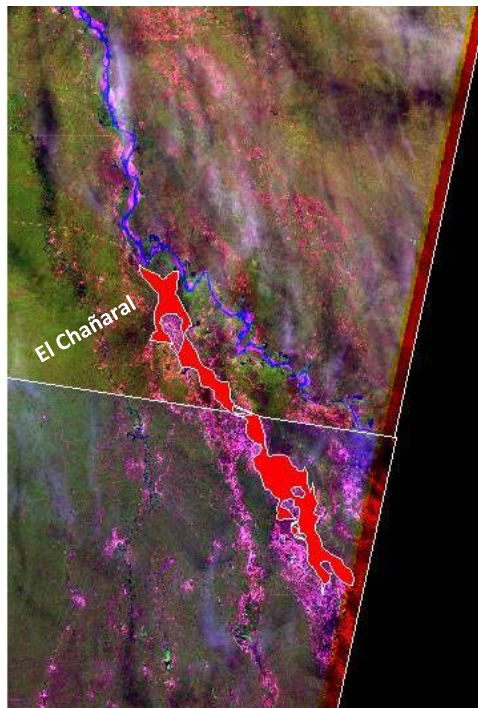


Figura 71.- Imagen 1999107 (17/04/1999)

### 6.3.1.2. Año 2005

Para este año la diferencia de volúmenes entre ambas estaciones es de 241 hm<sup>3</sup>, y se observa agua en tres desbordes: El Chañaral, La Gracia y en Pozo Hondo. En este caso hay mayor superficie cubierta de agua en La Gracia, y el área registrada en Pozo Hondo es la mayor de toda la serie de imágenes junto con la del año 2013. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 7 años.

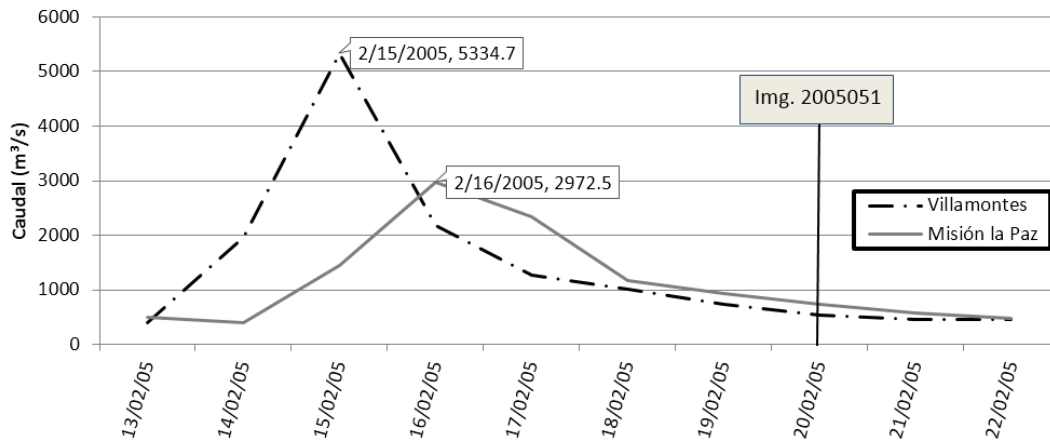


Figura 72.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2005.

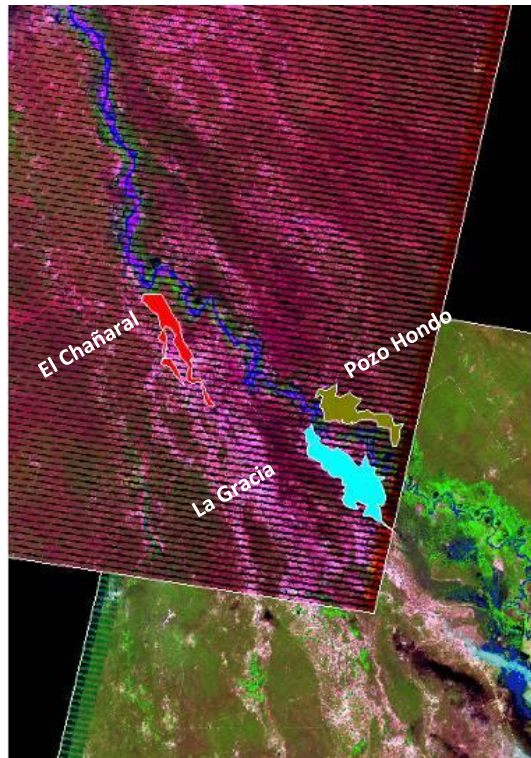


Figura 73.- Imagen 2005051 (20/02/2005).



6.3.1.3. Año 2006

Para este año se disponen de cuatro imágenes para el periodo comprendido entre el 12 de enero y el 25 de febrero. La diferencia de volúmenes de todo el periodo es 390 hm<sup>3</sup>, siendo hasta el 2 de febrero de 495 hm<sup>3</sup> y desde esa fecha hasta el fin del periodo, resulta un balance negativo en 105 hm<sup>3</sup>. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 3 años y si consideramos que hay dos picos cercanos, el periodo de retorno aumenta a 8 años con un caudal medio de 1897 m<sup>3</sup>/s durante 10 días.

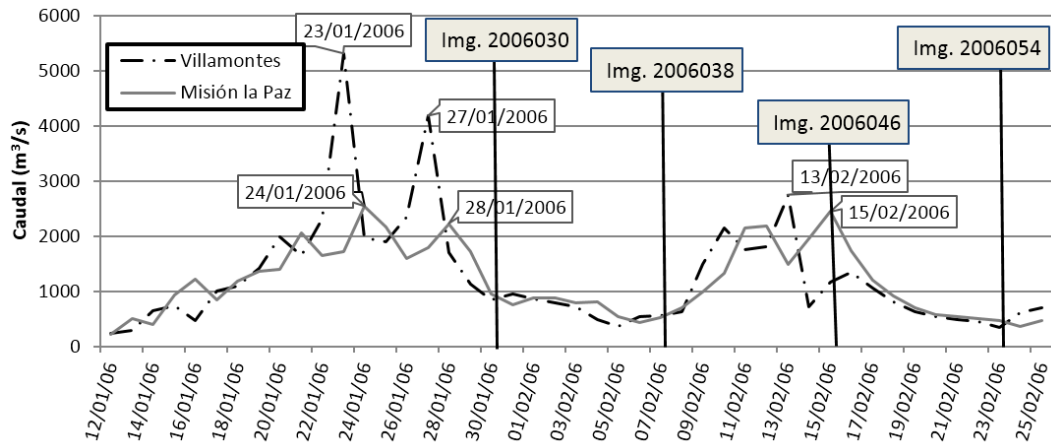


Figura 74.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2006.

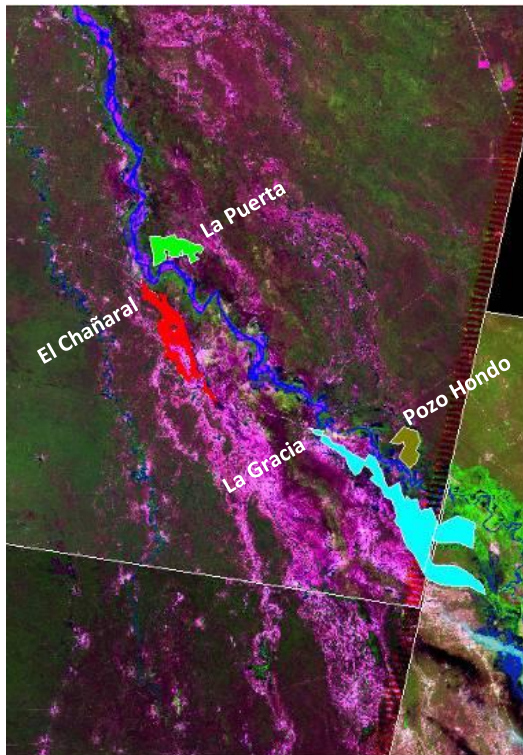


Figura 75.- Imagen 2006030 (30/01/2006)

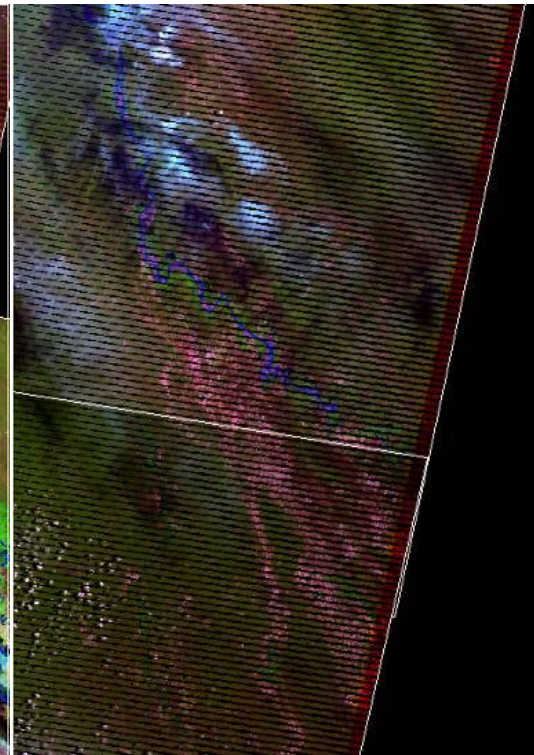


Figura 76.- Imagen 2006038 (07/02/2006).

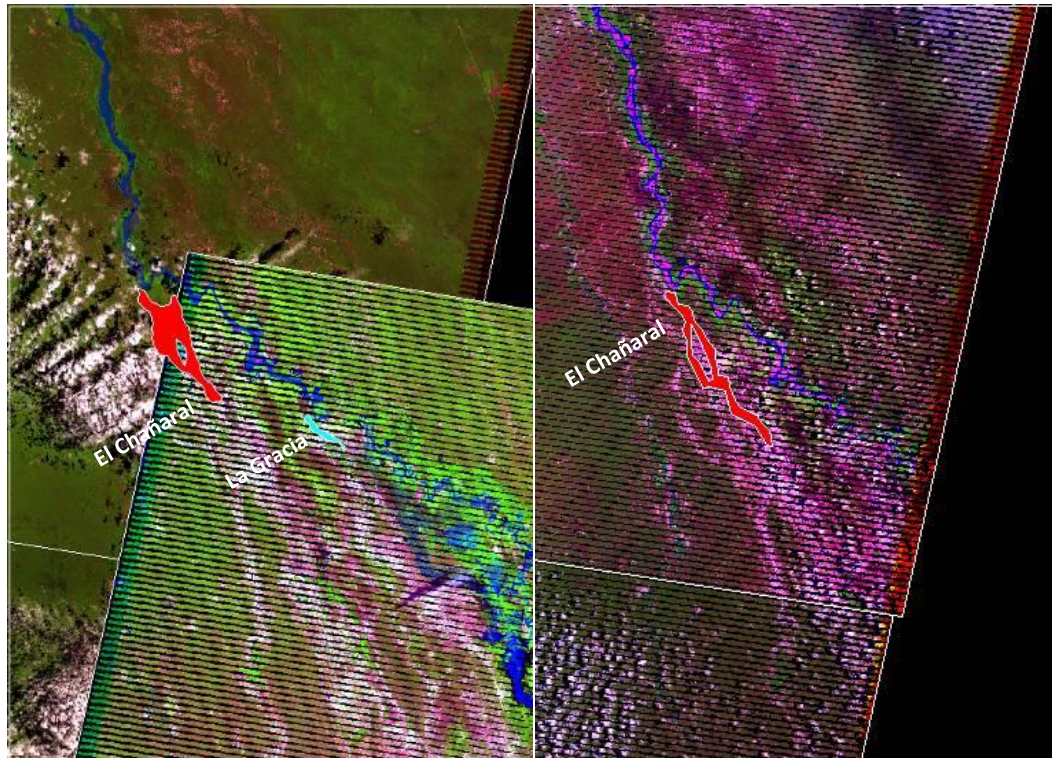


Figura 77.- Imagen 2006046 (15/02/2014).

Figura 78.- Imagen 2006054 (23/02/2014).

A partir de las imágenes de 2006, se observa que para el 7 de febrero ya no había agua en ninguna de las cuatro zonas inundables por desbordes, por lo que se puede estimar que el agua puede ser evacuada en 10 días desde el paso del último pico por MLP.

Para la próxima imagen de fecha 15 de febrero (Figura 77) hay zonas inundadas nuevamente, el caudal pico correspondiente a esta última fecha en VM ha sido de 2742,7 m<sup>3</sup>/s lo que hace pensar que El Chañaral desborda para un caudal en VM inferior a los 2700 m<sup>3</sup>/s. Además también ha desbordado La Gracia, por lo que se puede afirmar que para desbordar necesita un caudal también cercano a los 2700 m<sup>3</sup>/s, aunque superior al de "El Chañaral", al ser menor el área desbordada y su persistencia. La importancia de esta información reside en su posterior utilización para comparar o verificar resultados con los de un modelo hidrodinámico 1D y también para un modelo hidrodinámico 2D que se están desarrollando en el LH-CETA.

Además se puede ver que el pico pasa por MLP justo el día de la imagen ocupando un área de desborde de 59,7 km<sup>2</sup> y 8 días después, ya en la rama descendente del hidrograma, la superficie de agua en El Chañaral ha disminuido a 46,9 km<sup>2</sup>, es decir se ha reducido en 12,8 km<sup>2</sup>, un 21 %, aunque ahora con mayor longitud. Se podría estimar que el agua es evacuada a 1,6 km<sup>2</sup>/día, ya sea por infiltración, evaporación o escurrimiento. El frente avanzó 7,2 km en 8 días o se puede estimar una velocidad de avance de 900 m/día.

A partir de los datos anteriores también se concluye que los desbordes La Gracia, Pozo Hondo y La Puerta son capaces de eliminar el agua en un periodo inferior a los 12 días contando desde el último valor de caudal superior a los 2700 m<sup>3</sup>/s.



6.3.1.4. Año 2008

Para este año se disponen de cuatro imágenes para el periodo comprendido entre el 19 de enero y el 19 de marzo. La diferencia de volúmenes de todo el periodo es negativa en 340 hm<sup>3</sup>, lo que hace suponer que haya un error en la base de datos hidrológica, recordando nuevamente la inestabilidad de la sección MLP, en especial para los eventos entre el 22 de febrero y el 19 de marzo. El volumen acumulado hasta el 13 de febrero es de 90 hm<sup>3</sup>. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 9 años, no obstante, debido a que se sucedieron dos picos en poco tiempo el periodo de retorno es de 17 años, con un caudal promedio de 2130 m<sup>3</sup>/s durante 10 días.

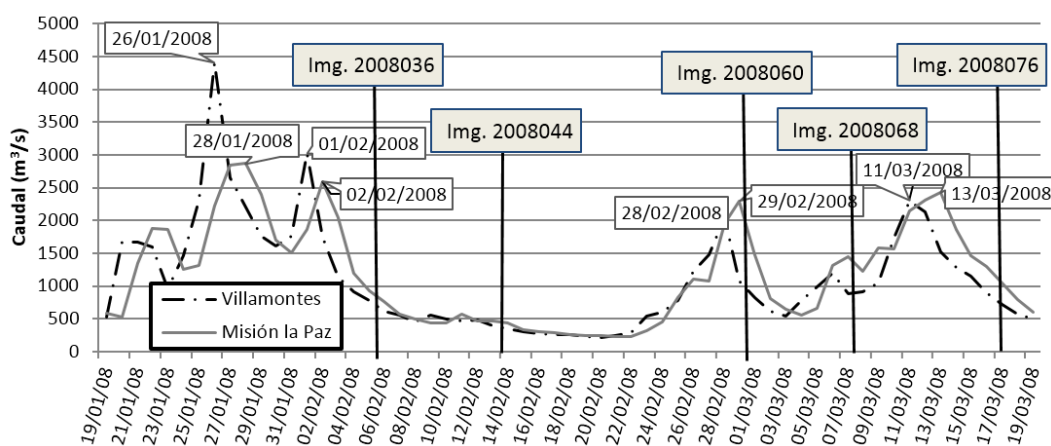


Figura 79.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2008.

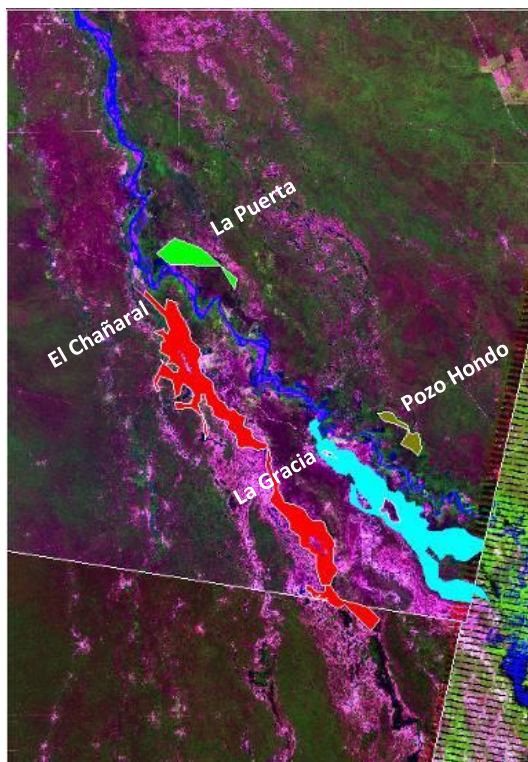


Figura 80.- Imagen 2008036 (05/02/2008).

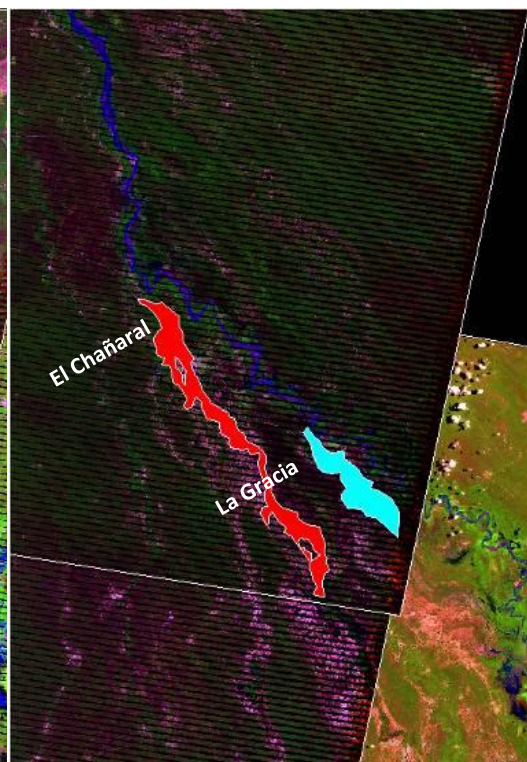


Figura 81.- Imagen 2008044 (13/02/2008).

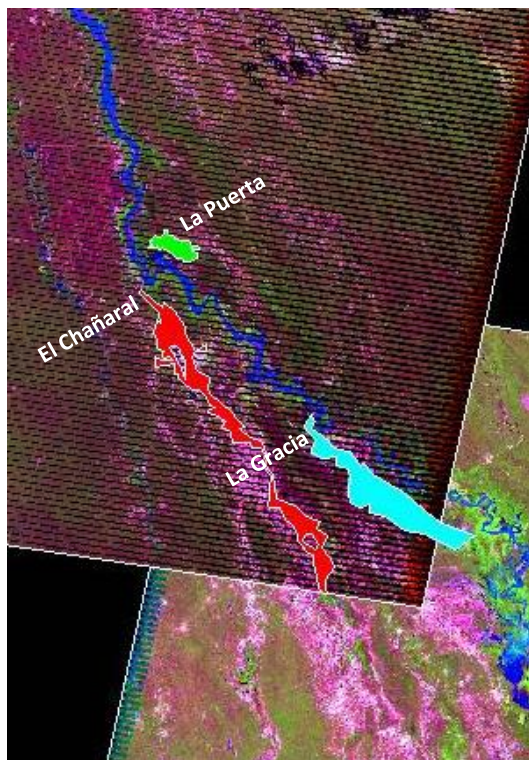


Figura 82.- Imagen 2008060 (29/02/2008).

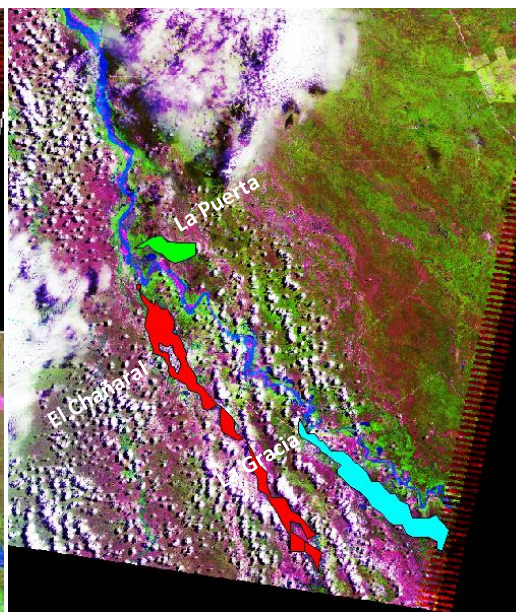


Figura 83.- Imagen 2008068 (16/03/2008).

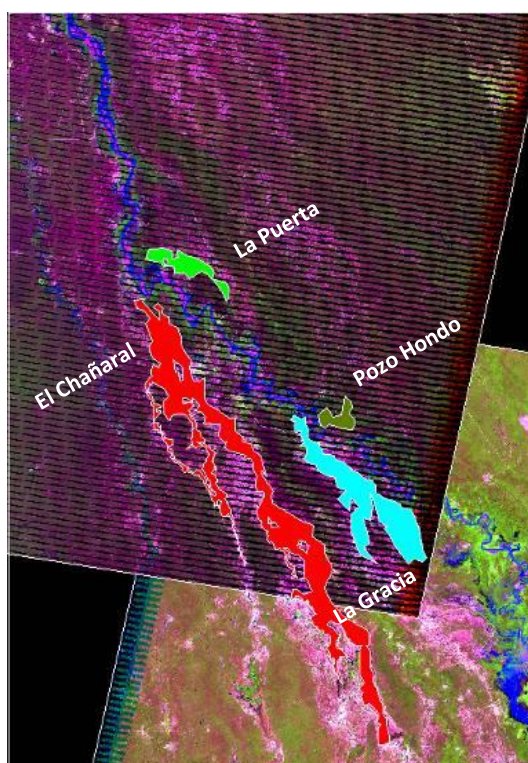


Figura 84.- Imagen 2008076 (16/03/2008).

Se observa en las imágenes del 5 de febrero y el 13 de febrero, que se han secado las áreas de los desbordes Pozo Hondo y La Puerta en 8 días, o 12 si se cuenta desde el paso del pico por MLP. A su vez se observa que El Chañaral ha disminuido un 23 %, en 36,1 km<sup>2</sup> (4,5 km<sup>2</sup> por día) y La Gracia un 55 % en 74,2 Km<sup>2</sup> (9,3 km<sup>2</sup>/día). Nuevamente se puede afirmar que en 12 días se han secado las áreas de La Puerta y Pozo Hondo.



Además entre el 14 y el 29 de febrero, con la imagen obtenida el día del pico del hidrograma de MLP, ha aparecido un área de desborde en La Puerta, desbordando antes que Pozo Hondo, el área de El Chañaral aumentó en 15 km<sup>2</sup> un 12 % y en La Gracia en 34 km<sup>2</sup> un 55 %. Ya para el día 16 de marzo, después de otro pico de crecida, ha desbordado "Pozo Hondo" lo que nos permitiría obtener una aproximación al caudal necesario para que éste se produzca, una vez corregido el hidrograma, tarea que se está llevando adelante en este momento.

### 6.3.1.5. Año 2013

Durante la crecida de este último año se llegó a un caudal en VM de 3860 m<sup>3</sup>/s. La imagen es de dos días después de cuando el pico de la crecida pasa por MLP. Se observan áreas inundadas en el Chañaral, La Gracia y Pozo Hondo, además de un nuevo desborde, no registrado en imágenes previas, 17 km por el cauce al Norte de donde se localiza la Zona de Desborde La Puerta. Además en la zona de El Chañaral hay un brazo de desborde que no se ha observado antes tampoco. Se ha computado una diferencia de volúmenes entre ambas estaciones de 285 hm<sup>3</sup>. El periodo de retorno, utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 es de 2,50 años para MLP.

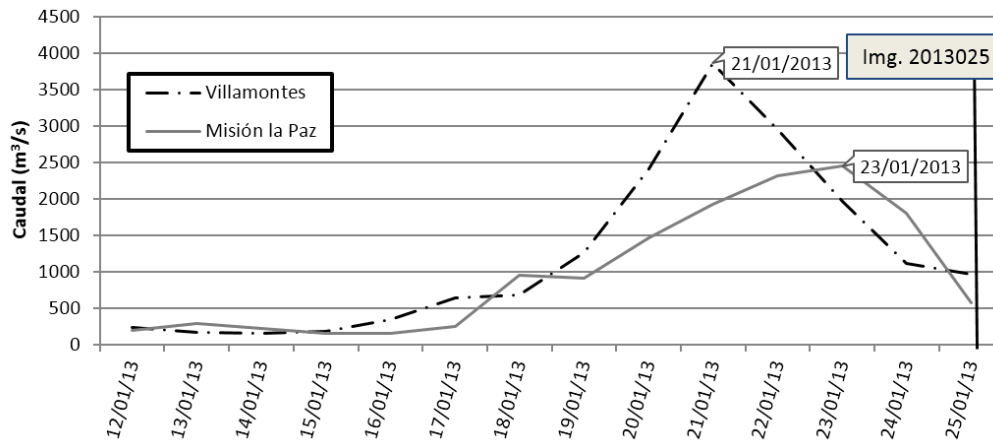


Figura 85.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2013

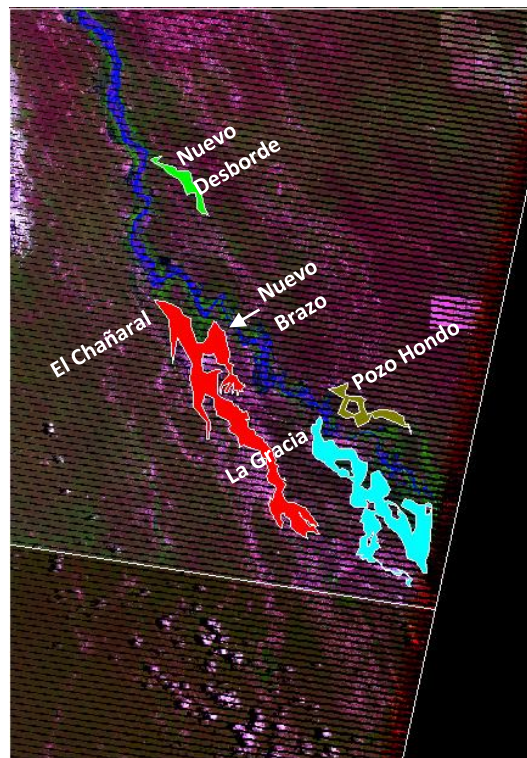


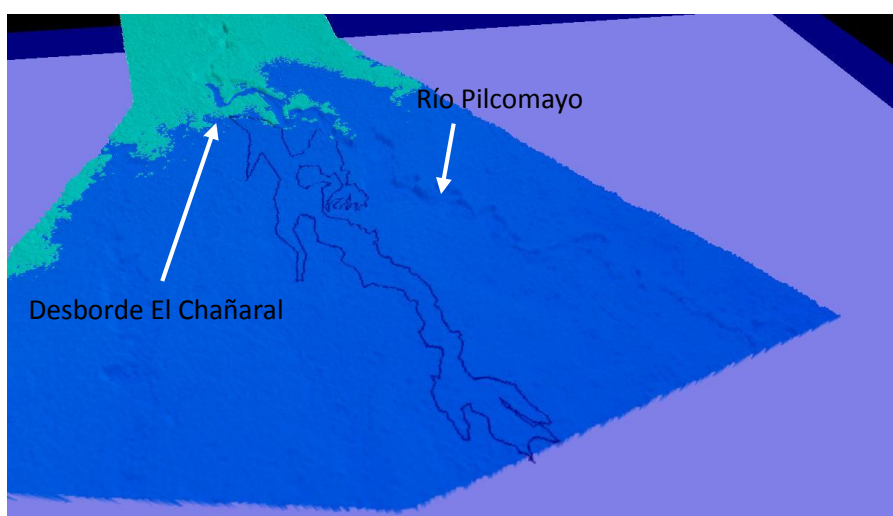
Figura 86.- Imagen 2013025 (25/01/2013).

### 6.3.2. *Análisis por desborde*

#### 6.3.2.1. Desborde El Chañaral

El desborde denominado el Chañaral es el más importante de los cuatro desbordes principales del tramo 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 analizados.

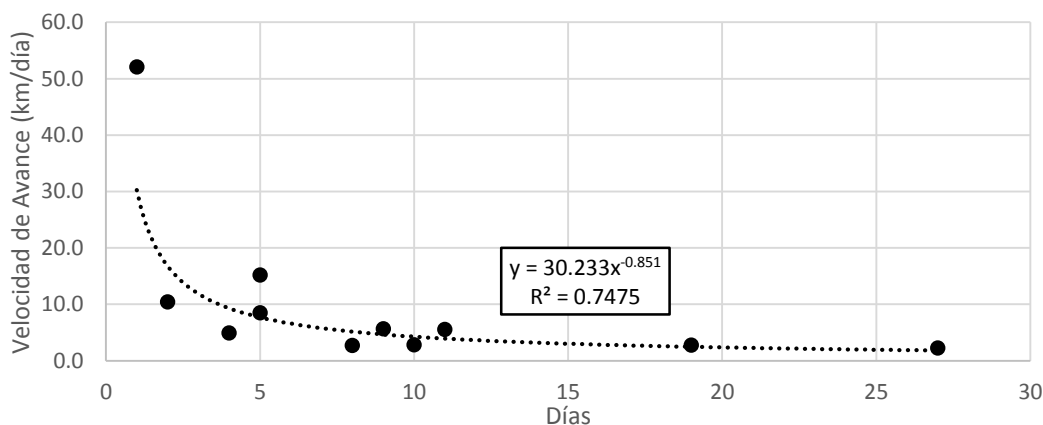
Según el Modelo Digital de Terreno a partir de SRTM (Capítulo 7.2) este desborde se activa a la cota 273,85 msnm (Figura 87). Este desborde rodea la ciudad de Santa Victoria, que cuenta con un anillo de defensa. Otras poblaciones afectadas por este desborde son: Pozo El Tigre, La Ovejería, Monte Cristo, Chañares Altos, Amberes y Campo Largo.



**Figura 87.-** Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de El Chañaral, 273 m.

El desborde El Chañaral es el primero en activarse de los cuatro desbordes principales y se activa para caudales de 2700 m<sup>3</sup>/s en Villamontes, que equivale a una lectura de 5,40 m en esta estación.

Se calculó la relación entre la velocidad de avance y los días transcurridos entre el primer caudal mayor a 2700 m<sup>3</sup>/s, para el que se activa el desborde en El Chañaral y la obtención de la imagen satelital. Por ejemplo, en 2013 la longitud de la mancha de inundación es de 42 km y hay 5 días de diferencia entre el día que el caudal supera los 2700 m<sup>3</sup>/s (20/01/2013) y el día de la imagen (25/01/2013). La velocidad de avance es de 8,50 km/día. Una vez obtenida la velocidad de avance, que de la forma obtenida es una velocidad media para la ventana de tiempo, en este caso 5 días, se grafican las velocidades de avance vs el tiempo en el que se promedia obteniéndose la Figura 88.



**Figura 88.-** Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, El Chañaral.

Se observa que la mancha cubre una gran longitud en poco tiempo los primeros días y luego comienza a avanzar con mayor lentitud. Esto se debe a que va aumentando la resistencia al movimiento y es un valor importante de entrada para trabajos futuros donde se intentará modelar los desbordes. La ecuación que mejor representa este comportamiento para El Chañaral es

$$Vel = 30,233 l^{0,851}$$

*Vel* es la velocidad de avance y *l* la longitud de la mancha.

#### 6.3.2.2. Desborde La Gracia

El desborde la Gracia se encuentra a los 22° 22 ' de Latitud Sur 62° 32 ' de Longitud Oeste sobre margen derecha del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia argentina, unos 5 km aguas arriba de MLP. Este desborde afecta principalmente a las poblaciones de Misión La Gracia, Misión La Paz y Las Vertientes y a su vez tiene influencia sobre la infraestructura como la Ruta Provincial N°58. La dirección predominante es N-SE. Se ha calculado con el MDT del SRTM que la cota a la que se activa este desborde es de 256 msnm.

El desborde La Gracia es el segundo en activarse y se activa a caudales mayores a los 2700 m<sup>3</sup>/s en Villamontes.

Este desborde tampoco retorna al cauce del Río Pilcomayo. No obstante en el año 2008, con un periodo de retorno calculado de 17 años, el desborde llegó a unirse al canal argentino en La Embocadura, alimentando después el Bañado La Estrella.



Figura 89.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de La Gracia, 256 msnm.

Se graficó en la Figura 90 para el Desborde La Gracia la relación entre la velocidad de avance y los días transcurridos entre el primer caudal mayor a 2700 m<sup>3</sup>/s, para el que se activa el desborde en El Chañaral y la obtención de la imagen satelital. Se toma como referencia el Desborde del Chañaral, para simplificar la obtención de los resultados, no obstante La Gracia se activa para un caudal en VM un poco mayor. Se observa un comportamiento lineal, aumentando la velocidad media de avance a medida que transcurren los días. Esto se corresponde con una situación dónde va disminuyendo la resistencia al flujo a medida que avanza el frente de inundación.

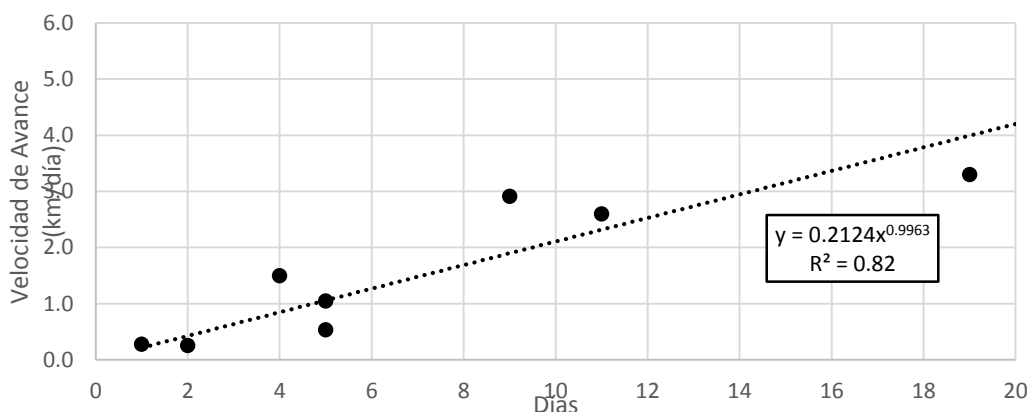


Figura 90.- Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, La Gracia.

La ecuación que mejor representa este comportamiento para La Gracia es:

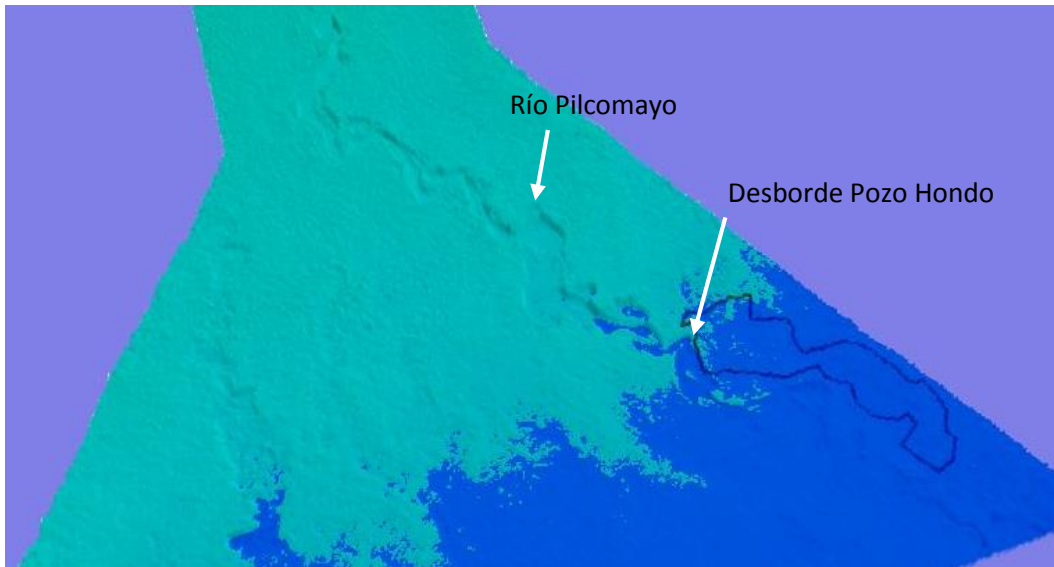
$$Vel = 0,2124 t$$

### 6.3.2.3. Desborde Pozo Hondo

El desborde Pozo Hondo se encuentra a los 22° 21 ' de Latitud Sur 62° 31 ' de Longitud Oeste sobre margen izquierda del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia Paraguay, unos 6 km aguas arriba de MLP. La dirección predominante es E-SE orientándose hacia los 110° respecto al Norte.

El desborde Pozo Hondo se activa para caudales mayores a 3000 m<sup>3</sup>/s en la estación de Villamontes, equivalente a una lectura de escala de 5,80 m.

Este desborde afecta a la población de Pozo Hondo. A partir del Modelo Digital de Terreno de SRTM, se ha establecido su cota de desborde como 258 msnm.



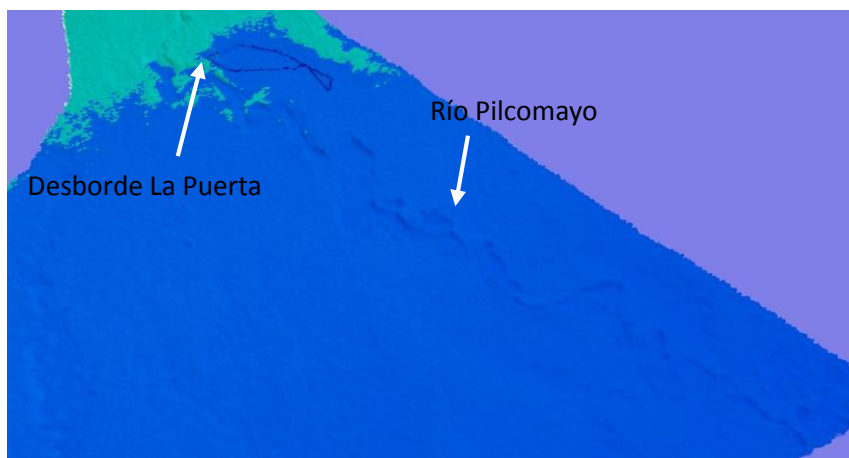
**Figura 91.-** Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde Pozo Hondo, 258 msnm.

#### 6.3.2.4. Desborde La Puerta

El desborde La Puerta se encuentra a los  $22^{\circ} 07'$  de Latitud Sur  $62^{\circ} 45'$  de Longitud Oeste sobre margen izquierda del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia Paraguay, unos 47 km aguas arriba de MLP por el cauce o 37 km lineales. La dirección predominante es E-SE orientándose hacia los  $110^{\circ}$  respecto al Norte.

El desborde la Puerta se activa para caudales en VM próximos a los  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ , equivalente a una lectura de escala 6,20 m.

Este desborde afecta a los parajes paraguayos de: La Victoria, Bañadero y Tuscal. A partir del Modelo Digital de Terreno de SRTM, se ha establecido su cota de desborde como 275 msnm (Figura 92).



**Figura 92.-** Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde La Puerta, 275 msnm.



### 6.3.3. *Análisis de los desbordes en su conjunto*

Se representaron en una misma figura todas las áreas inundadas por desbordes registradas, los que se presentan en la Figura 93. 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, el desborde el Chañaral inundó además del trayecto usual una porción al este. 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.

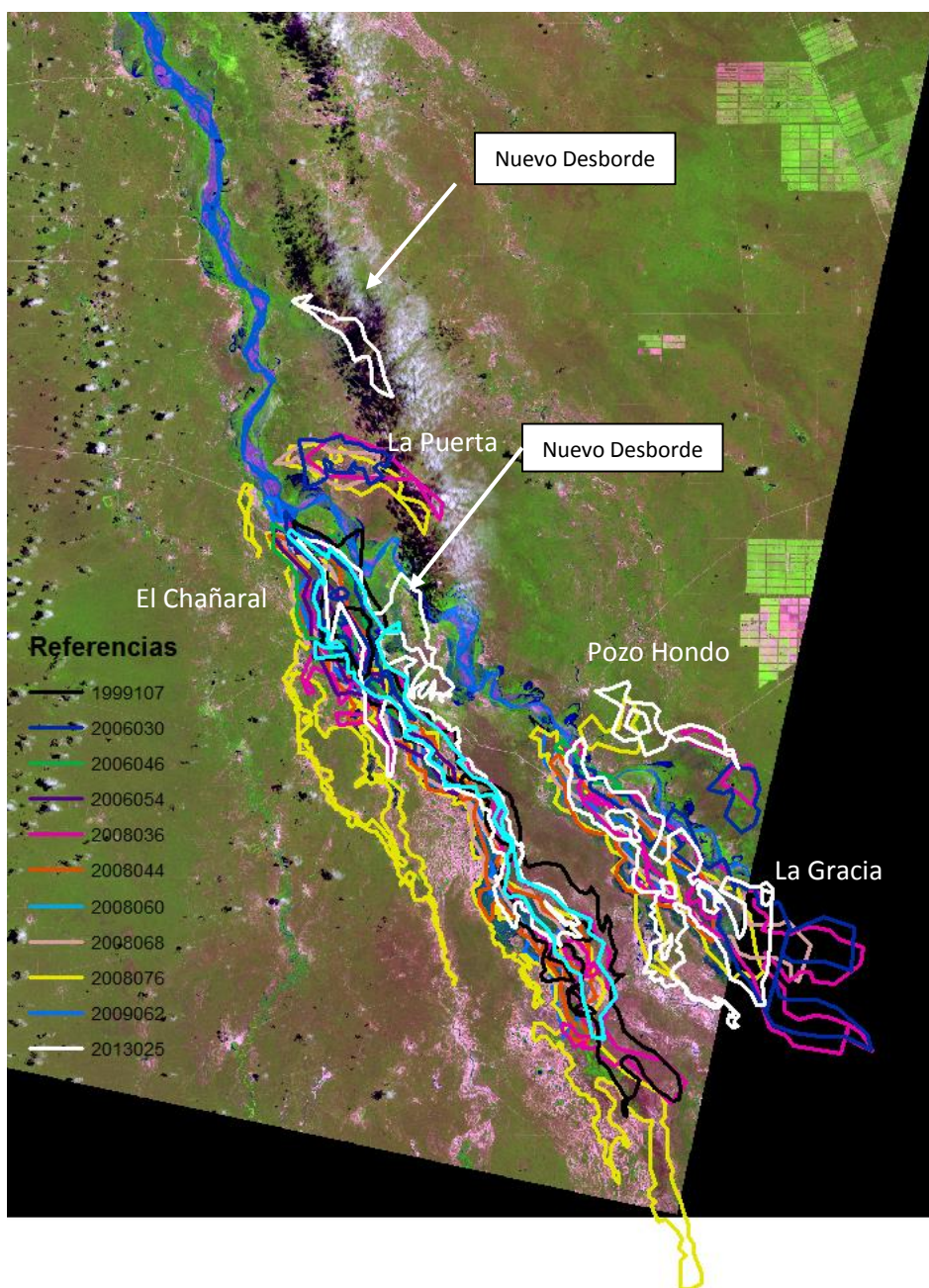


Figura 93.- Superposición de Desbordes.

La Figura 94 presenta la trayectoria de los distintos desbordes, obtenida como la suma de las diferentes manchas de inundación.

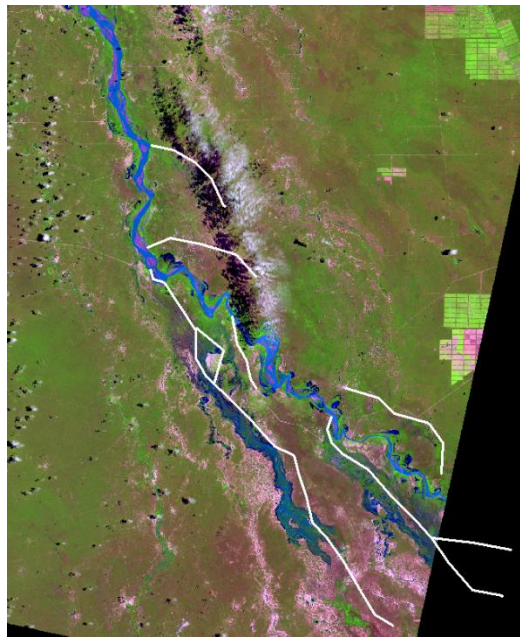


Figura 94.- Trayectoria de los Desbordes.

Se han graficado las áreas de las superficies inundadas por los desbordes versus los caudales tanto medio diario, como caudal pico en las estaciones VM y MLP sin encontrar una relación directa. En la Figura 95 se observa una de estas gráficas. Probablemente se pueda encontrar una relación entre los volúmenes por encima de los caudales de desborde y las áreas de inundación, tarea que se propone para un futuro trabajo dentro del LH-CETA.

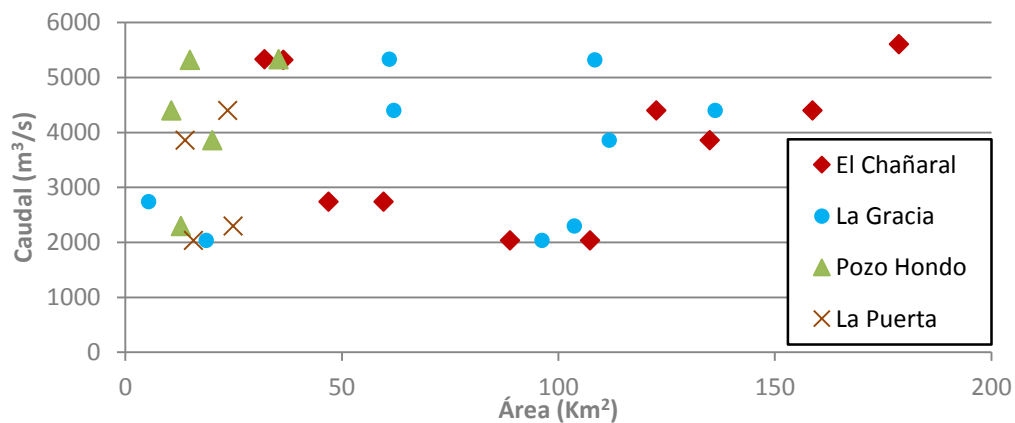


Figura 95.- Curva que relaciona el área cubierta por los desbordes con los caudales pico en VM.

Hay una relación entre las áreas desbordadas y la longitud de cada una de estas, válida para todos los desbordes, que se presentan en la siguiente figura. La utilidad de esta figura reside en que una vez obtenida la longitud del desborde, como puede ser a partir de la Figura 88 y la Figura 90 a partir de la velocidad de avance y días transcurridos desde el desborde, se obtiene el área inundada. Esta figura tiene validez para los cuatro desbordes estudiados.

#### 6.4. Conclusiones

Las imágenes satelitales han permitido delimitar las áreas inundadas y junto con los hidrogramas de crecidas se ha podido estimar los caudales para los que se activan los desbordes. Los desbordes principales en el tramo Villamontes - Misión La Paz son "El Chañaral" y "La Gracia" ambos vierten sus aguas para Argentina. Los desbordes "La Puerta" y "Pozo Hondo", de menor magnitud superficial, vierten sus aguas al Paraguay.

Se han podido localizar 2 zonas de desborde que, según los registros por imágenes, se activan por primera vez en el año 2013.

A través del análisis realizado se concluye que El Chañaral y La Gracia han desbordado para caudales de 2700 m<sup>3</sup>/s, siendo el caudal requerido para que desborde La Gracia superior al de El Chañaral, situación que se puede concluir al observar que en la serie de imágenes se encuentra siempre inundando primero las áreas correspondientes al Chañaral. Todos los desbordes se encuentran activos para caudales en VM de 3500 m<sup>3</sup>/s.

Así mismo se ha evaluado el efecto de los desbordes en MLP que regulan el caudal que llega a esta ciudad, que para el periodo en estudio, no supera los 3000 m<sup>3</sup>/s incluso si el caudal en VM es cercano a los 7000 m<sup>3</sup>/s.

Se ha determinado que para una diferencia de volúmenes de 495 hm<sup>3</sup> entre VM y MLP, en el año 2006, en 10 días desde el paso del pico por Misión La Paz se logra evacuar toda el agua de las zonas inundadas por los desbordes. En el año 2008 se observó mayor persistencia de la mancha de inundación, evacuándose en 12 días el agua de los desbordes de Pozo Hondo y La Puerta, encontrándose todavía agua en los desbordes El Chañaral y La Gracia.

Se ha establecido que se podría hablar de una referencia de tasa de reducción de área inundada de 1,9 a 4,5 km<sup>2</sup>/día para El Chañaral y de 7,5 a 9 km<sup>2</sup>/día para La Gracia.





## 7. Modelación Digital del Terreno

El conocimiento del factor topográfico es un insumo básico para realizar la modelación matemática. Para modelar el tramo entre Villamontes y Misión la paz se han utilizado lo que se conocen como Modelo de Elevación Digital (DEM), obtenidos a partir de imágenes ASTER GDEM y SRTM. Se han comparado las dos para tener una idea más acabada de cuál representaría mejor el tramo en estudio.

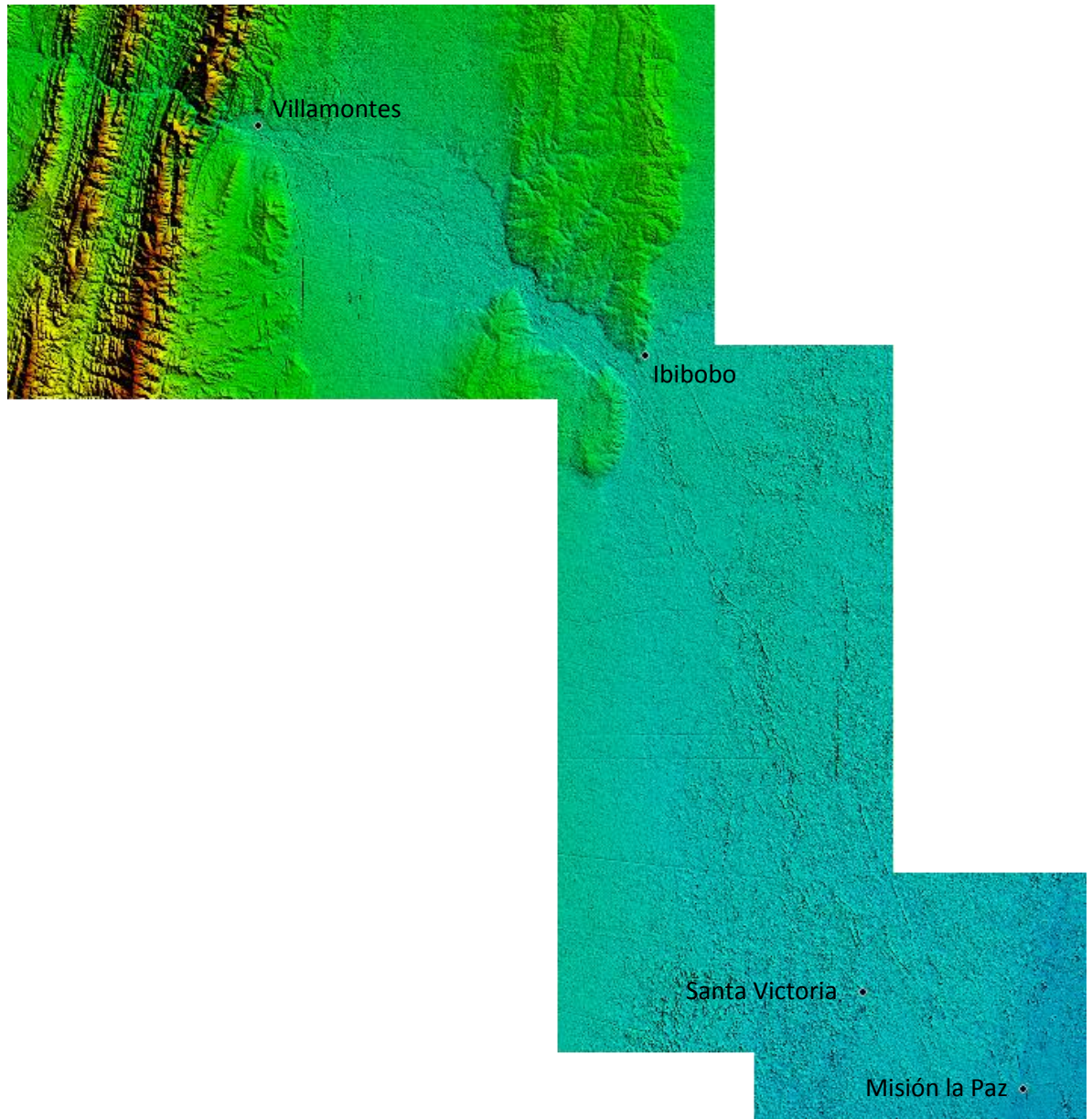
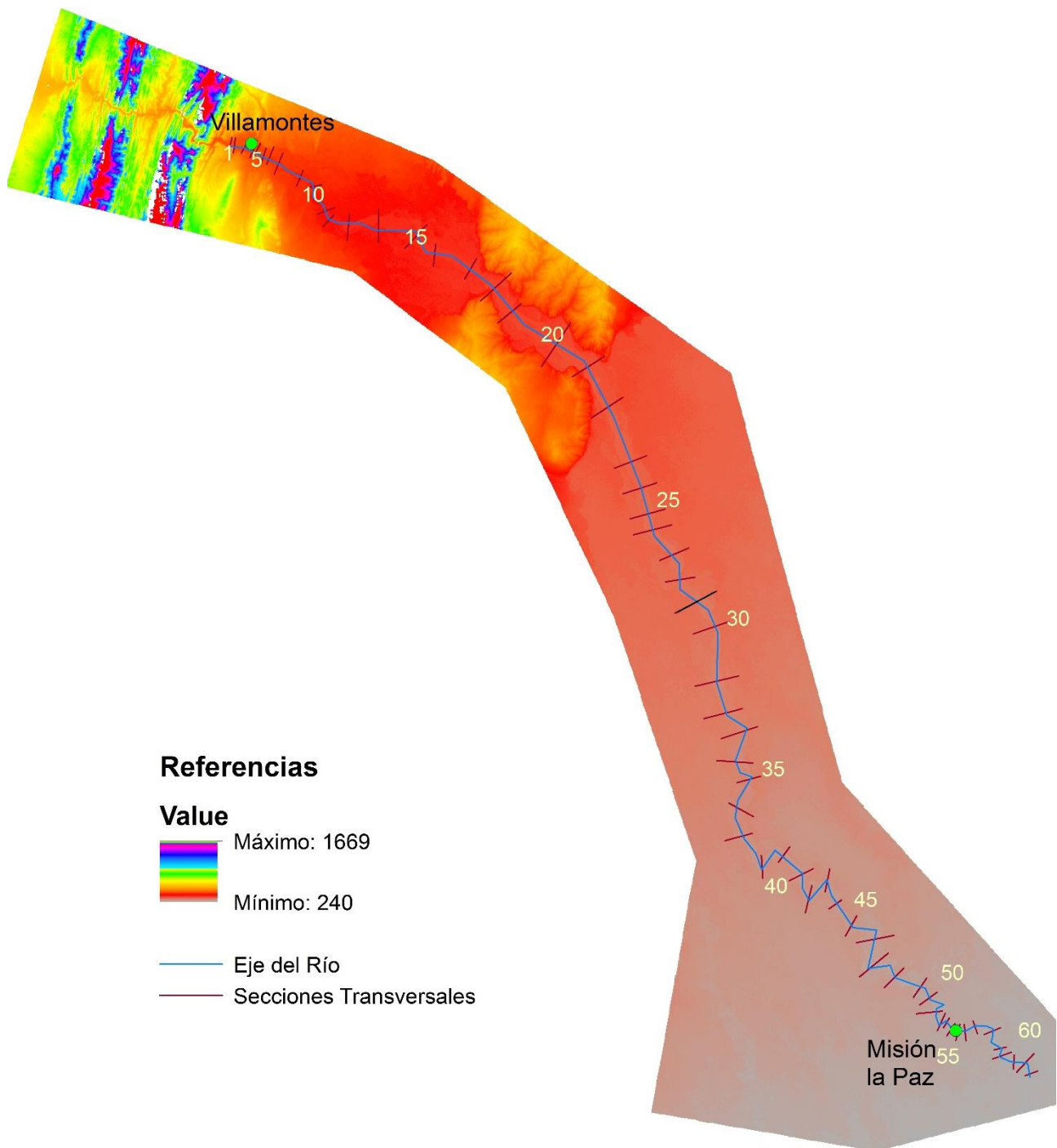


Figura 96.- Topografía ASTER, Río Pilcomayo y localidades de referencia.

Se han tomado 62 secciones transversales (Figura 97) para realizar la modelación numérica 1D cubriendo desde Villamontes a Misión La Paz, aproximadamente una longitud de 220 km y un área de 750 km<sup>2</sup>.



**Figura 97.**-Secciones en el tramo Villamontes a Misión La Paz por el Río Pilcomayo, fondo DEM de SRTM.

La Figura 98 presenta la topografía según SRTM, la Figura 99 según ASTER\_GDEM y la Figura 100 presenta la diferencia entre ambas.

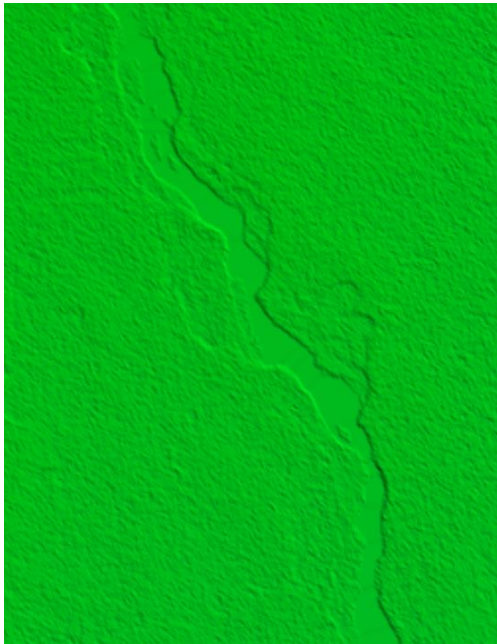


Figura 98.- Imagen SRTM

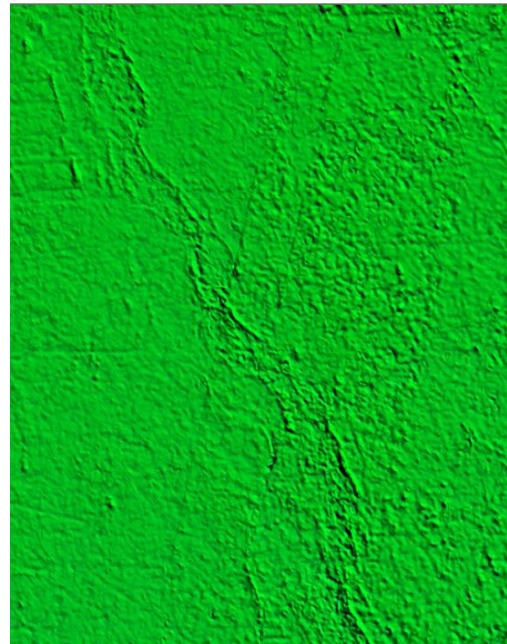


Figura 99.- Imagen ASTER

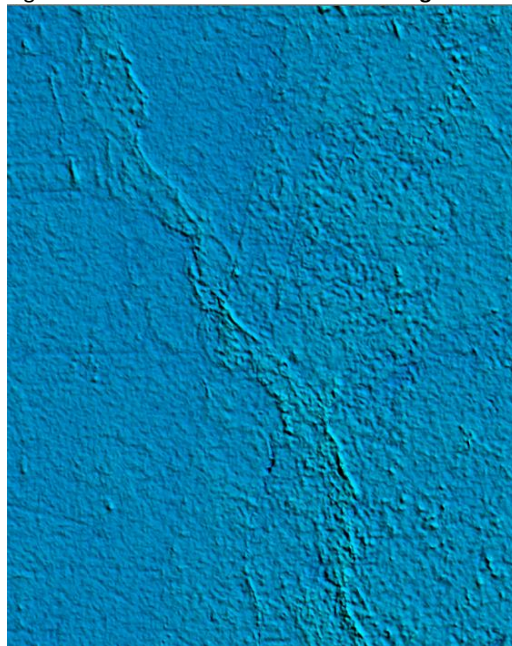


Figura 100.-Diferencia entre Imágenes ASTER y SRTM

EL SRTM consiste en un sistema de radar modificado que viajó a bordo de un taxi espacial en una misión de 11 días durante febrero de 2000. En este mes las aguas del Pilcomayo son altas, para esta fecha se registraron caudales de hasta 1713 m<sup>3</sup>/s en la estación de Misión La Paz.

No es posible saber en qué fecha fue obtenida la imagen ASTER GDEM debido a que es el resultado de la combinación de varias imágenes que cubren el área para lograr una conexión más suave con las áreas colindantes.



### 7.1. Modelo Digital del Terreno ASTER-GDEM

La NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, conocido como METI, han diseñado un nuevo mapa topográfico digital: ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model), creado a partir de casi 1,3 millones de imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Este radiómetro es uno de los cinco instrumentos de observación de la Tierra que viajan a bordo del satélite americano Terra, lanzado en diciembre de 1999.

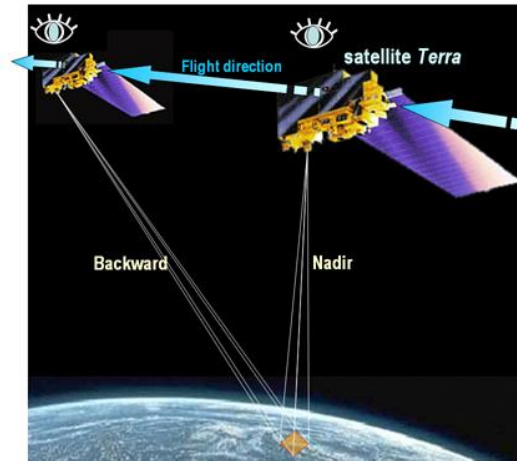


Figura 101.-Representación satélite Terra – ASTER-GDEM

ASTER recoge las imágenes del espectro visible y también las regiones de longitud de onda de las radiaciones térmicas infrarrojas, con resoluciones espaciales que van desde 15 a 90 metros. La Tabla 16 presenta las características principales de los productos ASTER-GDEM. Este nuevo mapa abarca 99% de la superficie del planeta y se encuentra disponible en internet sin costo alguno.

Tabla 16.- Características MDT de ASTER-GDEM (ERSDAC 2003).

Parámetro	AGDEM
Sistema	VNIR/SWIR/TIR
Repetición	16 días
Rango espectral (bandas 3N y 3B)	0,78 - 0,86 $\mu\text{m}$
Ancho de barrido	60 Km
Producto	
Precisión vertical relativa	10 m
Precisión vertical absoluta	7 m
Precisión horizontal relativa	10 m
Precisión horizontal absoluta	7 m
Resolución espacial	1" (~30 m)
Datum	WGS84

### 7.2. Modelo Digital del Terreno SRTM

La SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM) fue un proyecto conjunto entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). La misión se desarrolló durante 11 días del mes de Febrero del 2000, y el objetivo fue generar datos



topográficos digitales para el 80% de la superficie de la tierra, entre las latitudes 60° Norte y 56° Sur, con puntos ubicados en una grilla de 1 arco-segundo en latitud y longitud, aproximadamente 30 m. La misión SRTM utilizó la técnica conocida como interferometría radar, en la que dos imágenes radar se toman de un mismo sitio desde dos posiciones diferentes. Se montaron dos antenas en el trasbordador, una, emisora y receptora sobre el trasbordador en sí, y otra receptora en un brazo extensible de 60 metros de longitud. El procesamiento de la información captada por ambas antenas generó un modelo digital de elevación de la superficie terrestre.

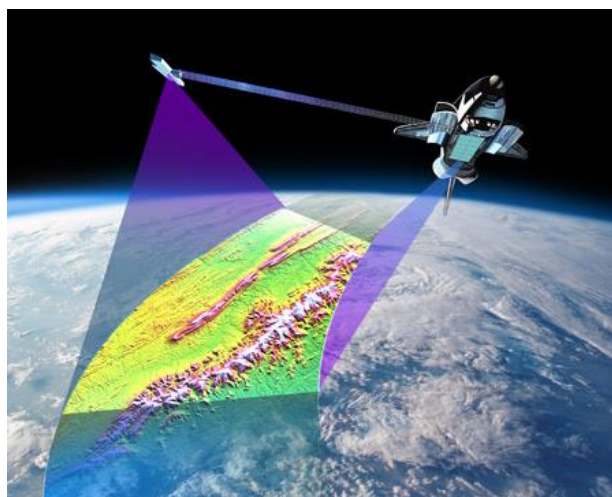


Figura 102.-Representación taxi espacial SRTM (CIAT 2014)

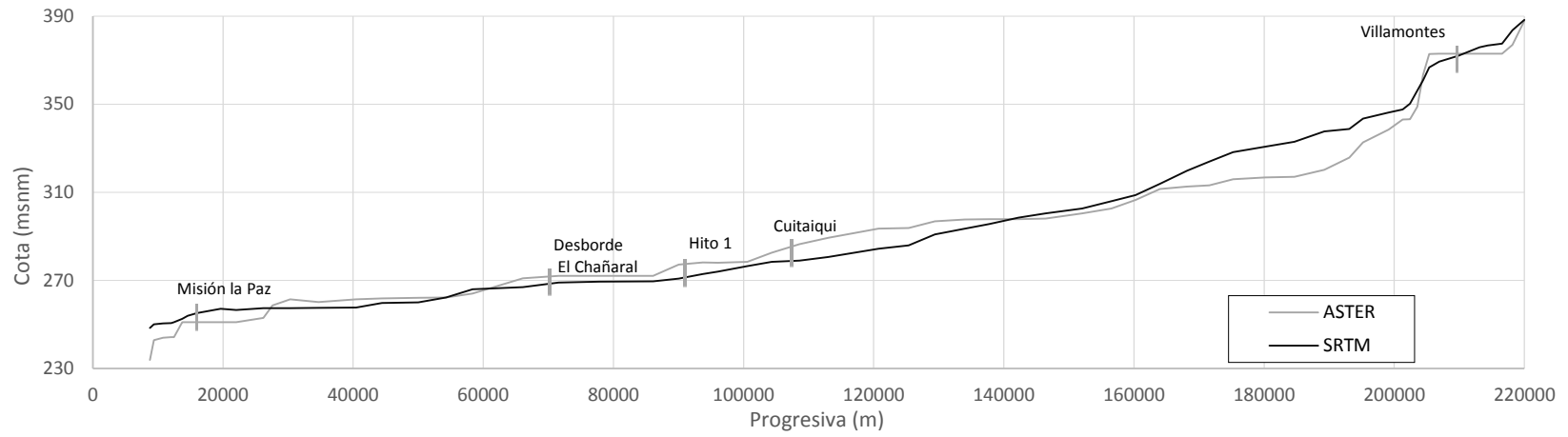
El USGS (United States Geological Survey) es el responsable de publicar la información de esta misión. En Junio del 2003 se pusieron a disposición del público los datos para América del Sur, con una resolución espacial de 90 metros y resolución vertical entre 6 y 16 metros. La Tabla 17 presenta las características principales de los productos SRTM. Se espera que en este año, 2015, se publique la información con resolución de 30 m.

Tabla 17.- Características MDT de SRTM (USGS 2014),

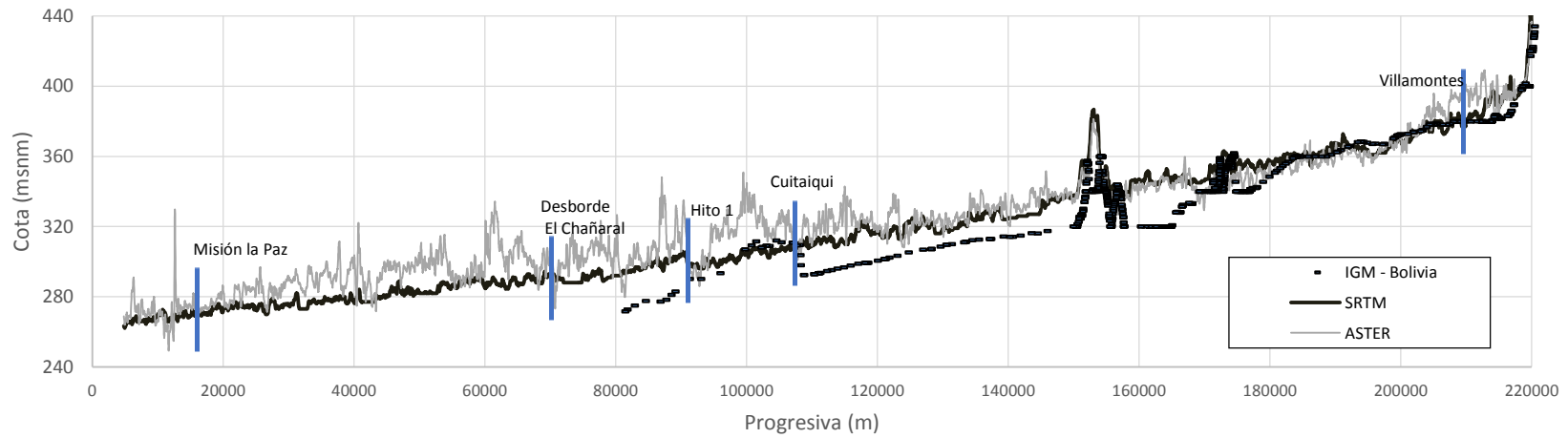
Parámetro	Banda C	Banda X
Sistema		
Longitud de onda	5,6 cm	3,1 cm
Frecuencia	5,3 GHz	9,6 GHz
Ancho de barrido	225 Km	50 Km
Producto		
Precisión vertical relativa	10 m	6 m
Precisión vertical absoluta	16 m	16 m
Precisión horizontal relativa	15 m	15 m
Precisión horizontal absoluta	20 m	20 m
Resolución espacial	1" (~30 m)	1" (~30 m)
Datum vertical	EGM96	WGS84
Datum horizontal	WGS84	WGS84

### 7.3. Comparación de Modelos Digitales del Terreno

Se compararon los perfiles longitudinales obtenidos mediante ASTER GDEM y SRTM, observándose que el SRTM da pendientes más suaves, mientras el ASTER presenta mayor variabilidad (Figura 103 y Figura 104).



**Figura 103.-**Comparación de los perfiles longitudinales según ASTER GDEM y SRTM.



**Figura 104.-**Perfiles longitudinales por margen derecha a partir de ASTER, SRTM y cartografía IGM-Bolivia.

En el tramo de estudio se compararon varias secciones encontrándose en algunas una mayor similitud y en otras una gran diferencia entre ambos DEM (Figura 105).

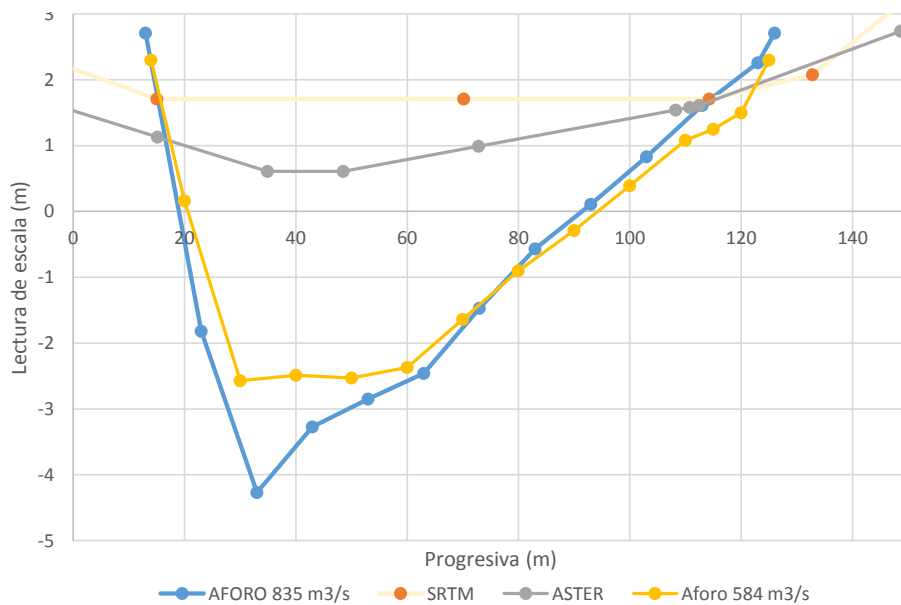


**Figura 105.-**Comparación de topografías extraídas de ASTER GDEM y SRTM en Diferentes secciones transversales a lo largo del Río Pilcomayo

También se compararon las secciones de los aforos con las proporcionadas por los modelos digitales de terreno SRTM y ASTER. Se desplazaron las secciones de SRTM y ASTER hasta hacer que coincida el ancho de la superficie de agua de los aforos con las márgenes de los DEM.

Se observó así, que el SRTM presenta, en el punto correspondiente al talweg, un nivel de superficie de agua de 1,30 m por encima del ASTER, y 4,30 m con el nivel de la superficie de agua del aforo del día 24 de febrero de 2013 ( $Q= 584 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Para una lectura de escala de 1,7 m, según la curva H-Q de Villamontes, corresponde un caudal de  $230 \text{ m}^3/\text{s}$  en el caso del SRTM. Para el ASTER, tomando una lectura de escala de 0,80 m y 1,00 m el caudal correspondiente sería  $33 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $48 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente.

A partir del ancho superficial medido sobre imágenes satelitales se desciende el fondo del cauce para que pueda transportar estos caudales sin consumir sección del MDT, con la ventaja, además, que ayuda a la estabilidad de la modelación.



**Figura 106.-** Sección de VM según MDT ASTER, SRTM y dos aforos con  $835 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $584 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal.

Para el caso de la sección de Misión La Paz se presenta mayor irregularidad entre las secciones. Se toma como valor de Caudal Inicial  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  tanto para ASTER como SRTM.

## **8. Modelación Numérica**

El tránsito de caudales tiene como objetivo determinar el tiempo y la magnitud del caudal, es decir, el hidrograma en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos aguas arriba. Si el flujo es una creciente, el procedimiento se conoce específicamente como tránsito de crecidas. En un sentido más amplio, el tránsito de caudales puede considerarse como un análisis para seguir el caudal a través de un sistema hidrológico, dada una entrada. La diferencia entre el tránsito de sistemas agregados y distribuidos es que en un modelo de sistema agregado, el flujo se calcula como una función del tiempo únicamente en un lugar particular, mientras que en un sistema de tránsito distribuido el flujo se calcula como una función del espacio y el tiempo a través del sistema. El tránsito por métodos de sistemas agregados se conoce algunas veces como tránsito hidrológico, y el tránsito por métodos distribuidos se conoce como tránsito hidráulico (Chow, Maidment y Mays 1995).

Se ha desarrollado un modelo hidráulico unidimensional del tramo entre Villamontes y Misión La Paz con el objetivo de entender el funcionamiento del desborde. Es la primera vez que se modela todo el tramo y la información obtenida servirá para realizar estudios de mayor escala en la zona de los desbordes. Para caracterizar el flujo es indispensable contar con información hidráulica de referencia, niveles y velocidades distribuidos en la zona de desbordes y demás puntos de interés.

Se han desarrollado modelos hidrológicos para el tramo de estudio con el objetivo de analizar los resultados obtenidos con el modelo hidráulico, ya que son otros los parámetros utilizados. Se realizaron los modelos Muskingum, Muskingum-Kunge y de Onda Cinemática.

### **8.1. Modelación Hidráulica Unidimensional**

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). El objetivo de la modelación es poder predecir el tiempo de arribo de la onda de crecida y niveles a MLP para ser utilizado en el sistema de alerta de crecidas, así como estudiar el mecanismo de funcionamiento de los desbordes. Se utilizaron las 62 secciones extraídas de los modelos digitales de terreno presentados en el capítulo anterior y se interpolaron cada 300 m. Se ha modelado con dos topografías diferentes, con MDT de SRTM y con MDT de ASTER, para analizar la sensibilidad a la geometría. En el tramo se presentan dos puentes, uno en Villamontes y otro en Misión La Paz que no se tienen en cuenta en el modelo.

HEC-RAS es un software de dominio público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interface gráfica de usuario que facilita las labores de pre y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS.

La Figura 107 presenta las secciones utilizadas junto a puntos de interés y la Tabla 18 muestra sus progresivas.

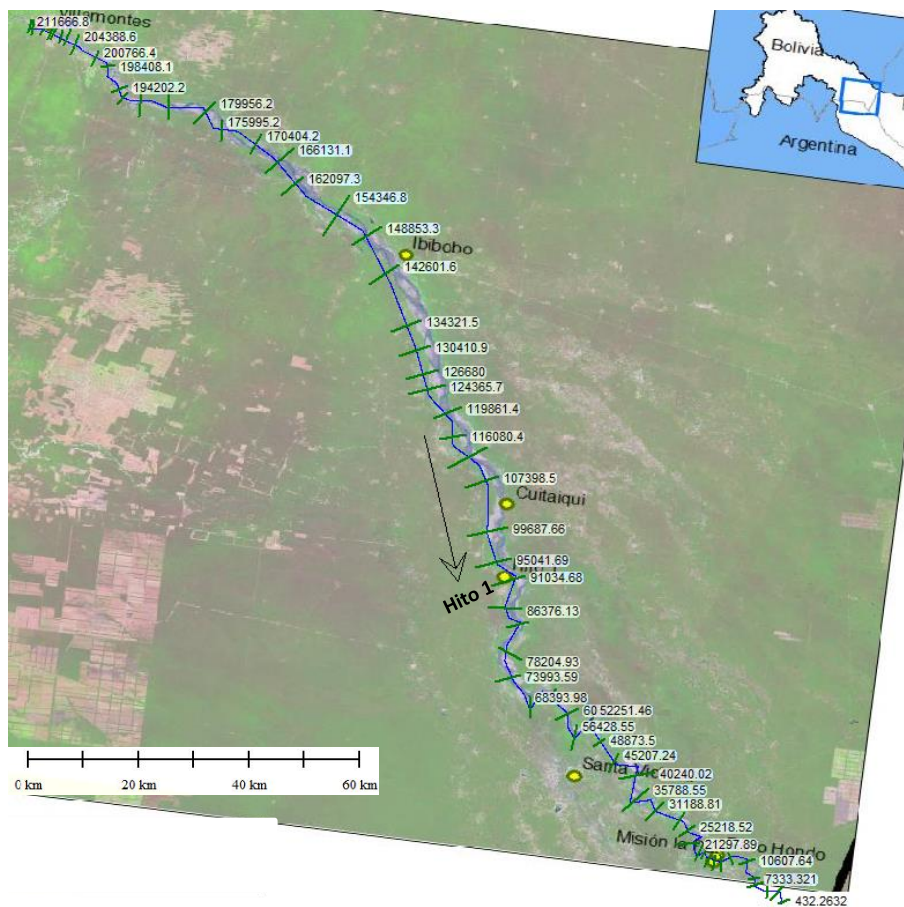


Figura 107.- Planimetría de las secciones creadas en HEC-RAS e identificación de localidades de interés.

Tabla 18.- Progresivas de puntos de interés

Localidad	Progresiva (m)
Villamontes	209634,5
Ibibobo	142601,6
Cuitaqui	107398,5
Hito 1	91034,68
Desb. El Chañaral	70260,00
Misión La Paz	16006,11

### 8.1.1. Descripción General del Modelo

El software contiene cuatro módulos de análisis unidimensional de ríos: (1) Cálculos de lámina de agua de flujo a régimen permanente; (2) Simulaciones a régimen no permanente; (3) Transporte de sedimentos con lecho a fondo móvil y (4) Análisis de calidad de agua. Comprende además herramientas destinados al análisis de obras hidráulicas que sean emplazadas en el cauce.

El programa fue diseñado para resolver cálculos hidráulicos en una dimensión con régimen permanente para una red completa de cauces abiertos, canales, ya sean naturales o artificiales, y ríos. HEC-RAS es capaz de calcular perfiles de la superficie del

agua en flujos gradualmente variado tanto para condiciones permanentes como no permanentes. Resuelve flujos subcrítico, supercrítico y flujos mixtos.

En esta tesis se utiliza el módulo de régimen no permanente ya que el caudal varía en el tiempo, sometido a atenuación conforme la onda se desplaza aguas abajo, y las relaciones caudal-tirante calculadas no son únicas, tienen histéresis.

El módulo de cálculo en régimen variable de HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, que consisten en un sistema de ecuaciones en derivadas parciales formado por la ecuación de continuidad y la de momentum. HEC-RAS utiliza el esquema de Preissmann o esquema de los cuatro puntos para la solución de las ecuaciones. Dicho esquema implícito en diferencias finitas es utilizado por varios programas comerciales. La Figura 108 presenta el proceso de cálculo que sigue el software HEC-RAS.

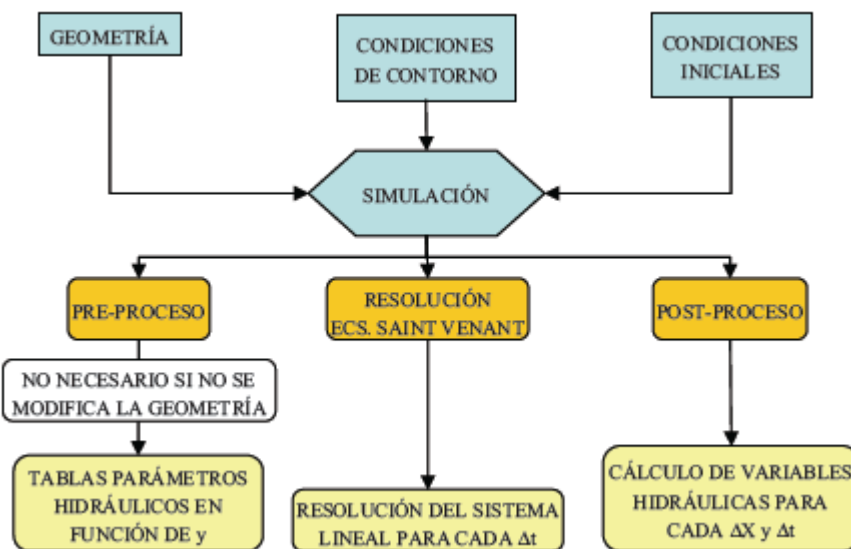


Figura 108.- Esquema del proceso de cálculo del Software HEC-RAS (Blade, y otros 2009).

#### 8.1.1.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se basa en el concepto que el flujo neto de agua en un volumen de control (balance del agua que sale y el que entra) es igual al volumen de agua almacenado.

#### 8.1.1.2. Ecuación de momentum

La ecuación de momentum establece que la resultante de todas las fuerzas actuantes sobre un volumen de control es igual a la variación de la cantidad de movimiento en el mismo. Las fuerzas que tiene en cuenta son:

- Fuerzas de presión. Para su determinación establece la hipótesis básica de distribución hidrostática de presiones.
- Fuerza gravitatoria. En este caso supone como hipótesis fundamental que las pendientes de los cauces son suficientemente pequeñas. Normalmente se consideran pendientes pequeñas inferiores a 1v:10h.
- Fuerza de fricción. Para determinar las fuerzas de fricción con los contornos plantea el cálculo de la pendiente motriz a partir de la fórmula de Manning.



### 8.1.1.3. Esquema de Preissman

El esquema de Preissman también conocido como esquema de los cuatro puntos, es un esquema en diferencias finitas implícitas (Los métodos de diferencias finitas pueden clasificarse en diferencias finitas explícitas y diferencias finitas implícitas, dependiendo de si el proceso de encontrar la solución a lo largo del tiempo lo hacen punto por punto en la malla de discretización espacial del dominio, o bien resolviendo conjuntamente todos los puntos de la malla en cada instante). En la Figura 109 se muestra el esquema de cálculo de los cuatro puntos de Preissman, dónde se aprecia el significado físico del factor de ponderación  $\theta$ , que utiliza HEC-RAS, y que da el grado de implícidad para la estimación de las diferencias finitas.

Así, se demuestra que un esquema implícito es intrínsecamente estable cuando  $0,5 < \theta < 1,0$ , es condicionalmente estable si  $\theta = 0,5$  e inestable para  $\theta < 0,5$ . HEC-RAS tan solo permite trabajar con factores  $0,6 < \theta < 1,0$ , por lo que en este caso el esquema será básicamente estable.

De cualquier modo hay que tener en cuenta que existen otros factores que influyen en la inestabilidad, como son:

- Cambios bruscos de pendiente
- Características de la propia onda de avenida
- Presencia de estructuras complejas (puentes, pasos entubados, motas, etc.)

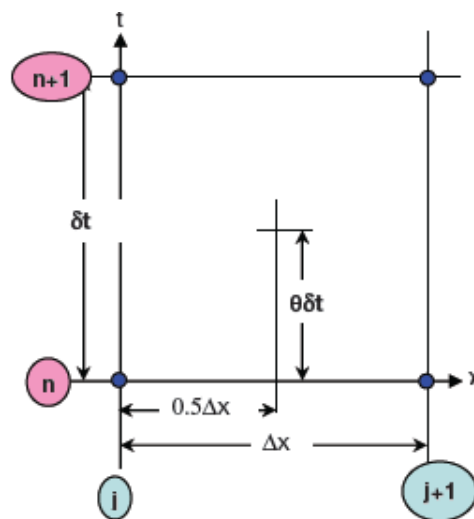
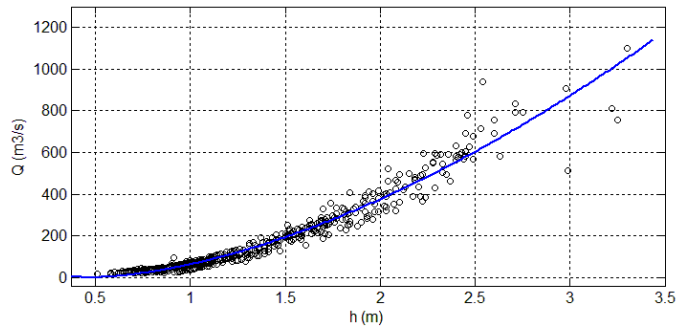


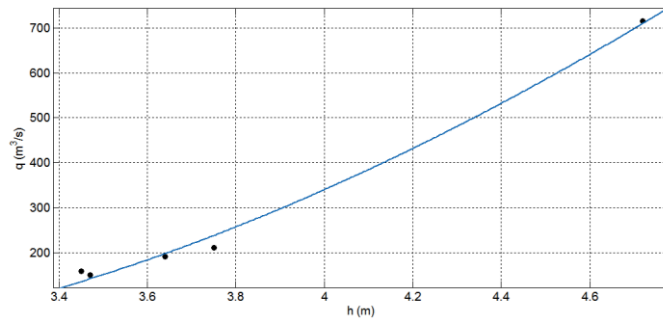
Figura 109.- Esquema de cálculo de Preissman de los cuatro puntos .

### 8.1.2. Datos de Entrada

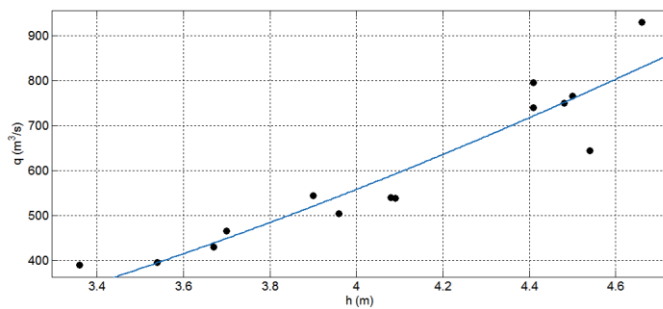
Se ha modelado el tramo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz. Como ya se ha referido, se poseen aforos en VM y MLP. En la Figura 110 se presentan las curvas H-Q. Recordemos que la sección de MLP es muy inestable, por lo que la curva se calculó a partir de aforos durante la crecida. Otra de las restricciones es que no se poseen aforos para caudales elevados en ninguna de las dos estaciones. Actualmente no se puede establecer con certeza cuales son los caudales máximos alcanzados en VM. En este caso para Villamontes se utiliza la curva H-Q histórica.



**Figura 110.-** H-Q para VM (1973-2013)  $Q = 187,1(H - 0,48)^{5/3}$ ,  $R^2 = 0,95$

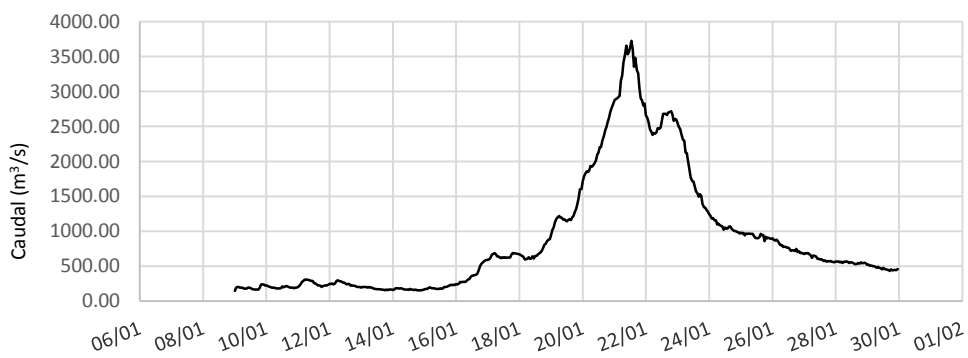


**Figura 111.-** H-Q para MLP (2013) en Rama Ascendente  $Q = 180,4(H - 2,167)^{5/3}$   $R^2=0,98$



**Figura 112.-** H-Q para MLP (2013) en Rama Descendente  $Q = 124,10(H - 1,535)^{5/3}$   $R^2=0,87$

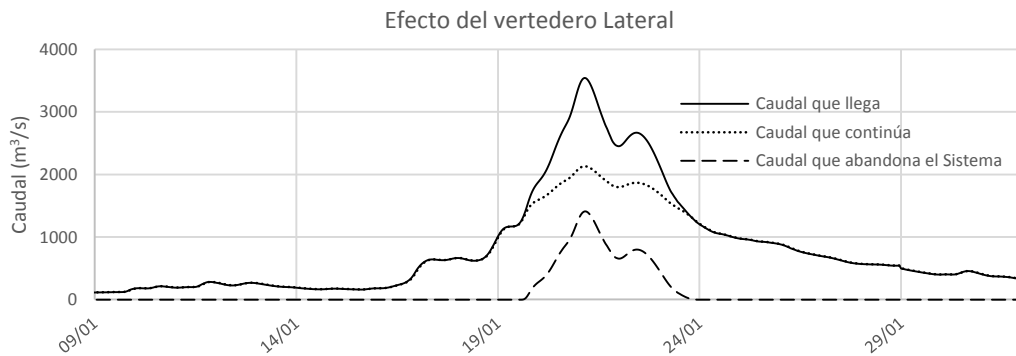
Como condición de aguas arriba se impone un hidrograma de crecida en Villamontes, en el caso que se presenta, la del año 2013 (Figura 113) obtenido a partir de lecturas de escala horarias y su respectiva curva altura-caudal. El periodo de modelación es desde el 9 de enero de 2013 a las 0:00 hs hasta el 29 de enero de 2013 a las 23:00 hs, este periodo es mayor al de la crecida para garantizar un ascenso de niveles de agua gradual que brinda más estabilidad al modelo. A su vez, se rellenó la serie dónde se encuentran datos faltantes para no tener saltos a caudal cero.



**Figura 113.-** Condición de Entrada Aguas Arribas, Hidrograma de Crecida del año 2013.

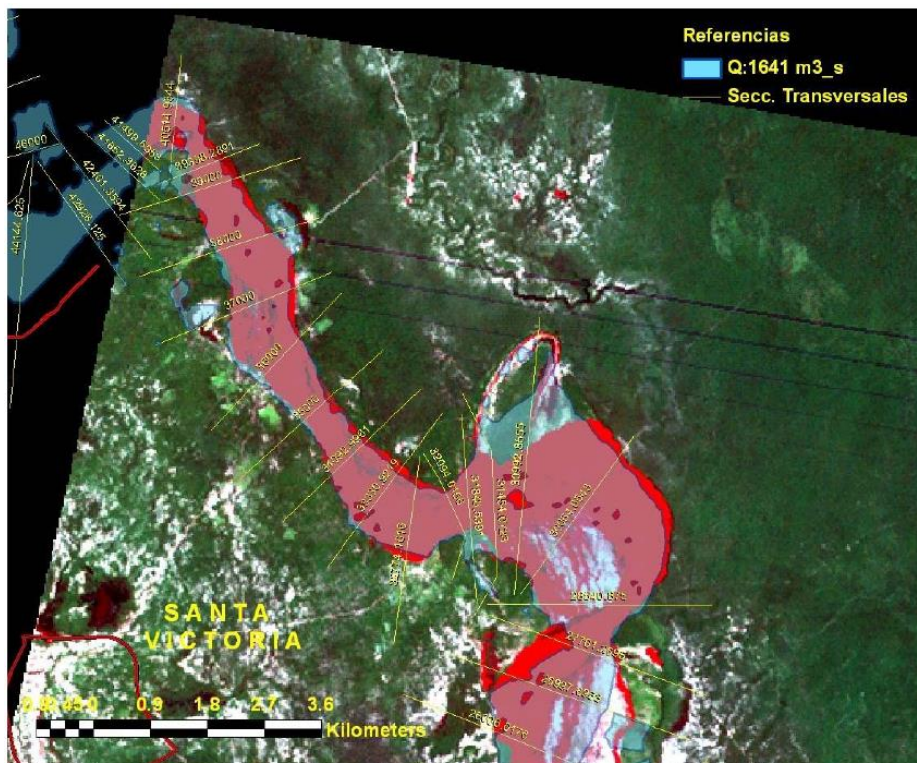
El flujo es subcrítico en todo el tramo y tiempo de modelado, por lo que se requiere agregar al modelo la condición de borde aguas abajo. Se ha decidido colocar un tirante normal para pendiente de 0,4 ‰ en una sección 15 km aguas debajo de Misión La Paz.

Otra particularidad es que en el tramo VM-MLP ocurren diversos desbordes que regulan el caudal que arriba a MLP. Estos desbordes se modelaron en la segunda corrida con un vertedero lateral en la zona de desborde de El Chañaral (progresiva 70260 m), que produce el efecto de eliminar caudal del sistema (Figura 114).



**Figura 114.-** Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D.

Se cuenta dentro de los antecedentes el trabajo de (Corral 2010) que presenta un modelo unidimensional para el tramo comprendido entre Hito 1 y Misión La Paz. Este modelo fue calibrado con las manchas de inundación que se pueden identificar a partir de la utilización de imágenes satelitales. La Figura 115 muestra la superposición de la mancha de inundación proporcionada por el modelo, en celeste, y la obtenida por análisis de la imagen satelital, en rojo.



**Figura 115.-** Calibración de modelo unidimensional con imágenes satelitales (Corral 2010).

El hidrograma obtenido a partir de las lecturas de escala horarias en MLP y las respectivas curvas altura-caudal se utiliza para calibrar y observar la calidad de los resultados (Figura 116). Este hidrograma cumplirá la función de hidrograma observado en la sección de MLP.

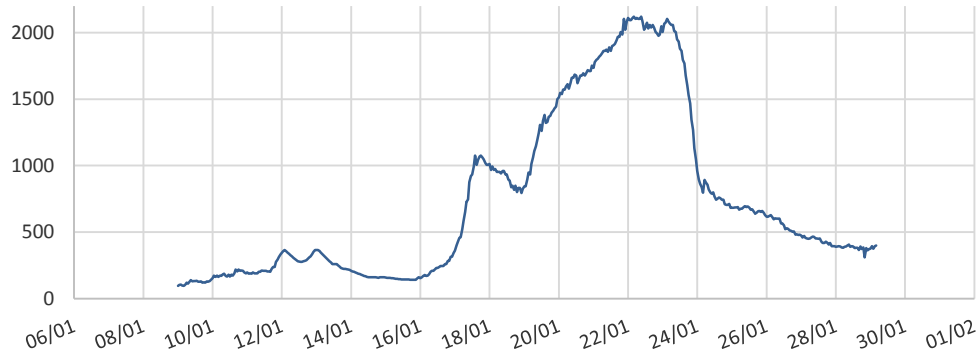


Figura 116.- Hidrograma Observado en MLP.

#### 8.1.2.1. Estabilidad del Modelo

La simulación en régimen variable está sujeta a inestabilidades que consisten en errores numéricos que pueden crecer hasta el punto que la solución empieza a oscilar incontroladamente o hasta que los errores se hacen tan grandes que el cálculo no puede continuar.

Los siguientes factores pueden influir en la estabilidad de la simulación (Blade, y otros 2009):

$\Delta x$  → los tramos con pendientes mayores suelen requerir  $\Delta x$  menores ( $\Delta x < 30$  m) mientras que si aparecen pequeñas pendientes, por ejemplo en ríos grandes y muy uniformes, son aceptables  $\Delta x$  alrededor de los 300m.

$\Delta t$  → se debe establecer la condición de Courant:  $v_w \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \approx f \cdot \frac{Q}{A} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$ . Esta condición permite imponer un criterio de selección de  $\Delta t$ , teniendo en cuenta que  $f = 1,50$  para sección natural. De cualquier modo, en la práctica Courant suele ser una condición bastante restrictiva. Si  $T_p$  es el tiempo del pico del hidrograma de la crecida, en general, se sugiere:  $\Delta t \leq \frac{T_p}{20}$ .

$\theta$  →  $\theta = 1$  da estabilidad (valor de HECRAS por defecto), mientras que  $\theta = 0,60$  da exactitud en la estimación de la derivada.

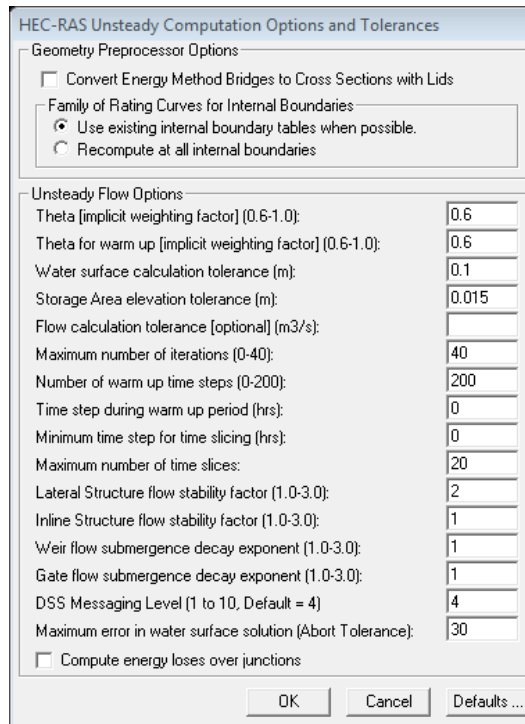
Número de iteraciones → El programa en cada instante estima las derivadas y resuelve las ecuaciones. Así, en todos los nodos de cálculo (en cada sección transversal) se comprueba el error, de manera que si éste es mayor que la tolerancia, el programa procede a realizar una nueva iteración. El número de iteraciones por defecto que utiliza HEC-RAS es de 20, permitiendo un máximo de 40.

Tolerancia de la solución → Modificar la tolerancia puede repercutir sobre la estabilidad de la simulación, de manera que si se aumenta la tolerancia de cálculo, se puede reducir

la estabilidad, en cambio, si se reduce la tolerancia, el programa precisará de un mayor número de iteraciones para converger, pudiéndose dar el caso de que el máximo número de iteraciones fijado no sea suficiente para garantizar la convergencia del sistema.

Las opciones de cálculo y tolerancias utilizadas se presentan en la Figura 117. Para intentar que el modelo sea más estable se siguieron las siguientes pautas (Rubín Marín 2006):

1. Distancia entre secciones transversales: a menor distancia entre secciones mayor estabilidad del modelo a costa de más tiempo de cálculo. Se utilizó una separación máxima de 300 m entre secciones interpoladas
2. Intervalo de cálculo: a menor tiempo mayor estabilidad y mayor tiempo de cálculo, 6 min en el caso planteado.
3. Periodo de “Warm up” (Run→Unsteady Flow Analysis→Options→ Calculation Options and Tolerances): consiste en una aproximación a la solución final mediante una simulación previa en régimen permanente. Esta es una herramienta muy útil para conseguir un modelo estable. Se utilizó el máximo permitido por el software
4. Local Partial Inertia (LPI): HEC-RAS incorpora el tratamiento para resolver inestabilidades provocadas por la onda de choque en su formulación mediante el Local Partial Inertia (LPI); este método incluye en su formulación el factor “Exponent for Froude number reduction factor” (factor m), un valor de  $m=1$  dará resultados lo más estables posible, para modificarlo se debe seguir la siguiente ruta: Run→Unsteady Flow Analysis→Options→ Mixed Flow Options. Este factor es muy importante para conseguir un modelo estable.
5. “Theta weighting factor” → Es un factor de ponderación que se aplica a las ecuaciones en diferencia finitas usadas para el cálculo en régimen variable para conseguir un modelo más estable. Se puede fijar el valor de este factor entre 0,6 y 1. Un valor de 1 dará resultados lo más estables posible y un valor de 0,6 dará resultados lo más precisos posible. Es aconsejable comenzar la simulación con factor de 1 y luego ir bajando; si el resultado no varía es mejor dejar el valor de 1 para que el modelo sea lo más robusto posible. Se utilizó 0,6
6. En el menú que aparece entrando por Run→Unsteady Flow Analysis→Options→ Calculation Options and Tolerances se encuentran el resto de parámetros que se pueden modificar para intentar estabilizar el modelo, todas ellas afectan en gran medida la precisión en el perfil de lámina de agua que se quiere obtener. En este caso se eligió 10 cm de precisión de lámina.



**Figura 117.-** Opciones de Cálculo y Tolerancias utilizadas para modelar.

Se tuvieron en cuenta los diversos mecanismos que dispone HEC-RAS para detectar posibles problemas de estabilidad numérica durante su ejecución (Blade, y otros 2009):

- En el caso de que durante el cálculo el programa detecte algún problema, el programa se para durante la ejecución e indica un error de cálculo o que la matriz de solución se ha vuelto inestable.
- El programa indica cuando alcanza el máximo número de iteraciones para diversos intervalos de cálculo  $\Delta t$ , aunque éste no siempre es un problema de estabilidad.
- En caso de que termine la simulación, la inspección gráfica de los resultados permitirá apreciar la existencia, o no, de oscilaciones en los calados y caudales calculados. Dicha oscilación, en caso de existir, es fruto de inestabilidades numéricas.

Además, se planteó un análisis de sensibilidad numérica, que consiste en ajustar los parámetros para obtener la mejor solución a las ecuaciones de Saint Venant manteniendo la estabilidad del modelo. Así, se analizaron los siguientes aspectos:

- Se fijó el intervalo de tiempo de cálculo ( $\Delta t$ ) tendiendo al menor valor que asegure la estabilidad del sistema.
- El parámetro de ponderación espacial de la derivada ( $\theta$ ) se llevó gradualmente al valor 0,60.
- Se analizaron los resultados para distintos valores alrededor del coeficiente de rugosidad de Manning fijado ( $n=0,017$ ,  $n=0,018$ ;  $n=0,023$ ;  $n=0,0375$ )
- Se analizaron los resultados para distintos espaciamientos ( $\Delta x$ ), usando la herramienta de interpolación de secciones y analizando los resultados para la mitad del espaciamiento fijado ( $\Delta x/2$ ), verificando que los resultados no variaban.



### 8.1.2.2. Coeficiente n de Manning

Se cuenta con valores del coeficiente de Manning utilizados en trabajos de modelación numérica de otros autores en diferentes tramos del río. Baldissone (2013) propuso  $n=0,018 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  para un tramo aguas debajo de MLP conocido como la Embocadura, sistema distribuidor de las aguas entre Argentina y Paraguay, este tramo fue modelado en HEC-RAS con el módulo permanente y luego utilizado para la calibración de un modelo bidimensional. J. D. Brea, y otros (2014) propusieron para la misma zona dos condiciones de rugosidad diferentes para las planicies y para la zona del cauce y las canalizaciones. Para caracterizar la primera se adoptó un coeficiente n de Manning igual a  $0,030 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ , mientras que en la zona del cauce la rugosidad se adoptó variable, con un valor medio de  $0,023 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  para una crecida con pico de  $2500 \text{ m}^3/\text{s}$  y para una crecida de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  coeficientes n de Manning igual a  $0,025 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  para planicies, mientras que en la zona del cauce la rugosidad se adoptó variable, con un valor medio de  $0,023 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Cafaro y Ramonell (2007) para el tramo comprendido entre Hito 1 y Misión La Paz utilizaron los coeficientes de rugosidad de Manning que se presentan en la Tabla 19, valores obtenidos a partir de despejar el coeficiente de la ecuación de Manning con datos de levantamientos del año 2001, valores para n que van desde  $0,010 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  a  $0,031 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Corral (2010) utilizó los valores de rugosidad presentados por Cafaro y Ramonell (2007).

**Tabla 19.- Coeficientes de Rugosidad de Manning (Cafaro y Ramonell 2007).**

Sección	$S_n$	$v_1$ (m/s)	$v_2$ (m/s)	$n_1$	$n_2$
CP20	0.00050	0.65	0.65	0.0188	0.0313
CP19	0.00049	0.90	0.90	0.0151	0.0100
CP13	0.00030	1.40	-	0.0105	-

#### Referencia

Caudal usado  $83,13 \text{ m}^3/\text{s}$ , valor medio del mes de noviembre de 2001

$S_n$ : pendiente del pelo de agua del río

$v_m$ : velocidad media de la sección obtenida con la ecuación de Manning

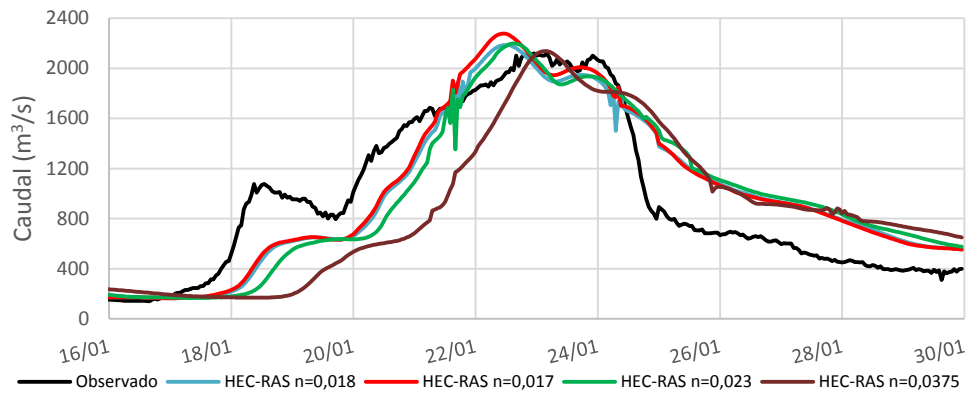
n: coeficiente de rugosidad de Manning

1: canal de mayores dimensiones en estiaje

2: canal de menores dimensiones en estiaje

A partir de datos obtenidos en campañas en las que participó el autor se calculó el coeficiente de rugosidad de Manning para la sección de MLP con resultados entre  $0,037 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  y  $0,057 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  (Tabla 12). En el modelo matemático se probaron diferentes valores del coeficiente de Manning y se compararon los resultados de las simulaciones con los valores observados en MLP. A la luz de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta todas las incertidumbres: Modelo 1D con topografías satelitales a fondo fijo y sin transporte de sedimentos; el río durante las crecidas tiene una elevada concentración de sedimentos y arrastra material vegetado con una gran variabilidad en la cota del lecho, curvas alturas-caudal con incertidumbres para lecturas de escala elevadas, entre otros. Se ha considerado que los resultados con  $n=0,023 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  representan los que mejor se ajustan con los hidrogramas de los aforos. Se verá más adelante, en los modelos de Onda Cinemática y Muskingum-Cunge, que los valores del n de Manning son diferentes al valor que nos da la calibración del modelo hidráulico. El mismo parámetro físico "rugosidad" con valores diferentes según el modelo empleado indica que no se comporta solamente como parámetro físico, sino que también posee un comportamiento de parámetro numérico.

La Figura 118 presenta los hidrogramas que llegan a MLP para diferentes coeficientes de Manning utilizados en el modelo con vertedero lateral.



**Figura 118.-** Comparación de Resultados de la Modelación con diferentes n de Manning, SRTM.

También se calculó el coeficiente n de Manning para la sección de Misión La Paz a partir de formulaciones del tipo:  $V = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot R^{a_2} \cdot S^{a_3}$  extraídas de Farías (1995) combinadas con la ecuación de Manning  $V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$ , donde V es la velocidad media del flujo, d del diámetro medio del sedimento de fondo y R el radio hidráulico y S la pendiente de fricción;  $a_0, a_1, a_2, a_3$  son coeficientes de ajustes proporcionados por diferentes autores. La Tabla 20 presenta los coeficientes utilizados, la velocidad calculada y el n de Manning despejado. Se utilizaron los valores de  $R = 2,79 (m), S = 0,0004$  y  $d = 0,017$ .

**Tabla 20.-** Cálculo de n de Manning a partir de formulaciones potenciales.

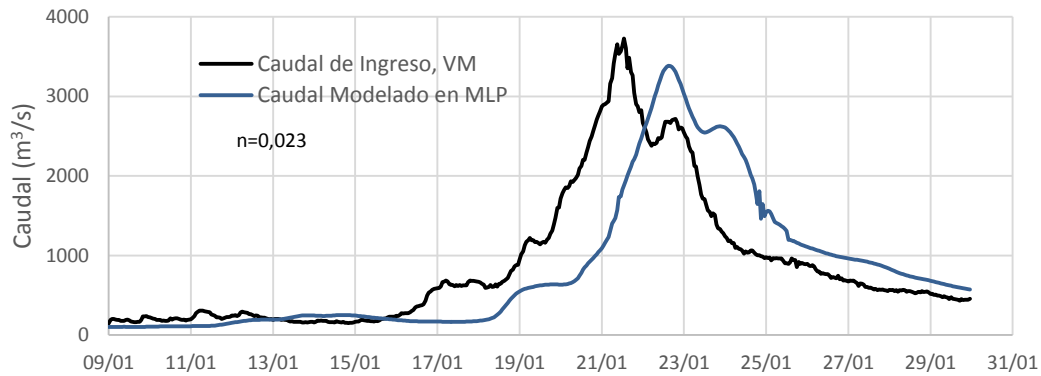
	a0	a1	a2	a3	V (m/s)	n (m <sup>1/3</sup> /s)
Manning - Strickler	21.10	-0.167	0.667	0.500	1.12	0.0352
Pavlovsky - Lacey	17.81	-0.133	0.736	0.515	0.85	0.0465
Sugio	7.90	0.000	0.540	0.270	1.66	0.0238
Chitale	7.34	0.000	0.646	0.293	1.44	0.0276
Maza-Cruickshank	495.85	0.340	0.637	0.456	14.73	0.0027
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	1.15	0.0345
Peterson & Peterson	7.55	-0.017	0.437	0.276	1.41	0.0282
Karim & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.83	0.0478
Camacho & Yen	97.93	0.216	0.636	0.401	5.57	0.0071
Farías	4.78	0.026	0.499	0.213	1.44	0.0275

Se observa que los valores del n de Manning obtenido a partir de las formulaciones oscilan entre 0,0238 y 0,0478 m<sup>1/3</sup>/s si tomamos los valores por encima de 0,02 m<sup>1/3</sup>/s.

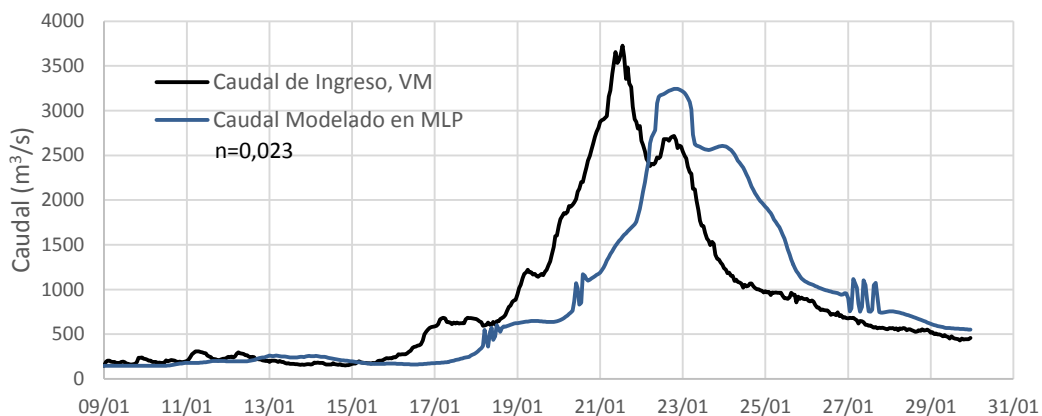
### 8.1.3. Primera Corrida del Modelo – Sin Vertedero Lateral

Con el fin de observar cómo se propaga el hidrograma entero se realizó una corrida sin pérdidas en el sistema. Este caso podría ser el que se observaría si no hubiera desbordes en el tramo y toda el agua llegase a Misión La Paz.

En la Figura 119 se muestra el hidrograma para todo el periodo de estudio para la geometría del SRTM y en la Figura 120 para la geometría de ASTER.

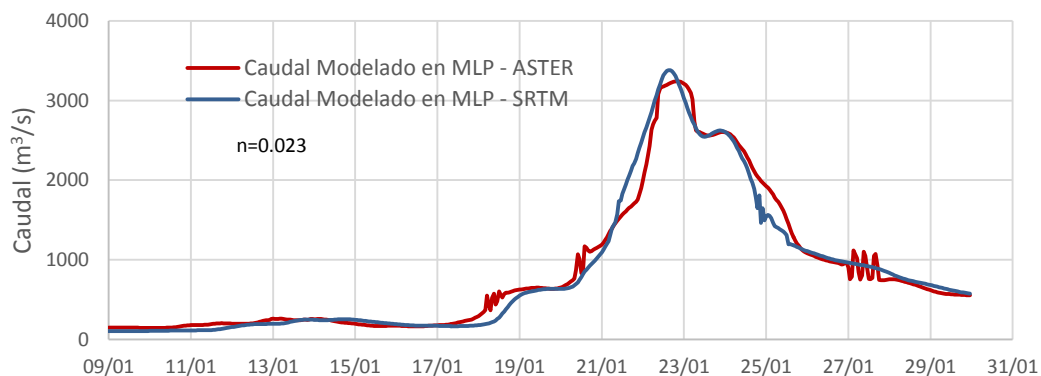


**Figura 119.-** Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación) Geometría SRTM.



**Figura 120.-** Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación), Geometría ASTER.

La Figura 121 presenta los resultados obtenidos con ambas geometrías.



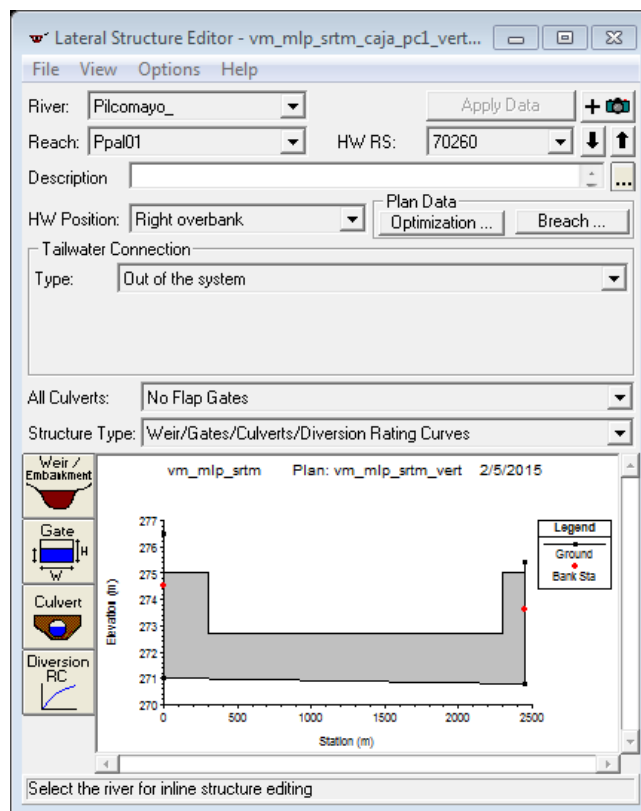
**Figura 121.-** Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER.

Se concluye que con ambas geometrías se consiguen hidrogramas muy similares, con la diferencia que la de ASTER produce mayor ruido. Es decir que el modelo no es sensible a

estas geometrías, aunque se prefiere trabajar con la geometría de SRTM que presenta menos discontinuidades.

**8.1.4. Segunda Corrida del Modelo – Con Vertedero Lateral**

A continuación, 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) (Figura 122). 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). El ancho se fijó en 2000 m a partir de imágenes satelitales en que se observan los desbordes, se realizó también una corrida con un ancho de vertedero de 1700 m y no hubo cambios en los resultados.



**Figura 122.-** Modelo Lateral impuesto a la modelación.

La Figura 123 junto a la Figura 124 justifican porque se ha elegido cota 273 m para la cresta del vertedero. Se observa que para esta cota la zona delimitada como El Chañaral se activa.

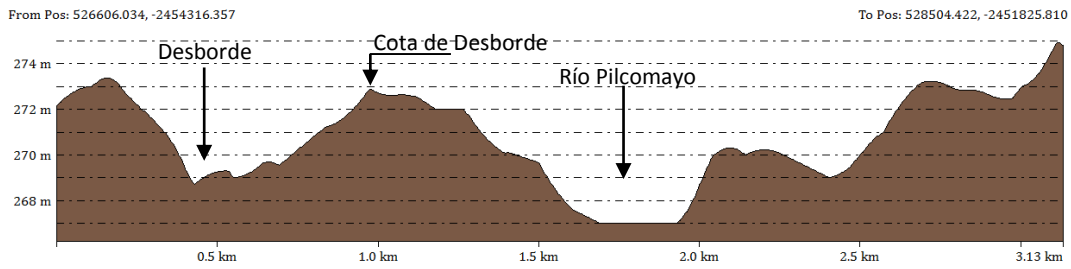


Figura 123.- Sección en progresiva de El Chañaral.

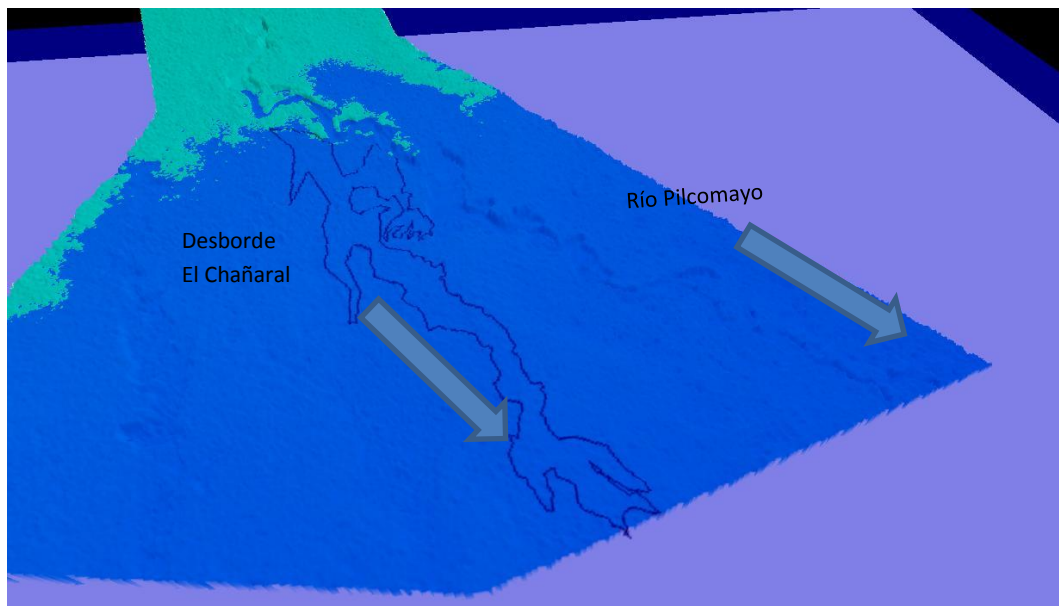


Figura 124.- Zona por debajo de los 273 m (en azul), se activa El Chañaral.

El hidrograma de Entrada en Villamontes es el mismo que para la corrida anterior (Figura 113).

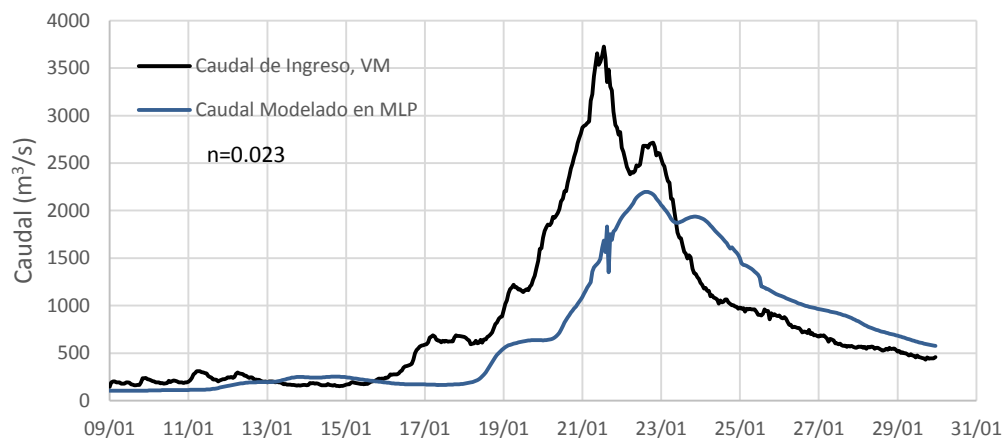
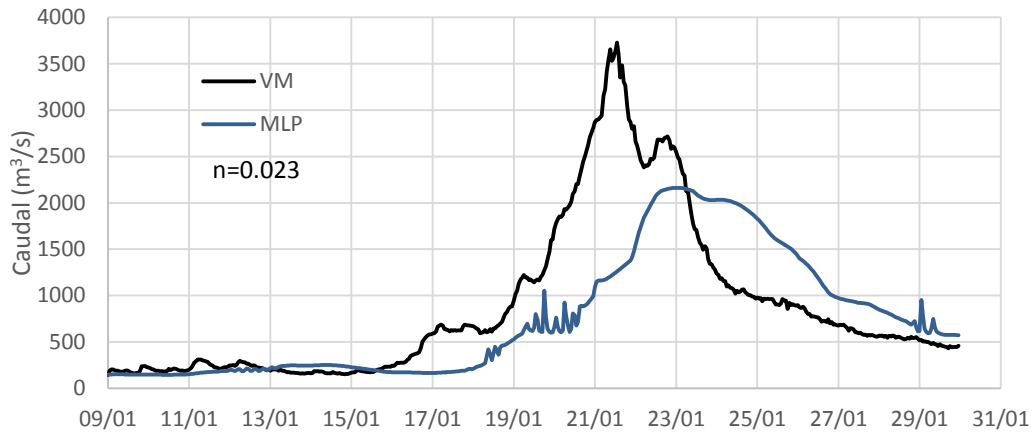


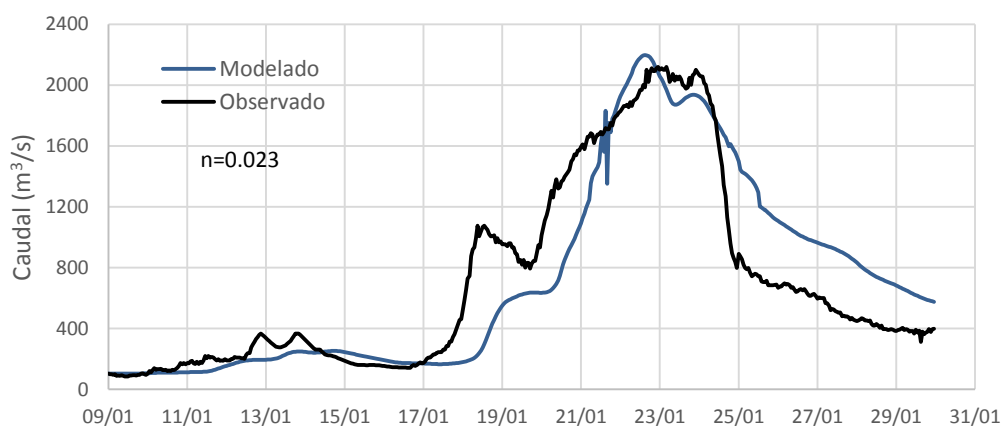
Figura 125.- Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT SRTM.



**Figura 126.-** Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT ASTER.

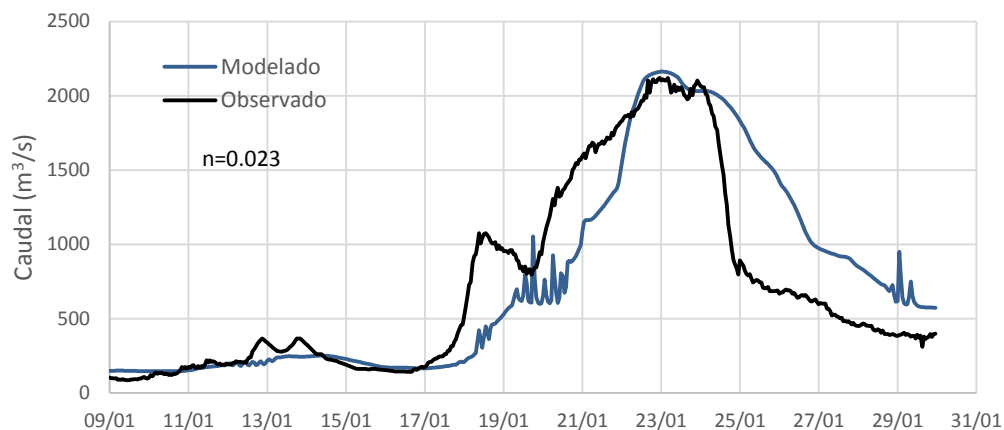
Se observó que para MLP el pico del hidrograma simulado con geometría SRTM (Figura 127) es de 2198,4 m<sup>3</sup>/s para el 22 de enero de 2013 a las 15 hs siendo el observado 2119,86 m<sup>3</sup>/s para el mismo día a las 23 hs, es decir el caudal pico simulado es un 3,7 % mayor y arriba 8 hs antes. No obstante, si uno toma como frente de crecida un caudal de 1700 m<sup>3</sup>/s, ambos arriban el 21 de enero a las 17 hs. Además el volumen de agua de todo el periodo es 1310 hm<sup>3</sup> para el hidrograma simulado y 1294 hm<sup>3</sup> para el observado, una diferencia del 1,2 %. Si se mide el volumen entre rama ascendente y descendente la diferencia es un poco mayor, de un 8 %, siendo 1149 hm<sup>3</sup> el volumen para el hidrograma simulado y 1055 hm<sup>3</sup> para el observado.

En el caso de la geometría ASTER (Figura 126) el pico simulado fue de 2162,42 m<sup>3</sup>/s el 23 de enero a las 1:00 hs y el observado, es decir 2 hs de diferencia con el arribo del pico observado y un 2 % por encima del caudal. Para esta geometría el volumen del hidrograma simulado que arriba a MLP es de 1376 hm<sup>3</sup>, un 6 % mayor al observado y si tomamos solo a partir de la rama ascendente del hidrograma, el volumen simulado durante la crecida es de 1198 hm<sup>3</sup>, un 12 % mayor al observado.



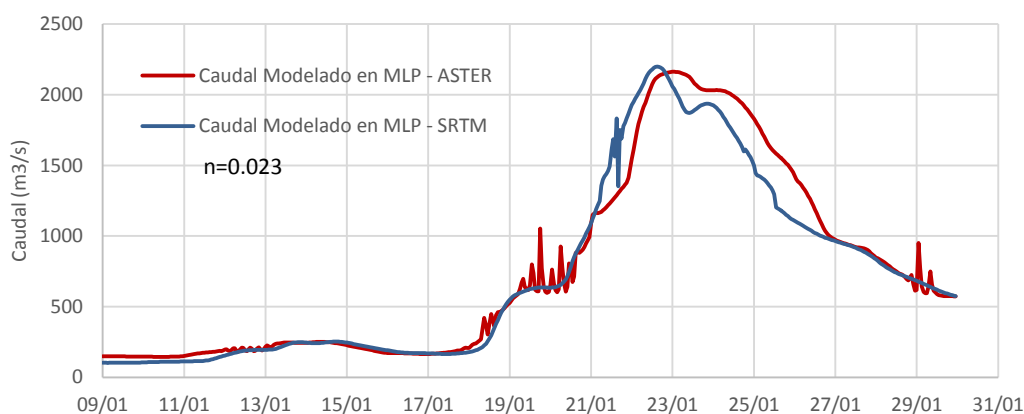
**Figura 127.-** Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT SRTM.





**Figura 128.-** Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT ASTER.

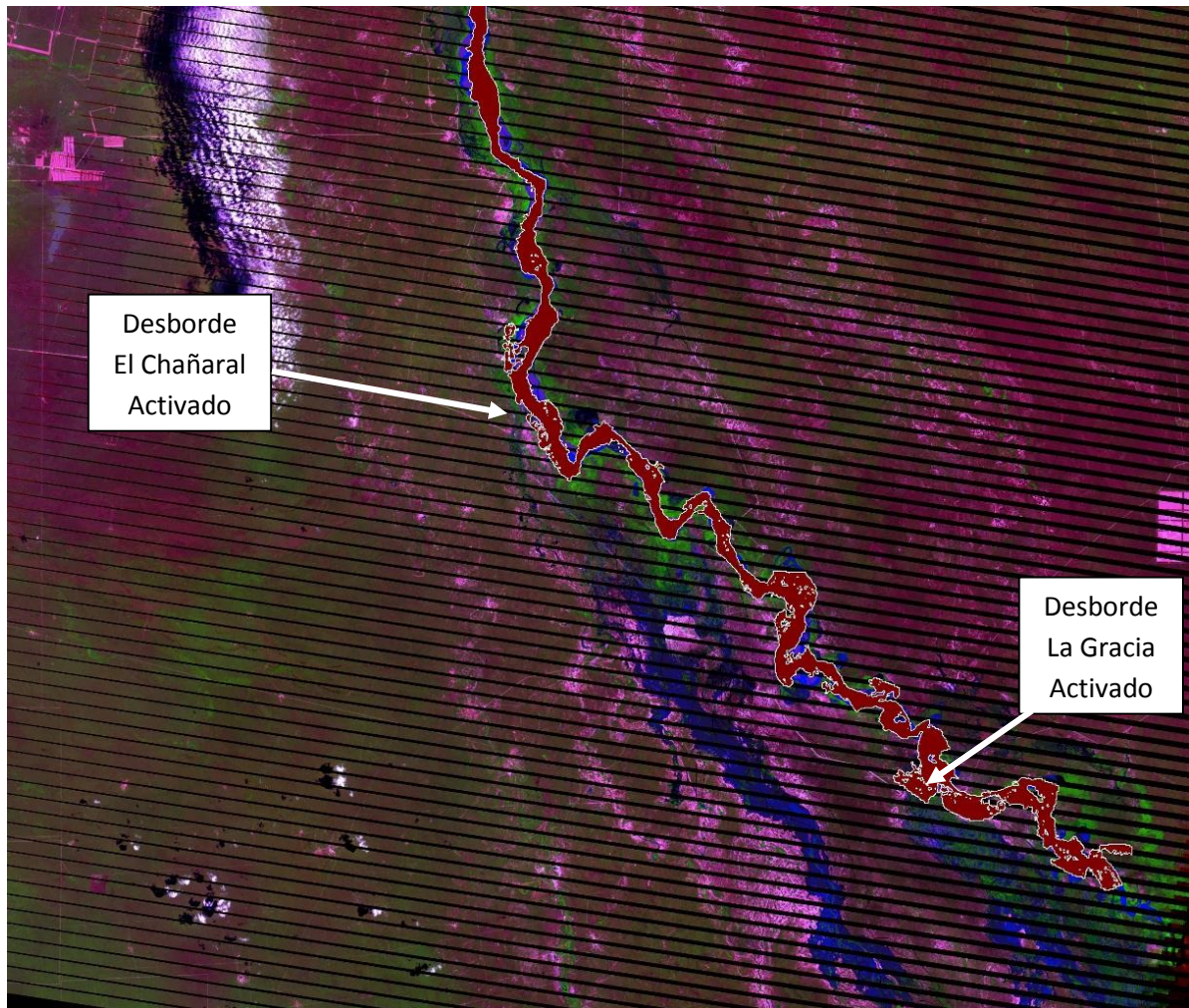
Se observa a partir de la Figura 127 y de la Figura 128 que los hidrogramas tienen la misma forma que el aforado, pero el obtenido a partir de aforos arriba a la sección con mayor caudal en la rama ascendente y menor caudal en la descendente. Este problema se podría solucionar agregando más vertederos laterales a la altura de los otros desbordes.



**Figura 129.-** Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER.

Además, al comparar los resultados de las modelaciones con geometría ASTER y SRTM (Figura 129), se observa que la diferencia en sus resultados es inferior al 5%, es decir, no son sensibles a las topografías utilizadas. Se observa más ruido en el obtenido a partir de la topografía ASTER. Se buscó que el volumen debajo de la curva del hidrograma durante la crecida fuera lo más cercano para el hidrograma aforado y el modelado. El volumen desbordado según los hidrogramas medidos con geometría SRTM es de 299 hm<sup>3</sup> y según el modelo de 278 hm<sup>3</sup>, una diferencia inferior al 8%. Con geometría ASTER el volumen desbordado simulado es de 252 hm<sup>3</sup>, un 15% inferior al observado.

La Figura 130 presenta la superposición de los resultados del modelo hidráulico georreferenciados (en rojo) sobre la imagen satelital que se dispone de la crecida. Hay una buena coincidencia entre las superficies libres de la imagen y del modelo. Se puede ver también que el modelo muestra la activación de los desbordes El Chañaral y La Gracia.



**Figura 130.-** Superposición Imagen Landsat 25/01/2013 y resultados HEC-RAS, en rojo. Se concluye a partir de lo analizado, que el modelo realizado logra una buena representación en planta de los desbordes, así como estima el volumen que llega a Misión La Paz y el pico de la crecida.

## 8.2. Modelación Hidrológica

Se realizaron tres modelos hidrológicos utilizando el software HEC-HMS 4.0 (USACE 2013) con el objetivo de verificar que los resultados proporcionados por el modelo hidráulico son concordantes con los de estos modelos más simplificados. Recordemos que nos interesa el modelo hidráulico ya que también nos proporciona datos de velocidad y tirante que son útiles para profundizar el estudio de los desbordes. Los modelos hidrológicos solo nos cuentan con qué forma llega el hidrograma.

La Tabla 21 presenta los criterios que recomiendan los autores del software considerar para la aplicabilidad de los modelos numéricos.

**Tabla 21.-** Guía para la selección del modelo de tránsito (USACE 2000).

<b>Si se cumple que ...</b>	<b>... considerar los modelos:</b>
No hay hidrograma observado para realizar la calibración	Onda Cinemática Y Muskingum-Cunge
Si hay remansos que influyen de manera significativa el hidrograma de descargas	Puls Modificado
La onda de crecida sale de las márgenes y ocupa la llanura de inundación	Puls Modificado, Muskingum-Cunge
Pendiente del cauce $> 0,002$ y $\frac{TS_0u_0}{d_0} \geq 171$	Cualquiera
Pendiente del cauce entre $0,002$ y $0,0004$ , y $\frac{TS_0u_0}{d_0} \geq 171$	Muskingum-Cunge, Puls Modificado, Muskingum
Pendiente del cauce $< 0,0004$ y $TS_0 \left(\frac{g}{d_0}\right)^{1/2} \geq 30$	Muskingum-Cunge
Pendiente del cauce $< 0,0004$ y $TS_0 \left(\frac{g}{d_0}\right)^{1/2} < 30$	Ninguno

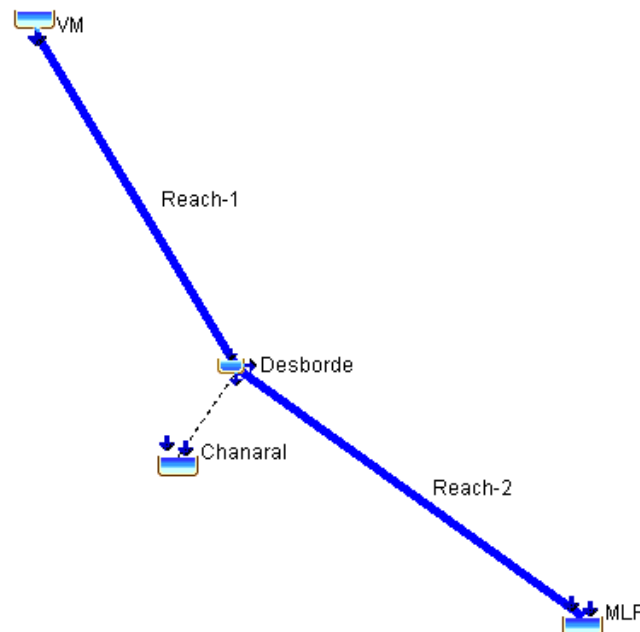
Donde T es la duración del hidrograma,  $S_0$  la pendiente,  $u_0$  es la velocidad media de referencia,  $d_0$  la profundidad de referencia (todas estas son condiciones promedio del hidrograma de entrada) y g es la aceleración de la gravedad.

En nuestro caso T es 777.600 s,  $u_0 = 1,50$  m/s,  $d_0=3,70$  m y  $S_0=0,0006$  y reemplazando en las desigualdades obtenemos:  $\frac{TS_0u_0}{d_0} = 189,15 \geq 171$  con pendiente mayor a 0,0004, por lo que son aplicables los modelos Muskingum, Muskingum-Cunge y Puls Modificado. El modelo de Onda Cinemática se recomienda para pendientes mayores, no obstante se decidió realizarlo con el fin de observar su aplicabilidad en el Río Pilcomayo.

Se utilizó como condición de entrada el hidrograma de Villamontes, el mismo que se utilizó para el modelo hidráulico. Para calibrar los parámetros interviniente en cada modelo se utilizó el hidrograma de MLP, el mismo que usamos para el modelo hidráulico. Además se calibró imponiéndole en MLP el hidrograma que nos dio de resultado el modelo hidráulico con el fin de comprar los parámetros de los modelos.

En cuanto a las funciones objetivo para calibrar los parámetros intervinientes en cada modelo se tomó la rama ascendente del hidrograma, frente de crecida, comprendido entre las fechas 19 de enero de 2013 a las 00:00 hs y el 29 de enero a las 23:00 hs.

La Figura 131 presenta el esquema utilizado para la modelación que consta de dos tramos y un desvío o desborde.

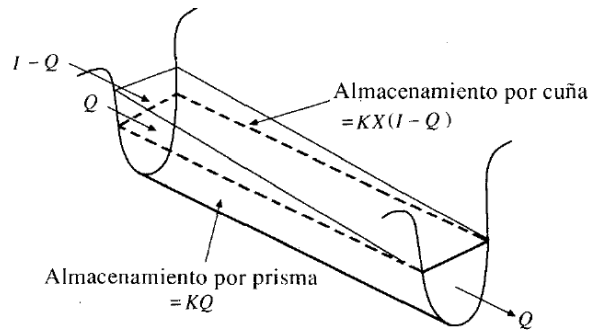


**Figura 131.-** Esquema de modelación en HEC-HMS

Para la calibración de los diferentes modelos se eligió como función objetivo la de error medio cuadrático con factor de ponderación en el pico (Peak-weighted root mean square error), que compara todas las ordenadas elevando al cuadrado las diferencias aplicándoles un coeficiente de peso. El peso asignado a cada ordenada es proporcional a la magnitud de la ordenada. Las ordenadas mayores a la media tienen un peso mayor a 1 y las menores un peso menor a 1. El máximo peso se asigna a la ordenada del pico observado. La suma de las diferencias al cuadrado con la ponderación se divide por el número de ordenadas del hidrograma calculado conduciendo al error medio cuadrático. Sacando la raíz cuadrada obtenemos el error medio cuadrático. Esta función es una medida implícita de comparación de las magnitudes de los picos, volúmenes y tiempo del pico de los dos hidrogramas. Además se realizaron algunas corridas con los valores de  $n$  de Manning obtenidos en las campañas.

### 8.2.1. *Muskingum*

El método de Muskingum es un método de tránsito hidrológico que se usa comúnmente para manejar relaciones caudal-almacenamiento variable. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un canal de un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (Figura 132). Durante el avance de la onda de creciente, el caudal de entrada es mayor que el caudal de salida, siendo un almacenamiento de cuña. Durante la recesión, el caudal de salida es mayor que el caudal de entrada resultando en una cuña negativa. Adicionalmente, existe un almacenamiento por prisma que está formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo de la longitud del canal prismático.



**Figura 132.-** Almacenamiento por prisma y cuña en un canal (Chow, Maidment y Mays 1995).

Suponiendo que el área de la sección transversal del flujo de crecida es directamente proporcional al caudal en la sección, el volumen de almacenamiento por prisma es igual a  $KQ$  donde  $K$  es un coeficiente de proporcionalidad, y el volumen de almacenamiento por cuña es igual a  $KX(I - Q)$ , donde  $X$  es un factor de ponderación dentro del rango de 0 a 0,50. El almacenamiento total es por consiguiente la suma de dos componentes,

$$S = K[XI + (1 - X)Q]$$

y representa un modelo lineal para el tránsito de caudales en corrientes. El valor de  $X$  depende de la forma de almacenamiento por cuña modelado. El valor de  $X$  varía desde 0, para un almacenamiento tipo embalse, hasta 0,50, para una cuña completamente desarrollada. Cuando  $X = 0$ , no existe cuña y por consiguiente no existe curva de remanso; este es el caso para un embalse de piscina nivelada. En corrientes naturales,  $X$  se encuentra entre 0 y 0,30 con un valor medio cercano a 0,20. No se necesita una gran precisión en la determinación de  $X$  debido a que los resultados del método son relativamente insensibles al valor de este parámetro. El parámetro  $K$  es el tiempo de tránsito de una onda de crecida a través del tramo de canal (Chow, Maidment y Mays 1995). Estimar  $K$  trae cierta dificultad, pues este tiempo varía de acuerdo al caudal y si se lo calcula pensando en el pico, centro de masa o frente de la crecida. Los valores de  $K$  y  $X$  se suponen especificados y constantes para todo el rango de flujo.

Se realizaron dos corridas del modelo con diferentes parámetros  $K$  y  $X$ . Primero con los obtenidos por calibración para la función objetivo Volumen, con diferencias cuadráticas y luego con función objetivo tiempo de arribo del pico del hidrograma.

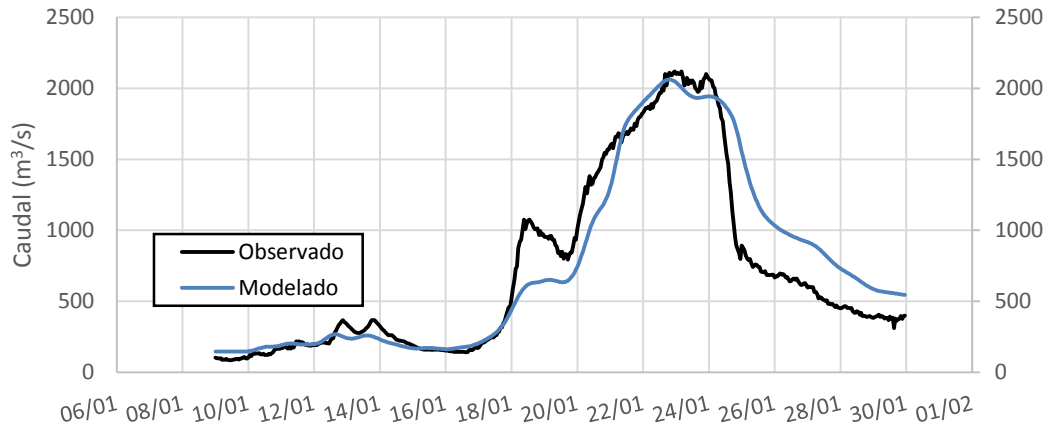
#### 8.2.1.1. Primera corrida

Al calibrar la función objetivo entre las fechas 19 de enero de 2013 a las 00:00 hs y el 29 de enero a las 23:00 hs, se obtuvieron los parámetros presentados en la Tabla 22 :

**Tabla 22.-** Parámetros utilizados en la simulación.

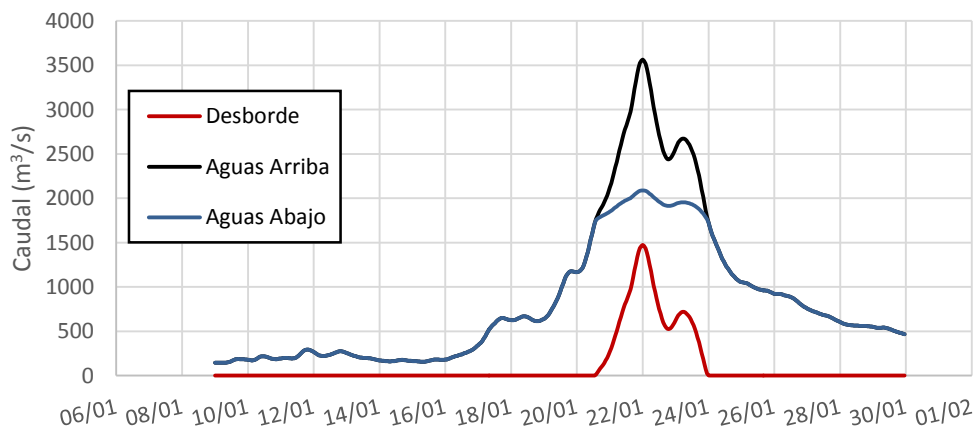
Tramo	K	X
1	12,35	0,1882
2	9,59	0,1884
$\Sigma$	21,94	

La Figura 133 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida, caudal observado.



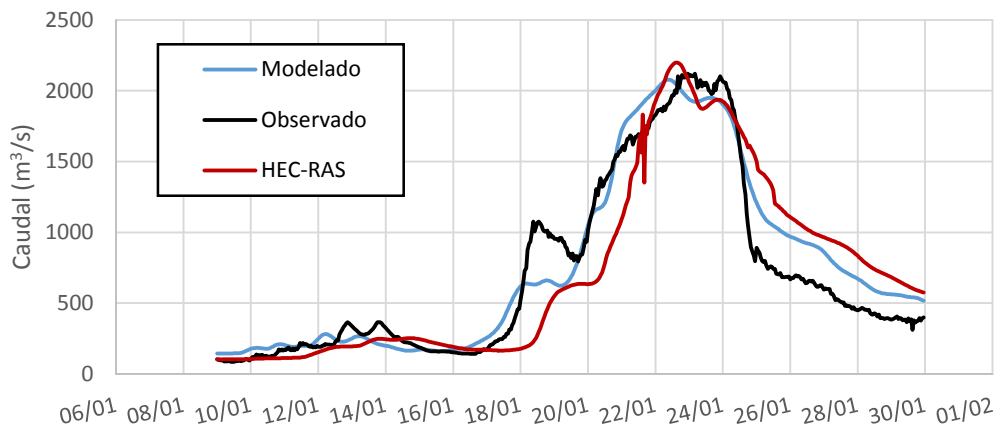
**Figura 133.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.

La Figura 134 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado. El volumen desbordado es de 194 hm<sup>3</sup>.



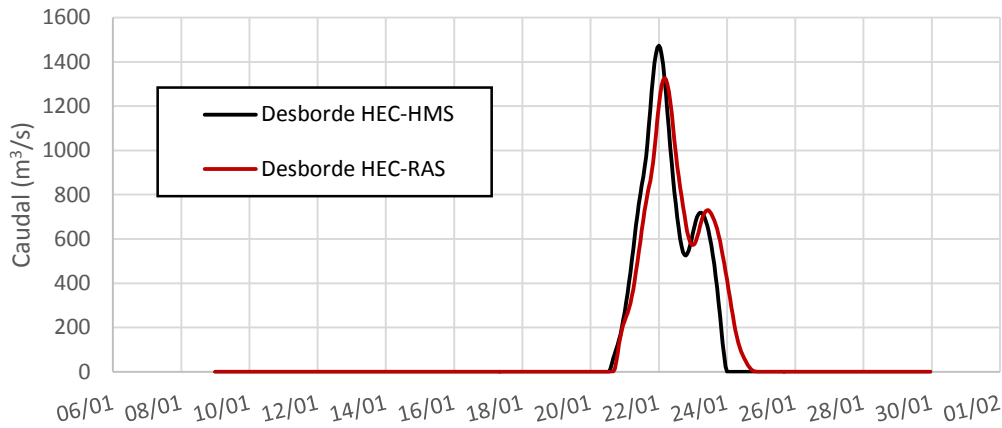
**Figura 134.-** Hidrogramas del desborde según simulación.

La Figura 135 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 136 la comparación de los caudales desbordados.



**Figura 135.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS





**Figura 136.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

Se concluye que los hidrogramas modelados que arriban a MLP coinciden en forma y respeta el pico de la crecida (Caudal Pico Modelado = 2078 m<sup>3</sup>/s). Se observa además que la rama ascendente es más cercana a la observada que la modelada con HEC-RAS. A su vez al comparar el hidrograma de desborde modelado con HEC-RAS y el de esta corrida se observa que son muy similares, activándose 6 h antes el primero. El volumen de desborde para esta corrida es de 223,30 hm<sup>3</sup>.

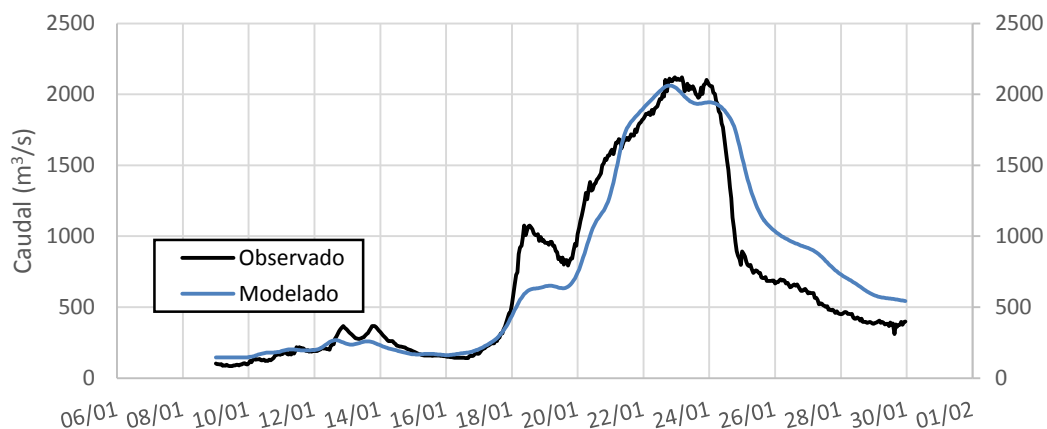
#### 8.2.1.2. Segunda corrida

Se realizó una segunda corrida con valores de K impuestos estimados a partir de la velocidad de la crecida considerando la velocidad a la que viaja el pico, presentados en la Tabla 23.

**Tabla 23.-** Parámetros utilizados en la simulación.

Tramo	K	X
1	23,03	0,1850
2	8,97	0,1890
Σ	32,02	

La Figura 137 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida, caudal observado.



**Figura 137.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.

La Figura 138 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado.

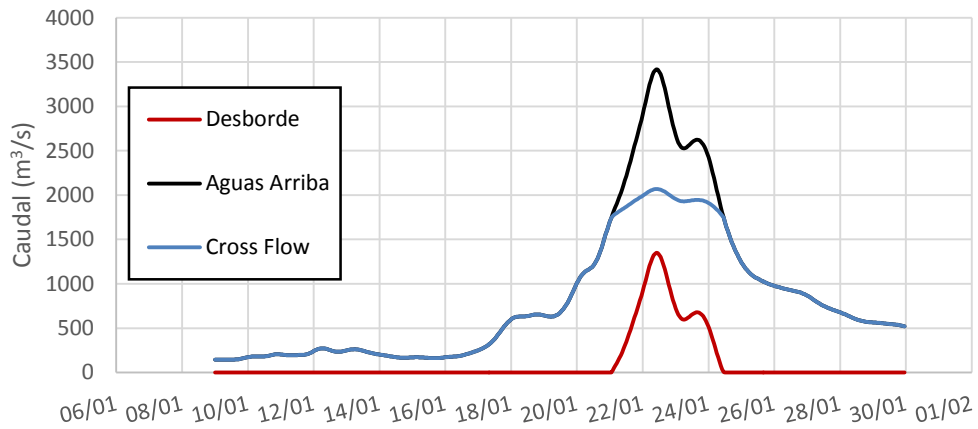


Figura 138.- Hidrogramas del desborde según simulación.

La Figura 139 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 171 la comparación de los caudales desbordados.

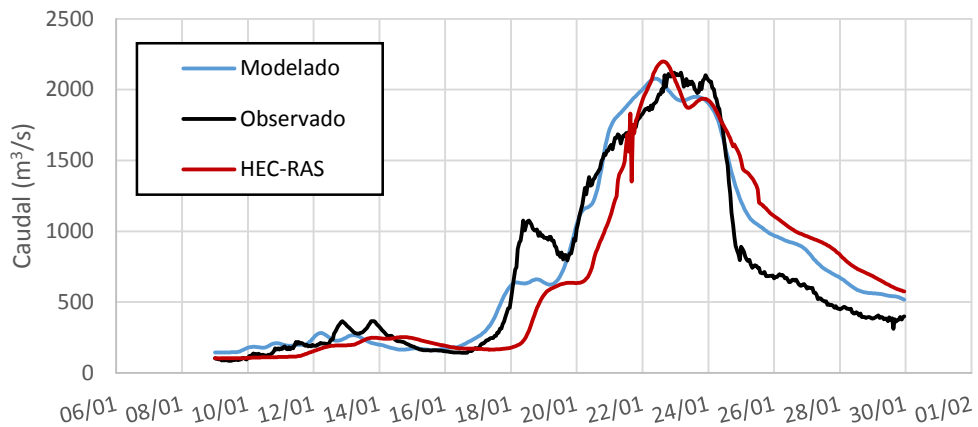


Figura 139.- Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

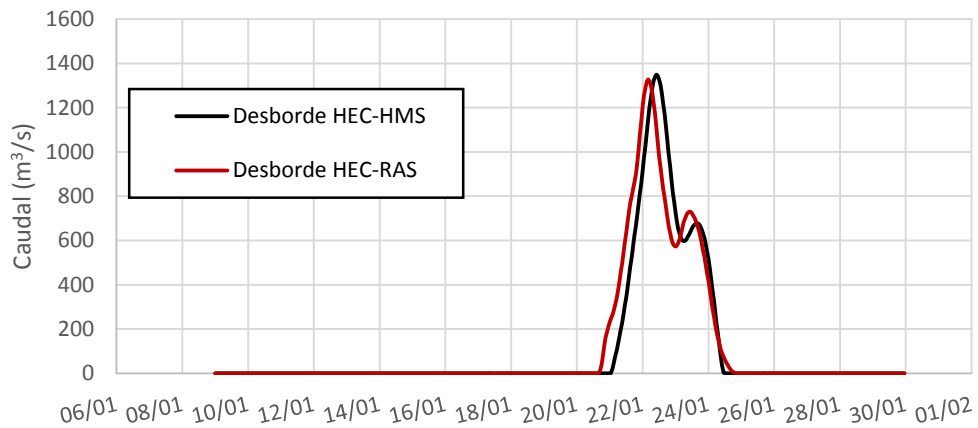


Figura 140.- Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

Se concluye que los hidrogramas modelados que arriban a MLP coinciden en forma y respeta el pico de la crecida (Caudal Pico Modelado = 2078 m<sup>3</sup>/s). Se observa además que la rama ascendente es más cercana a la observada que la modelada con HEC-RAS. A su vez al comparar el hidrograma de desborde modelado con HEC-RAS y el de esta corrida se observa que son muy similares, activándose 6 h antes el primero. El volumen de desborde para esta corrida es de 223,30 hm<sup>3</sup>.

### 8.2.2. Onda Cinemática

El modelo de Onda Cinemática se basa en una aproximación de diferencias finitas a la ecuación de continuidad y una simplificación de la ecuación de cantidad de movimiento.

La ecuación de momentum en una dimensión es:  $S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$

Donde  $S_f$  es el gradiente de energía o pendiente de fricción,  $S_0$  es la pendiente de fondo,  $V$  es la velocidad,  $y$  es la profundidad hidráulica,  $x$  distancia a lo largo del tramo,  $t$  el tiempo y  $g$  la aceleración de la gravedad.

El gradiente de energía puede estimarse a partir de la ecuación de Manning, la que se puede escribir de la siguiente manera:

$$Q = \frac{CR^{2/3}S_f^{1/2}}{N}A$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $R$  es el radio hidráulico,  $A$  es el área de la sección transversal y  $N$  el factor de resistencia que depende de la cobertura y que no es el  $n$  de Manning. Para flujo poco profundo, las pendientes de fricción y de fondo son casi iguales y los efectos de la aceleración son despreciables. Con esta salvedad la ecuación de momentum se simplifica a:  $S_f = S_0$ , y el cálculo de  $Q$  se puede simplificar: a  $Q = \alpha A^m$

Donde  $\alpha$  y  $m$  son parámetros relacionados a la geometría del flujo y rugosidad de la superficie.

La segunda ecuación de importancia es la de continuidad, que en una dimensión es

$$A \frac{\partial V}{\partial x} + VB \frac{\partial y}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q$$

Donde  $B$  es el ancho de la superficie de agua,  $q$  el caudal lateral por unidad de longitud del canal,  $A \frac{\partial V}{\partial x}$  es el almacenamiento en prisma,  $VB \frac{\partial y}{\partial x}$  es el almacenamiento en cuña y  $B \frac{\partial y}{\partial t}$  es la tasa de elevación.

Aplicando las simplificaciones del caso de flujo poco profundo, la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

Combinando esta con la anterior se obtiene la ecuación de la aproximación de la onda cinemática de las ecuaciones de movimiento.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \alpha mA^{m-1} \frac{\partial A}{\partial x} = q$$

Para utilizar este modelo de tránsito hidrológico es necesario contar con la siguiente información:

- Forma de la sección transversal
- Una dimensión principal, ancho de fondo del canal
- Pendiente lateral, si la sección es trapezoidal
- Longitud del Tramo
- Pendiente de Energía
- Coeficiente de rugosidad de Manning.

Se realizaron tres corridas del modelo con diferentes n de Manning, el óptimo obtenido a partir de la calibración con el hidrograma de aguas abajo en MLP como función objetivo en base a y dos con Manning impuestos con valores 0,0375 y 0,0575 que son valores en el rango de lo medido en campañas. Además se realizó una cuarta corrida para calibrar el n de Manning colocando aguas abajo el hidrograma obtenido como resultado de la modelación hidrodinámica con HEC-RAS.

8.2.2.1. Primera Corrida

Al calibrar la función objetivo entre las fechas 19 de enero de 2013 a las 00:00 hs y el 29 de enero a las 23:00 hs, se obtuvieron los parámetros presentados en la Tabla 24:

Tabla 24.- Parámetros utilizados en la simulación.

Tramo	n de Manning
1	0,025
2	0,035

La Figura 141 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida, caudal observado.

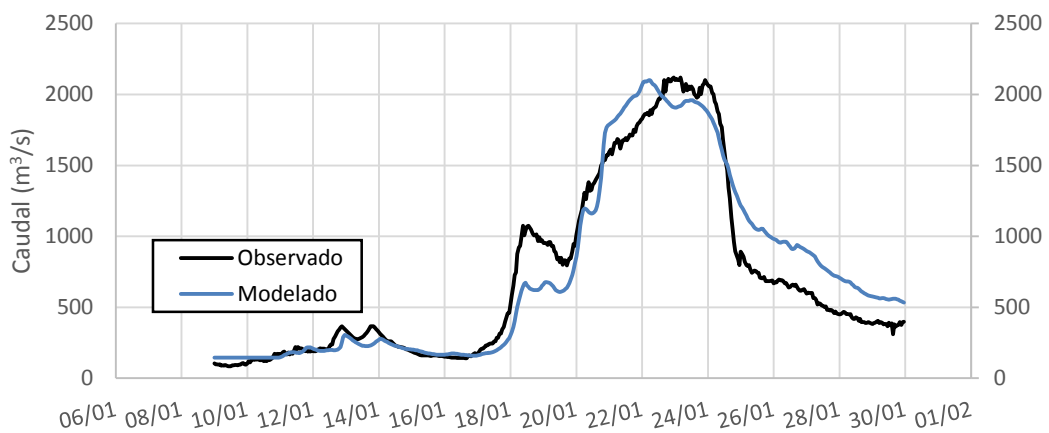
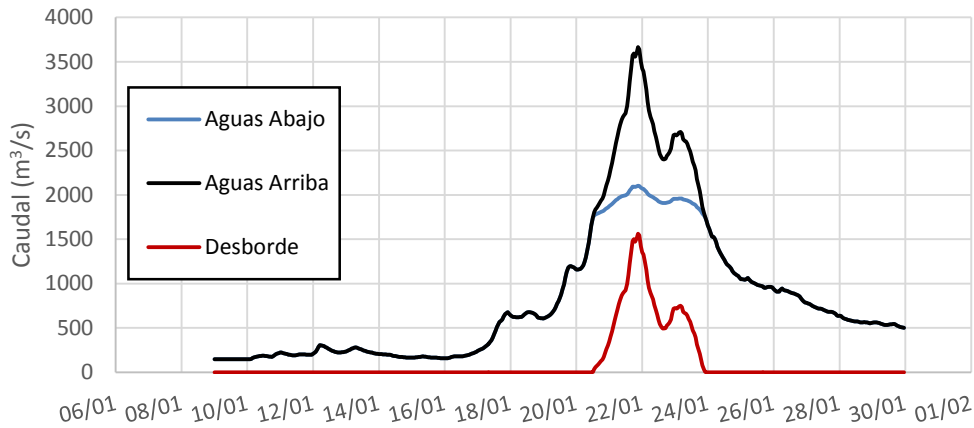


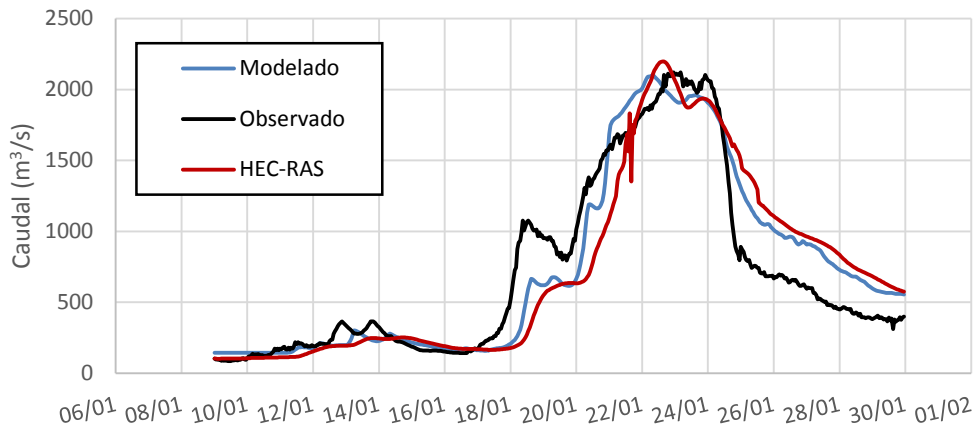
Figura 141.- Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.

La Figura 142 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral.

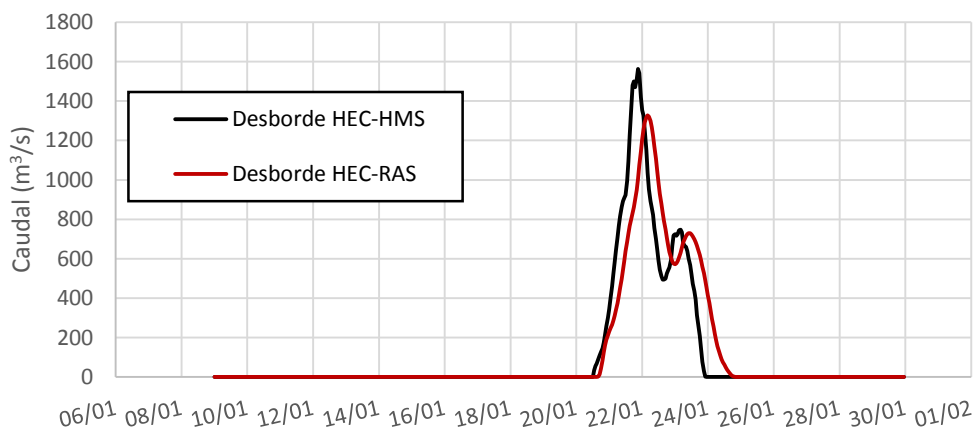


**Figura 142.-** Hidrogramas del desborde según simulación.

La Figura 143 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 144 la comparación de los caudales desbordados.



**Figura 143.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 144.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

Los hidrogramas presentados muestran una vez más que subestiman los caudales en rama ascendente y los sobrestiman en la rama descendente del hidrograma. El tiempo de duración del frente de crecida se corresponde con el observado.

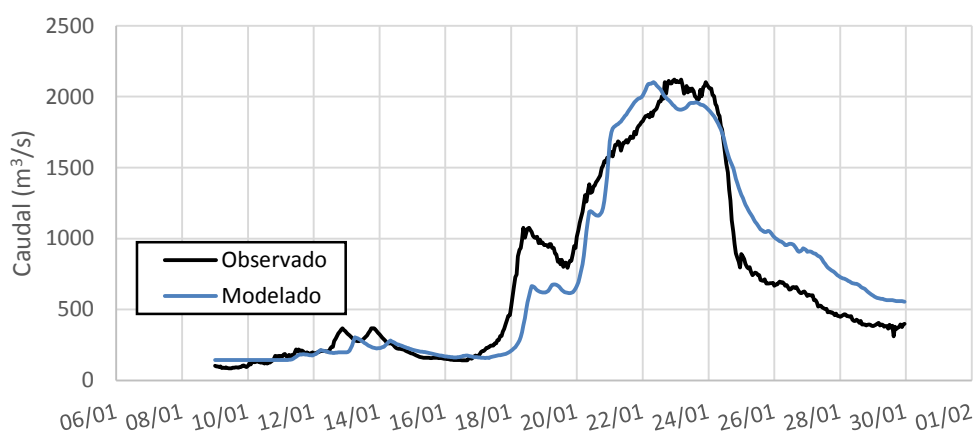
### 8.2.2.2. Segunda Corrida

En esta corrida se utilizaron los coeficientes de Manning presentados en la Tabla 25, que corresponde a valores obtenidos en campo.

**Tabla 25.-** Parámetros utilizados en la simulación.

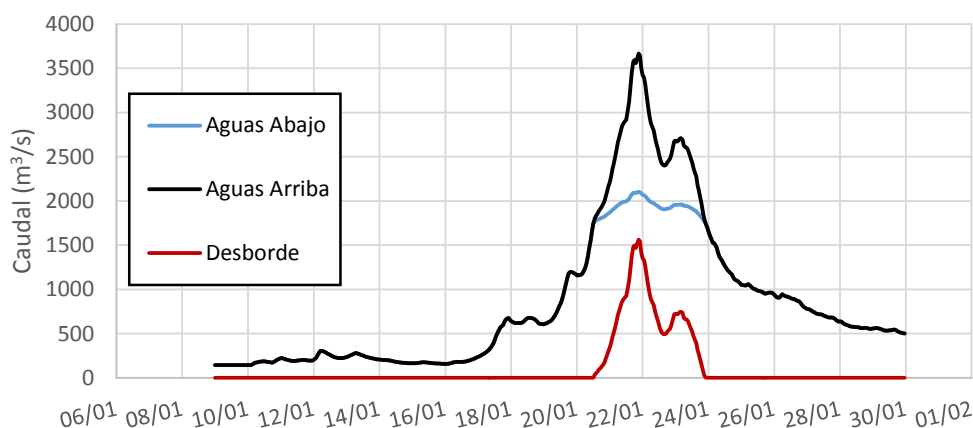
Tramo	n de Manning
1	0,0375
2	0,0375

La Figura 145 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida, caudal observado.



**Figura 145.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP

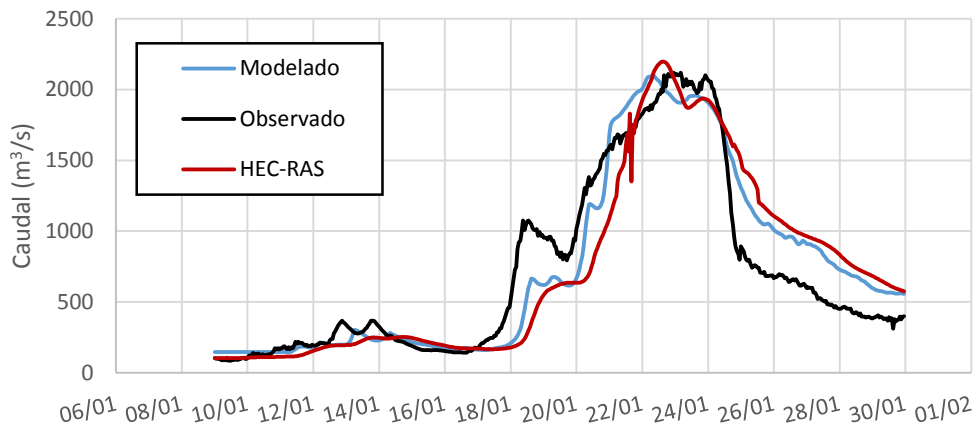
La Figura 146 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado.



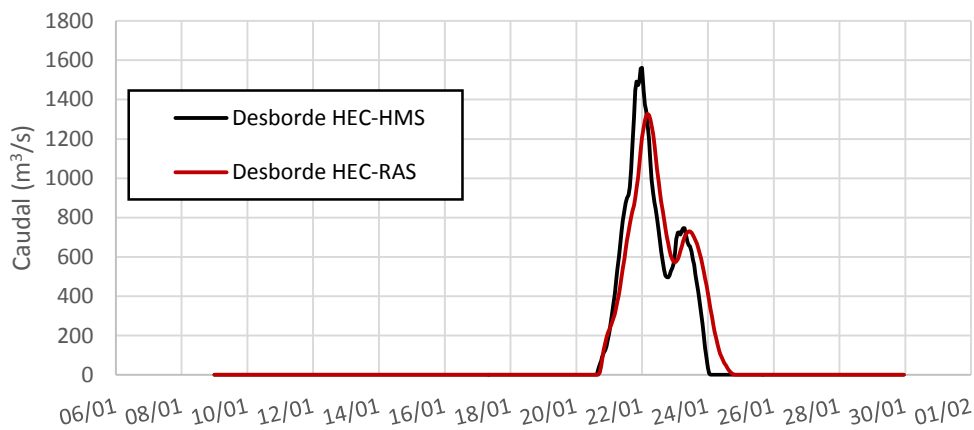
**Figura 146.-** Hidrogramas del desborde según simulación



La Figura 147 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 148 la comparación de los caudales desbordados.



**Figura 147.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 148.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

Esta corrida, presenta un el hidrograma desplazado hacia la derecha respecto al anterior, como es de esperar al aumentar el coeficiente n de Manning. El hidrograma se aleja del observado.

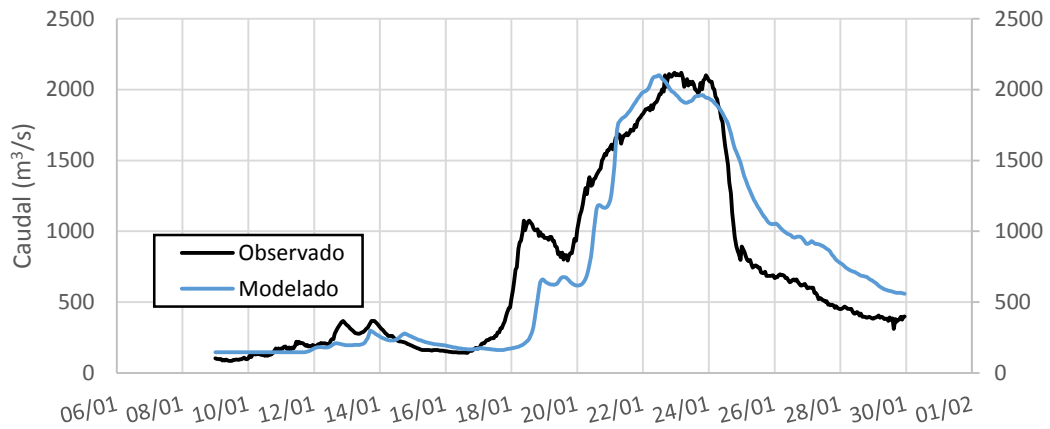
### 8.2.2.3. Tercera Corrida

En esta corrida se utilizaron los coeficientes de Manning presentados en la Tabla 26, que corresponden a valores medios de los obtenidos en campo.

**Tabla 26.-** Parámetros utilizados en la simulación.

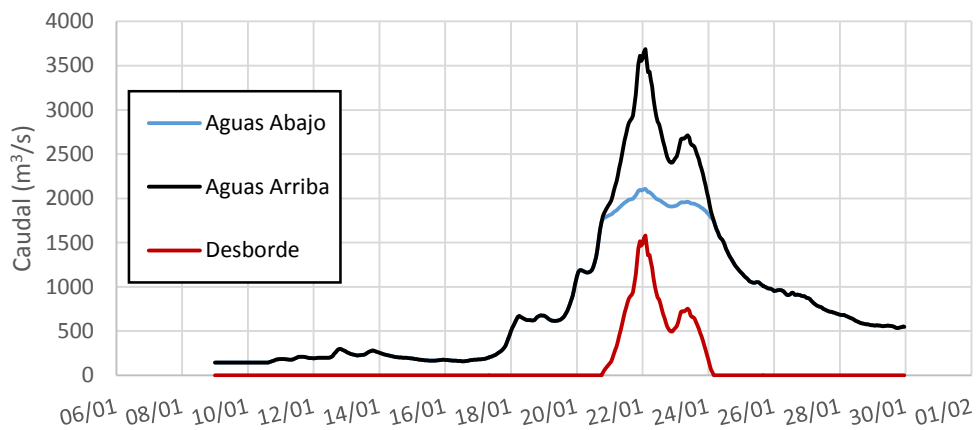
Tramo	n de Manning
1	0,050
2	0,050

La Figura 149 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida.



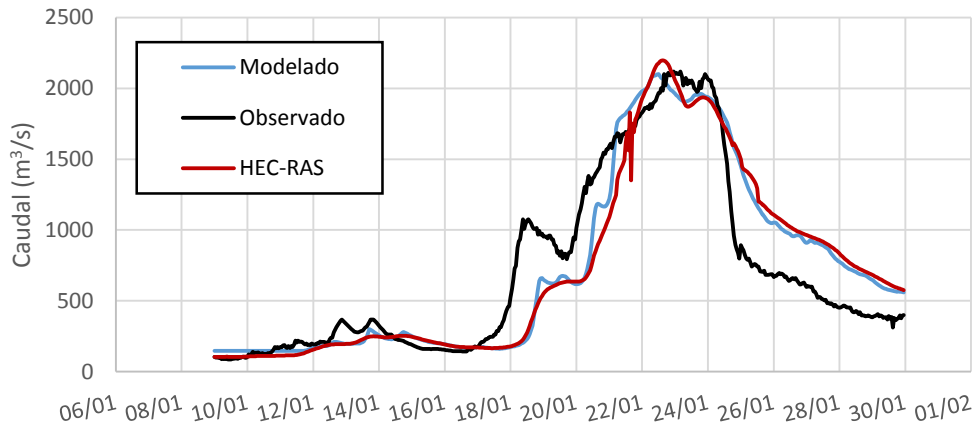
**Figura 149.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP

La Figura 150 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado.

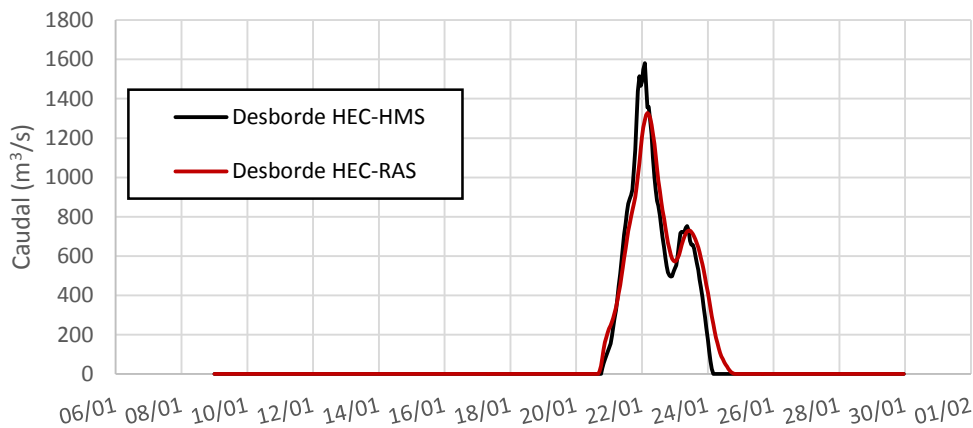


**Figura 150.-** Hidrogramas del desborde según simulación

La Figura 151 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 152 la comparación de los caudales desbordados.

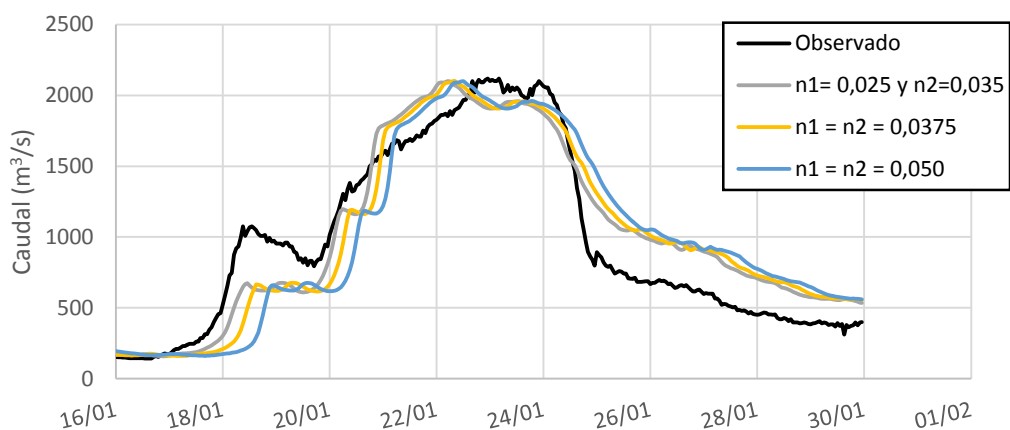


**Figura 151.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 152.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

El desplazamiento del hidrograma modelado hacia la derecha es aún mayor que en la segunda corrida por tener un  $n$  de Manning aún mayor. Se observa que esta corrida se aproxima a los valores obtenidos con la modelación hidráulica.



**Figura 153.-** Comparación de Hidrogramas con diferentes  $n$  de Manning, Onda Cinemática.

La Figura 153 presenta los hidrogramas de las tres corridas y nos muestra como los hidrogramas se desplazan a la derecha a medida que se aumenta el coeficiente de rugosidad. Se observa también que los picos son muy similares para las tres corridas.

8.2.2.4. Cuarta Corrida

Se realizó una corrida utilizando como caudal observado en Misión La Paz el que se obtuvo por la modelación de HEC-RAS para ver que valores de n de Manning representarían mejor esta situación, es decir, se plantea una comparación de parámetros modelo-modelo. Al calibrar los n de Manning se obtienen los presentados en la Tabla 27.

Tabla 27.- Parámetros utilizados en la simulación.

Tramo	n de Manning
1	0,059
2	0,069

La Figura 154 muestra los resultados de la modelación con HEC-HMS y con HEC-RAS. Recordemos que en el modelo hidrodinámico se utilizó un  $n=0,023$ . La Figura 155 presenta los desbordes para ambos modelos.

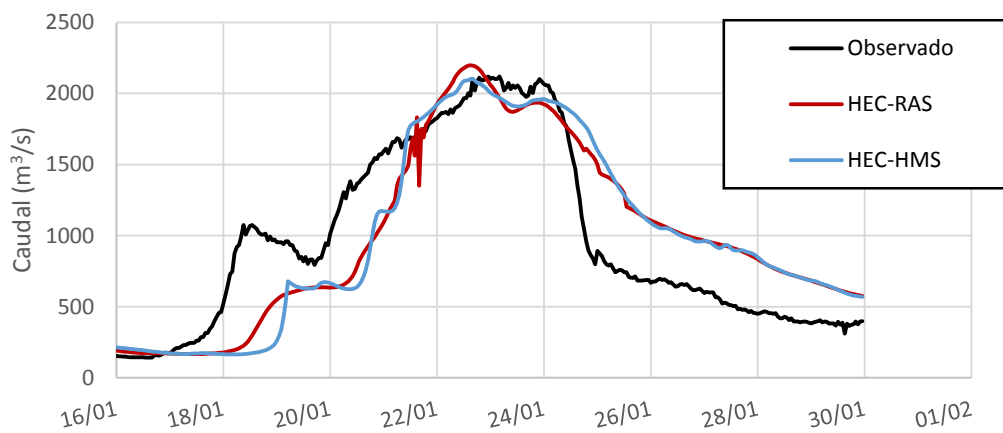


Figura 154.- Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

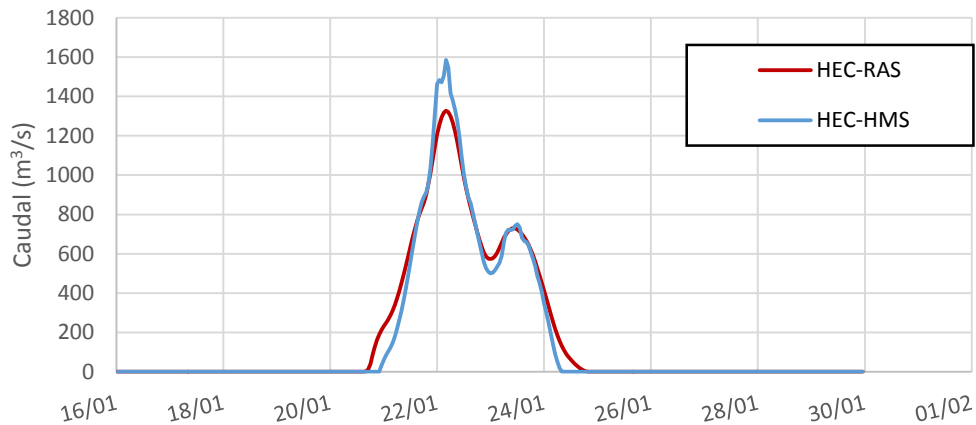


Figura 155.- Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

Vemos que dos modelos diferentes, que tienen un parámetro de rugosidad, que en principio tendría un sentido físico, para obtener los mismos resultados requieren diferente valor en uno y otro modelo. La calibración del modelo de onda cinemática requiere un valor de  $n=0,059$  para el tramo aguas arriba del desborde y de  $0,069$  aguas abajo y el modelo hidráulico requiere un  $n$  de  $0,023$  para todo el tramo.

### 8.2.3. *Muskingum-Cunge*

Cunge combinó la simplicidad del método de Muskingum con métodos hidráulicos. Calculó las dos constantes utilizadas en el método de Muskingum, K y X, con parámetros hidráulicos del cauce.

$$K = \frac{\Delta x}{c}$$
$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{BS_0c\Delta x} \right)$$

Donde  $\Delta x$  es la longitud del tramo del cauce considerado  $c$  es la celeridad de onda,  $S_0$  es la pendiente media del cauce,  $Q$  es el caudal y  $B$  es la anchura del cauce. La correcta aplicación de este método requiere elegir correctamente el  $\Delta t$  y el  $\Delta x$ .

El  $\Delta t$  se elige como el menor de los siguientes valores: el dado por las especificaciones, el tiempo de viaje a lo largo del tramo o 1/20 el tiempo de elevación del pico en la rama ascendente más pronunciada del hidrograma de entrada (USACE 2000). Una vez que se calculó  $\Delta t$ ,  $\Delta x$  se calcula como  $\Delta x = c\Delta t$  restringido a que

$$\Delta x < \frac{1}{2} \left( c\Delta t + \frac{Q_0}{BS_0c} \right)$$

Donde  $Q_0$  es el caudal de referencia calculado a partir del hidrograma de entrada como

$$Q_0 = Q_B + \frac{1}{2}(Q_{peak} - Q_B)$$

Dónde  $Q_B$  es el caudal base del hidrograma y  $Q_{peak}$  es el caudal pico del hidrograma de entrada.

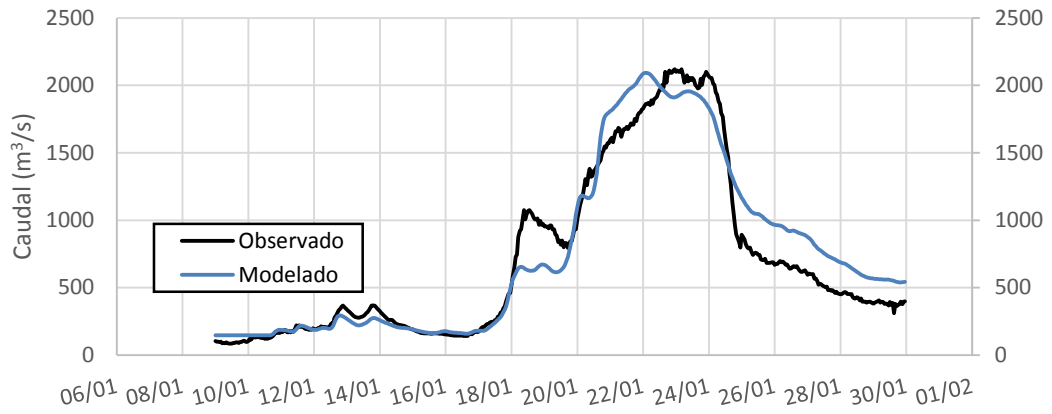
#### 8.2.3.1. Primera Corrida

Al calibrar la función objetivo entre las fechas 19 de enero de 2013 a las 00:00 hs y el 29 de enero a las 23:00 hs, se obtuvieron los parámetros presentados en la Tabla 28:

**Tabla 28.-** Parámetros utilizados en la simulación.

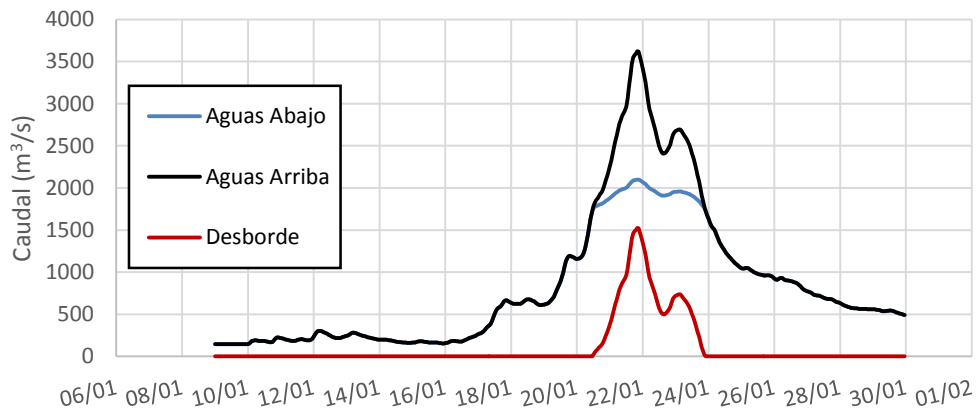
Tramo	n de Manning
1	0,022
2	0,023

La Figura 156 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida.



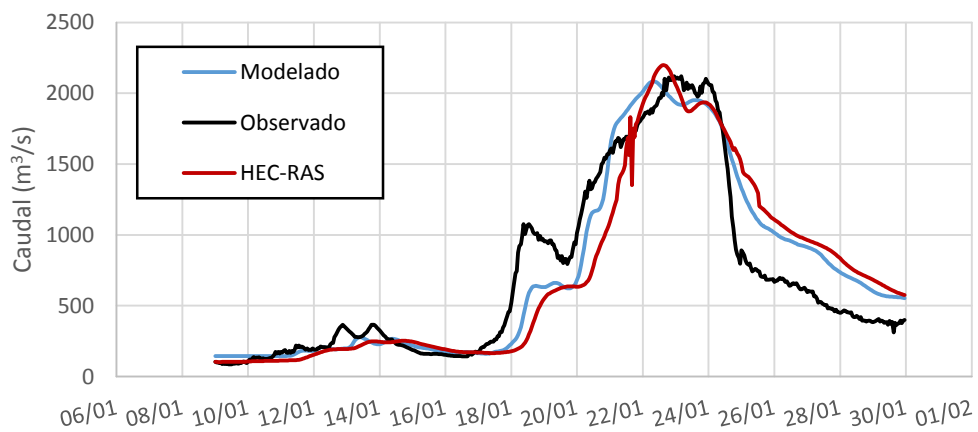
**Figura 156.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP.

La Figura 157 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral.

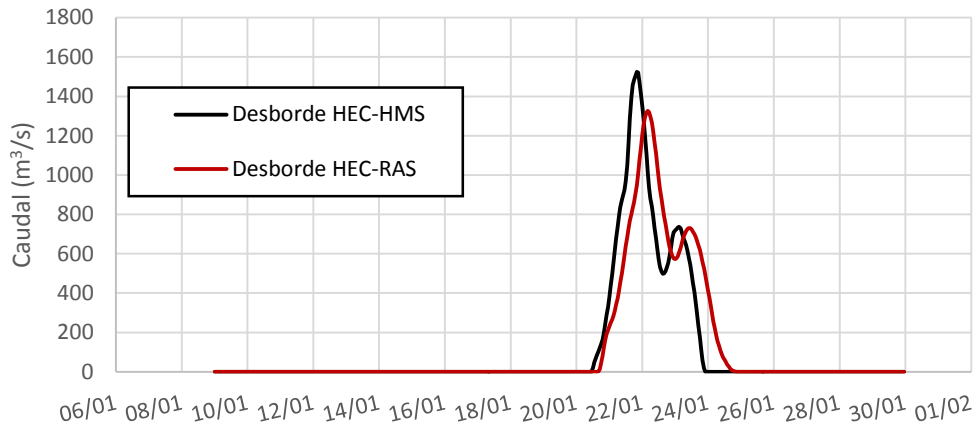


**Figura 157.-** Hidrogramas del desborde según simulación.

La Figura 158 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 159 la comparación de los caudales desbordados.



**Figura 158.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 159.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

Los hidrogramas obtenidos para esta corrida son muy similares a los obtenidos en la primera corrida por el método de Onda Cinemática. Se observa que la rama descendente del hidrograma modelado sobrestima los caudales observados y lo inverso ocurre en gran parte de la rama ascendente, no obstante hay una buena representación del pico.

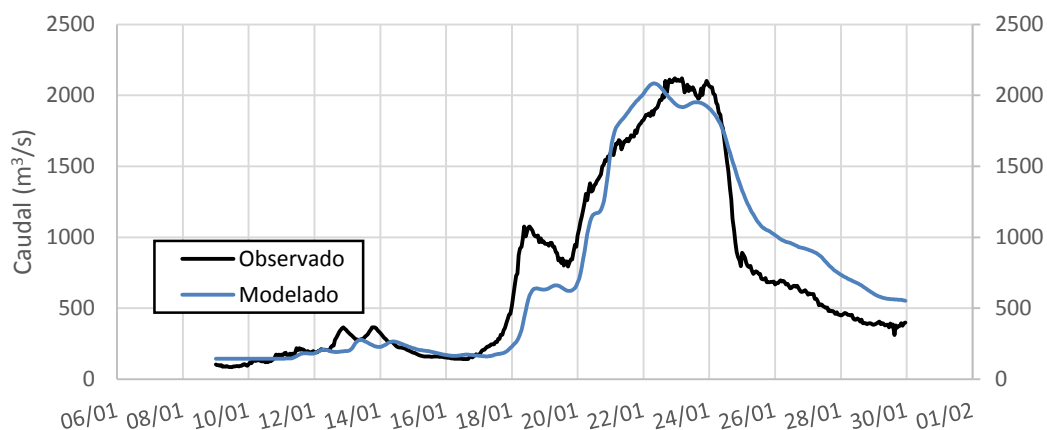
### 8.2.3.2. Segunda Corrida

En esta corrida se utilizaron los coeficientes de Manning presentados en la Tabla 29, correspondientes al menor valor obtenido en campo.

**Tabla 29.-** Parámetros utilizados en la simulación.

Tramo	n de Manning
1	0,0375
2	0,0375

La Figura 160 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida.



**Figura 160.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP

La Figura 161 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado.



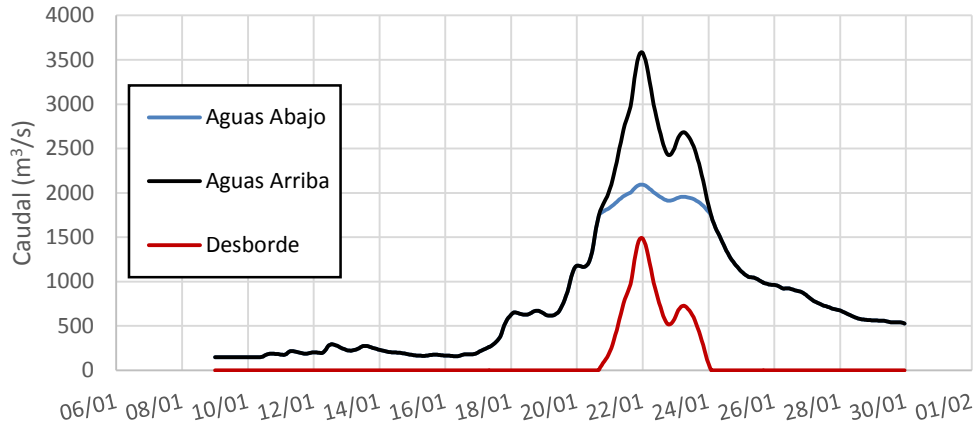


Figura 161.- Hidrogramas del desborde según simulación

La Figura 162 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 163 la comparación de los caudales desbordados.

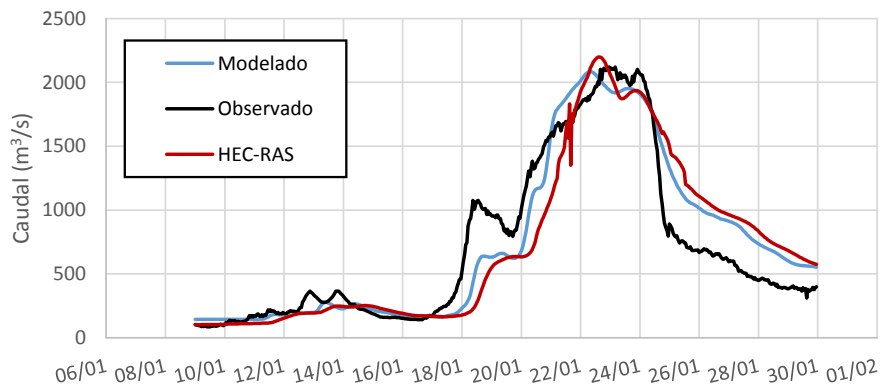


Figura 162.- Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS

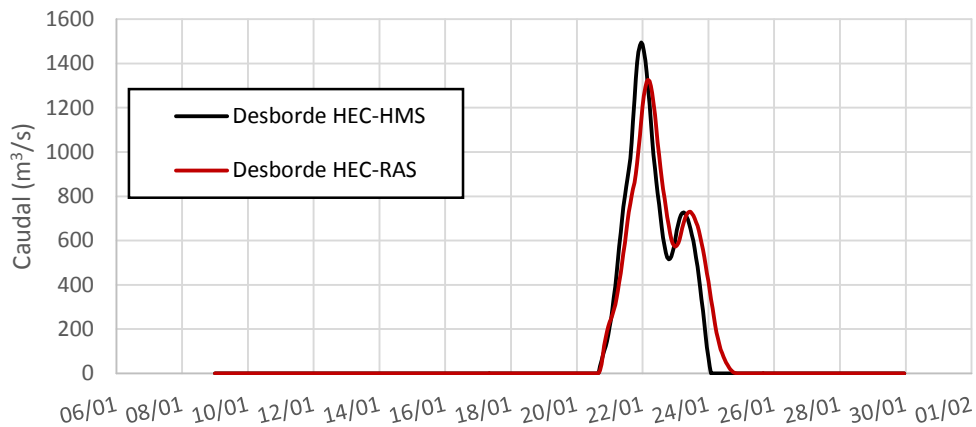


Figura 163.- Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

Esta corrida, presenta un el hidrograma desplazado hacia la derecha respecto al anterior, como es de esperar al aumentar el coeficiente n de Manning. El hidrograma se aleja del observado y se acerca al obtenido por la modelación hidráulica.

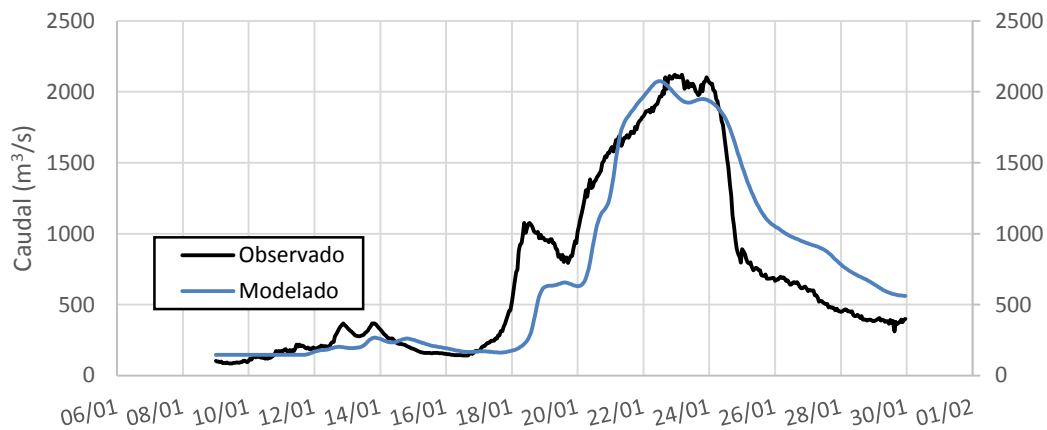
### 8.2.3.3. Tercera Corrida

En esta corrida se utilizaron los coeficientes de Manning presentados en la Tabla 30, correspondiente a valores medios obtenidos en campo.

**Tabla 30.-** Parámetros utilizados en la simulación.

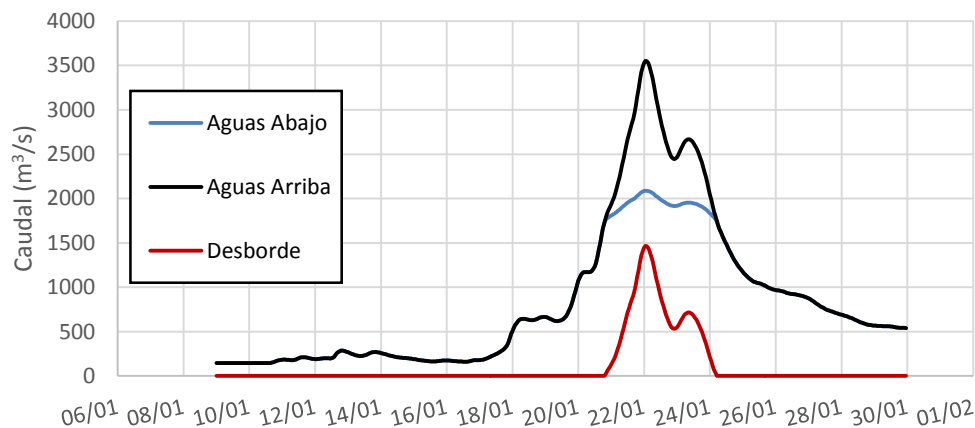
Tramo	n de Manning
1	0,050
2	0,050

La Figura 164 presenta los hidrogramas que arriban a MLP según la simulación y según valores calculados a partir de lecturas de escala y la curva H-Q para esta crecida, caudal observado.



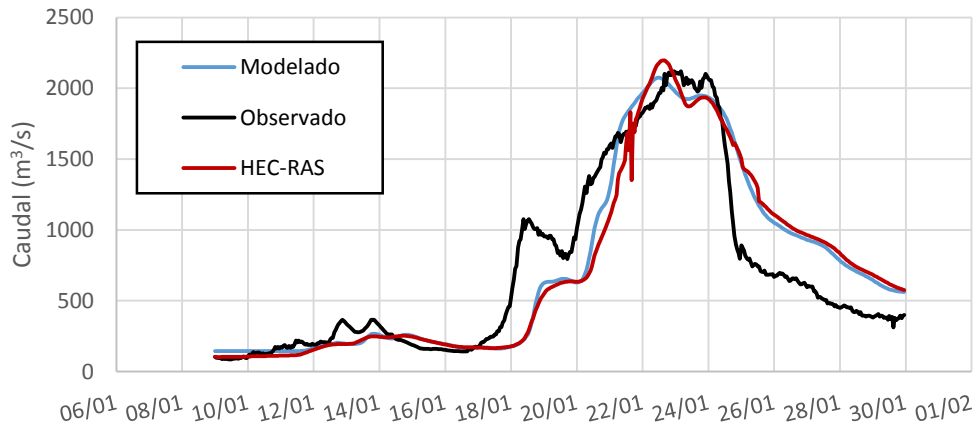
**Figura 164.-** Hidrogramas Observado y Modelado para MLP

La Figura 165 presenta la simulación del desborde a la altura de El Chañaral, vale recordar que en estas modelaciones se simulan todos los desbordes en uno, dejándose para trabajos futuros el análisis del comportamiento de cada uno de ellos por separado.

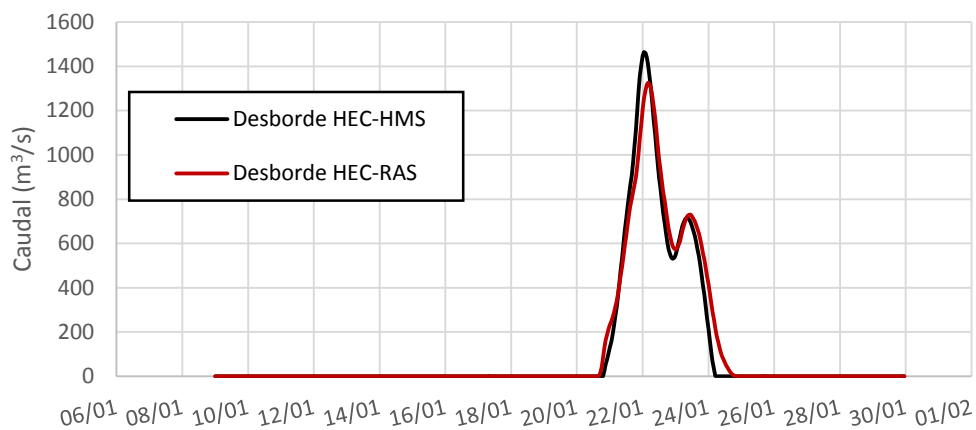


**Figura 165.-** Hidrogramas del desborde según simulación

La Figura 166 presenta además la comparación con los resultados proporcionados por la modelación hidráulica y la Figura 167 la comparación de los caudales desbordados.

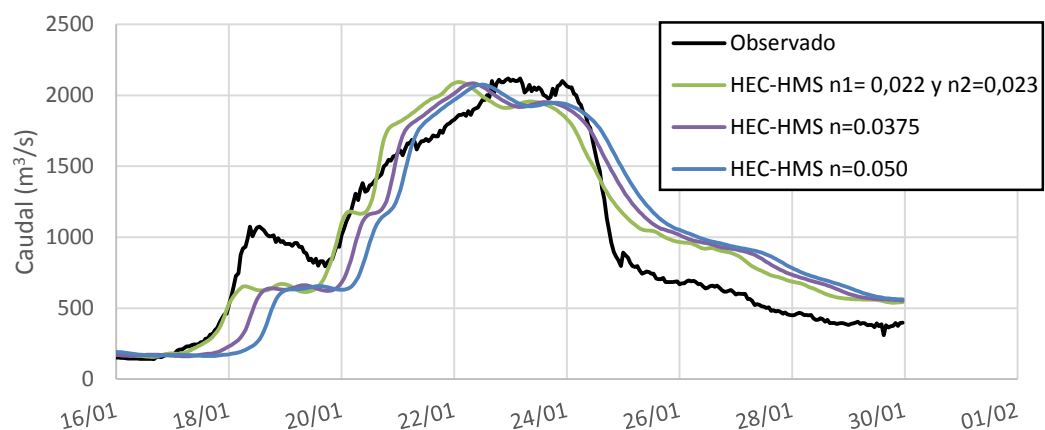


**Figura 166.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 167.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

El desplazamiento del hidrograma modelado hacia la derecha es aún mayor que en la segunda corrida por tener un  $n$  de Manning aún mayor. Se observa que esta corrida se aproxima a los valores obtenidos con la modelación hidráulica.



**Figura 168.-** Comparación de Hidrogramas con diferentes  $n$  de Manning, Muskingum-Cunge.

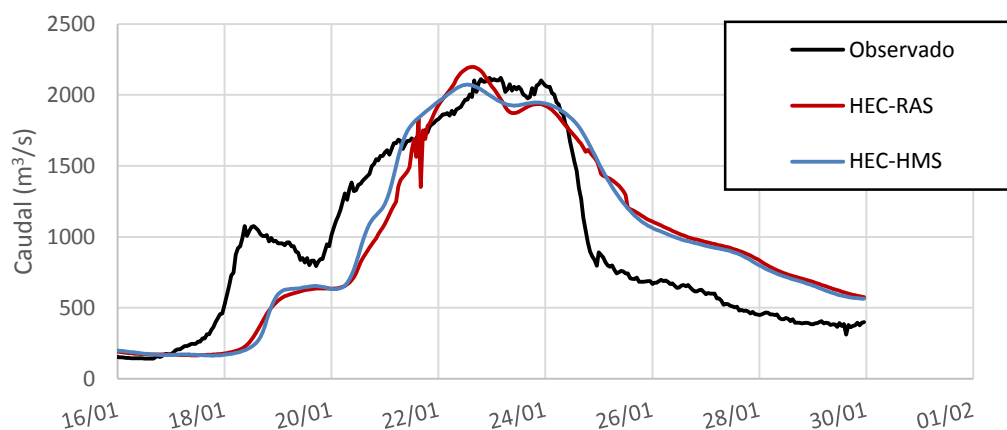
La Figura 170 presenta los hidrogramas de las tres corridas y nos muestra como los hidrogramas se desplazan a la derecha a medida que se aumenta el coeficiente de rugosidad. Se observa también que los picos son muy similares para las tres corridas.

### 8.2.3.4. Cuarta Corrida

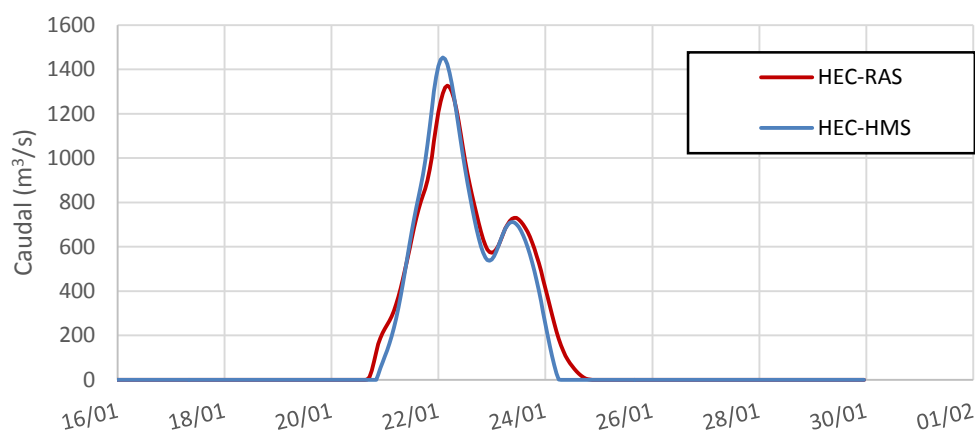
Se realizó una corrida utilizando como caudal observado en Misión La Paz el que se obtuvo por la modelación de HEC-RAS para ver que valores de  $n$  de Manning representarían mejor esta situación, es decir, se plantea una comparación de parámetros modelo-modelo. Al calibrar los  $n$  de Manning se obtienen los presentados en la Tabla 31.

**Tabla 31.-** Parámetros utilizados en la simulación.

Tramo	$n$ de Manning
1	0,054
2	0,054



**Figura 169.-** Comparación de Hidrogramas según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS



**Figura 170.-** Hidrogramas del desborde según resultados de Modelos de HEC-RAS Y HEC-HMS.

La Figura 169 muestra los resultados de la modelación con HEC-HMS y con HEC-RAS. Recordemos que en el modelo hidrodinámico se utilizó un  $n=0,023$ , el modelo de onda cinemática requería otros valores del coeficiente de Manning:  $n= 0,059$  para el tramo aguas arriba del desborde y  $n= 0,069$  aguas abajo, valores también diferente al obtenido aquí, y para este caso se han utilizado los demás parámetros intervinientes idénticos al de onda cinemática.

La Tabla 32 resume los valores de los parámetros utilizados en las corridas de los diferentes modelos.

**Tabla 32.-** Coeficientes utilizados en las diferentes corridas.

	$k_1$	$k_2$	$x_1$	$x_2$	$n_1$	$n_2$
Muskingum (1)	12,35	9,59	0,1882	0,1884	-	-
Musikingum (2)	23,03	8,97	0,1885	0,1890	-	-
Onda cinemática (1)	-	-	-	-	0,0250	0,0350
Onda cinemática (2)	-	-	-	-	0,0375	0,0375
Onda cinemática (3)	-	-	-	-	0,0500	0,0500
Onda cinemática (4)	-	-	-	-	0,0590	0,0690
Muskingum-Cunge (1)	-	-	-	-	0,0220	0,0230
Muskingum-Cunge (2)	-	-	-	-	0,0375	0,0375
Muskingum-Cunge (3)	-	-	-	-	0,0500	0,0500
Muskingum-Cunge (4)	-	-	-	-	0,0540	0,0540
Hidráulico - SRTM	-	-	-	-	0,0230	0,0230
Hidráulico - ASTER	-	-	-	-	0,0230	0,0230

### 8.3. Conclusiones

En este capítulo se ha aproximado el hidrograma de crecidas por medio de modelos hidráulico e hidrológicos. Son muchas las incertidumbres en los datos de entrada para realizar la modelación, no obstante se consiguió lo que se puede considerar una primera aproximación al tramo del río, destacándose la obtención de hidrogramas de desbordes. Estos hidrogramas representan la suma de todos los desbordes, planteándose para trabajos futuros el desacoplarlos.

La Tabla 33 presenta los resultados de los diferentes modelos: volumen del hidrograma, caudal pico y tiempo de tránsito del pico y del frente de la crecida, este último considera como umbral del frente los 1700 m<sup>3</sup>/s. Estos valores han sido comparados con los hidrogramas observados en Misión La Paz.

**Tabla 33.-** Comparación de resultados de los diferentes modelos y valores observados.

	Volumen Desbordado (hm <sup>3</sup> )	% Vol Respecto al Observado	Caudal Pico de la Crecida (m <sup>3</sup> /s)	% Caudal Respecto al Observado	Fecha del Pico	Diferencia de pico (h)	Tiempo de Tránsito (h)	Q Próximo a 1700 (m <sup>3</sup> /s)	Fecha Frente de Crecida Q≈1700 m <sup>3</sup> /s	Tiempo de Tránsito frente (h)
MLP - Observado	309.6		2119.9		22/01/2013 14:00		991118.00	1710.0	21/01/2013 17:00	
Muskingum (1)	223.3	72.13	2078.2	98.0	22/01/2013 09:00	5	991113.00	1721.9	21/01/2013 00:00	17
Musikingum (2)	234.5	75.72	2062.4	97.3	22/01/2013 19:00	-5	991123.00	1712.9	21/01/2013 10:00	7
Onda cinemática (1)	250.5	80.89	2101.8	99.1	22/01/2013 05:00	9	991109.00	1729.6	20/01/2013 21:00	20
Onda cinemática (2)	260.1	83.99	2103.0	99.2	22/01/2013 08:00	6	991112.00	1749.3	21/01/2013 01:00	16
Onda cinemática (3)	273.7	88.40	2101.0	99.1	22/01/2013 12:00	2	991116.00	1713.6	21/01/2013 05:00	12
Onda cinemática (4)	289.1	93.35	2103.9	99.2	22/01/2013 16:00	-2	991120.00	1742.0	21/01/2013 11:00	6
Muskingum-Cunge (1)	240.1	77.54	2093.5	98.8	22/01/2013 02:00	12	991106.00	1736.7	20/01/2013 19:00	22
Muskingum-Cunge (2)	258.0	83.31	2084.3	98.3	22/01/2013 08:00	6	991112.00	1715.5	21/01/2013 02:00	15
Muskingum-Cunge (3)	271.0	87.51	2075.4	97.9	22/01/2013 12:00	2	991116.00	1734.0	21/01/2013 08:00	9
Muskingum-Cunge (4)	274.9	88.78	2072.6	97.8	22/01/2013 13:00	1	991117.00	1712.7	21/01/2013 09:00	8
Hidráulico - SRTM	293.6	94.81	2162.4	102.0	22/01/2013 15:00	-1	991119.00	1714.1	21/01/2013 17:00	0
Hidráulico - ASTER	307.0	99.14	2119.9	100.0	1/23/2013 1:00	-11	991129.00	1738.4	22/01/2013 03:00	10

Se observa que el caudal pico de los diferentes modelos y corridas tiene una muy buena correspondencia con el observado. El tiempo de arribo del pico de la crecida varía mucho de corrida en corrida, esto se debe a que es muy dependiente de los parámetros utilizados en los modelos de tránsito: el k de Muskingum o el n de Manning. Los modelos hidrológicos, presentan una diferencia de volúmenes respecto al observado que oscila entre el 72% y el 99%.



## **9. Movimiento de Fondo en la Sección de Aforo de Misión La Paz**

La erosión general ocurre como consecuencia del aumento de la capacidad del río para transportar sedimentos durante una crecida o como consecuencia de alteraciones antrópicas. Junto con el aumento de nivel consecuencia del aumento de flujo hay un aumento en la velocidad y en la tensión de corte en el fondo. Se entiende por erosión general transitoria al descenso que experimenta el lecho del río por el aumento del caudal líquido que escurre por el mismo (Farías 2008).

Se ha observado que todo el ancho de la sección tiende progresivamente a descender a medida que aumenta el caudal y a rellenarse durante el descenso del hidrograma de la crecida. Este fenómeno es característico de las corrientes efímeras y de los ríos en zonas semiáridas. La profundidad media del lecho del río en una sección depende no sólo del caudal sino que también están íntimamente relacionado con los cambios en el ancho, profundidad, velocidad y carga de sedimento durante el paso de la crecida. Cada uno de estos parámetros presenta histéresis, de manera tal que la rama ascendente del hidrograma se caracteriza por una mayor carga de sedimento una mayor velocidad y una menor profundidad que para el mismo caudal en la rama descendente del hidrograma. De manera similar, el máximo descenso del fondo no se corresponde necesariamente con el paso del máximo caudal de la crecida (Leopold, Wolman y Miller 1995).

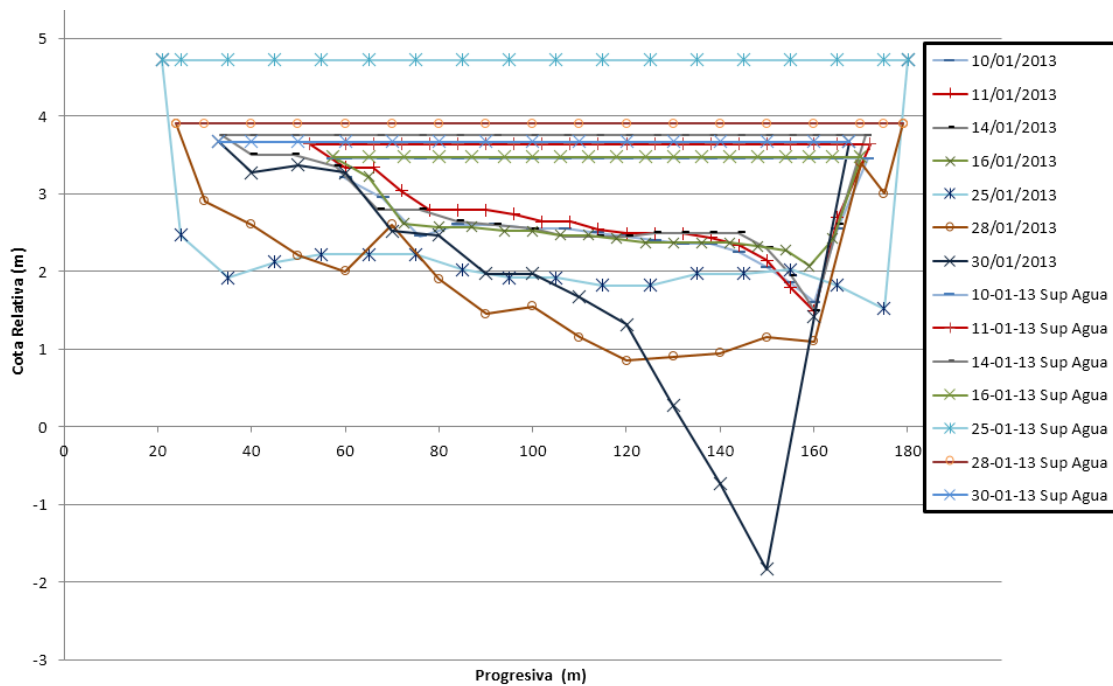
En el Pilcomayo durante el paso de la crecida la sección transversal se incrementa no solo por el incremento del nivel del pelo de agua sino también por el aumento de la profundidad, que llega hasta los 4 metros, por la remoción de material de fondo arrastrado por la corriente. Esta profundización no ocurre solamente en algún punto localizado del lecho sino que se desencadena un proceso de socavación general por el paso de los sedimentos de fondo a integrar la carga en suspensión. Estos fenómenos observados en el Río Pilcomayo son particulares del mismo, no detectándose en otros cauces de agua, en los cuales las modificaciones de las formas de fondo no adquieren semejante magnitud (Kopaliani y Georgievsky 1993).

De manera simplificada, se puede estimar la profundidad del fondo para una determinada descarga si se conocen el tirante y la pendiente de la superficie de agua se puede aproximar la velocidad media y el área transversal para esta descarga. Muchos ríos, en especial los que fluyen sobre gravas, tienen la tendencia de desarrollar canales localizados y también suelen presentar bancos móviles que pueden producir por lo menos bifurcaciones parciales y canales preferenciales de circulación en caudales bajos que contribuyen a marcadas irregularidades para caudales altos (Breusers y Raudikivi 1991). El Pilcomayo si bien tiene una granulometría correspondiente a arenas finas limosas en Misión La Paz presenta este tipo de canalizaciones (Figura 171).

A partir de las planillas de aforo del periodo comprendido entre 10 de enero de 2013 y el 30 de enero de 2013 del Río Pilcomayo en la sección de Misión La Paz, se obtuvieron cotas relativas a la lectura de escala, tanto de la superficie de agua como del fondo, obteniéndose así la variación del perfil de la sección durante la crecida.

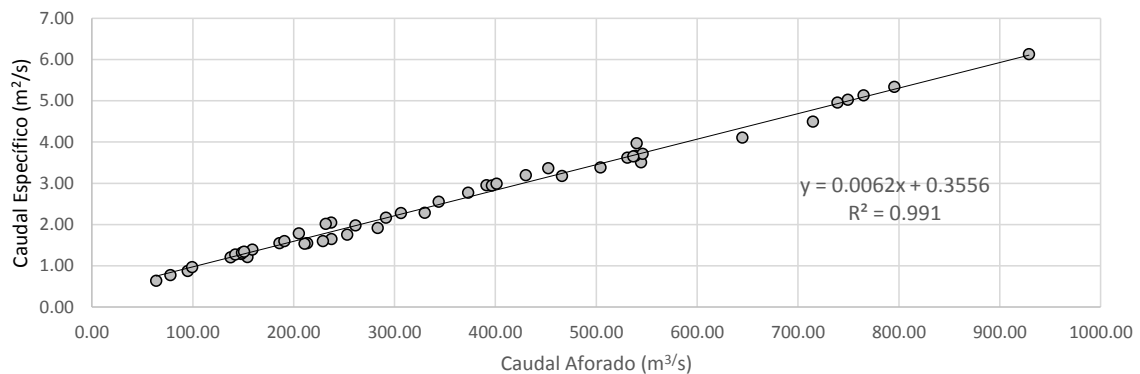


A continuación se muestran las secciones para diferentes fechas y sus correspondientes lecturas de superficie de agua, estas se indican con el mismo símbolo que el fondo pero con un tono de color más claro.



**Figura 171.-** Lecho y superficie de Agua medidos en el Río Pilcomayo en la Sección misión la Paz, enero 2013.

Se buscó una función que vincule los caudales aforados y los caudales específicos, encontrándose una muy buena relación lineal (Figura 172).



**Figura 172.-** Relación entre Caudal y Caudal Específico

Hay diferentes formulaciones empíricas que se utilizan para determinar la erosión generalizada transitoria en el lecho de ríos como son las propuestas por Lischtván – Lebediev (1959), Laursen (1960), Blench (1969), Mazza – Echeverría (1973) y Kopaliani y Giorogievsky (1993). Ninguna de estas fórmulas se aproxima a los valores aforados. Estas fórmulas tienen la forma  $h_s = c_0 q^{c_1} d^{c_2}$ . Se utilizó un  $d_{50} = 0,20$  mm que es el sedimento medio del lecho en Misión La Paz para aguas altas (CTN - CCE 1997).

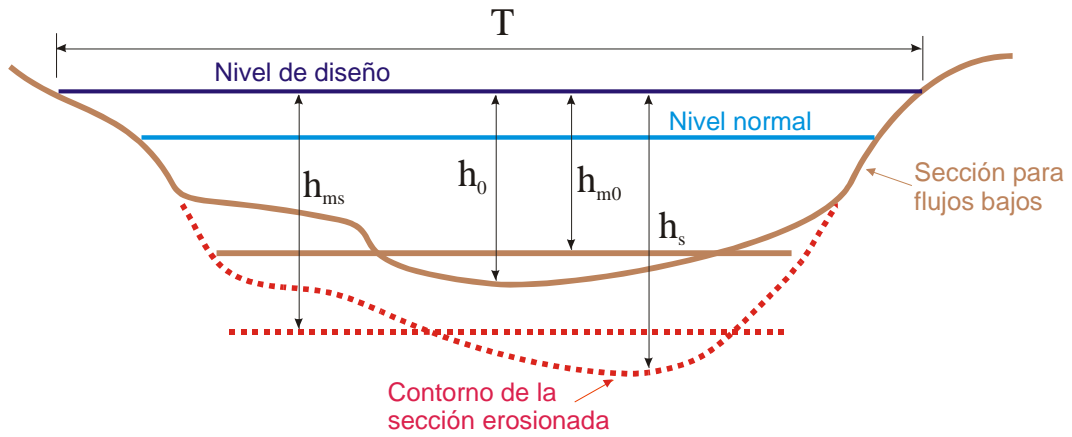


Figura 173.- Elementos característicos de una sección considerados para el cálculo de la erosión potencial generalizada transitoria (Farías 2011).

Tabla 34.- Coeficientes para las formulaciones de Erosión generalizada transitoria (Farías 2011).

Formula	$c_0$	$c_1$	$c_2$
Lischtvan-Lebediev	0.333	0.710	0.199
Laursen	0.205	0.860	0.284
Blench	0.380	0.667	0.167
Maza A. - García F.	0.209	0.870	0.305
Maza A. - Echavarría A.	0.365	0.784	0.157
Kellerhals	0.470	0.800	0.120

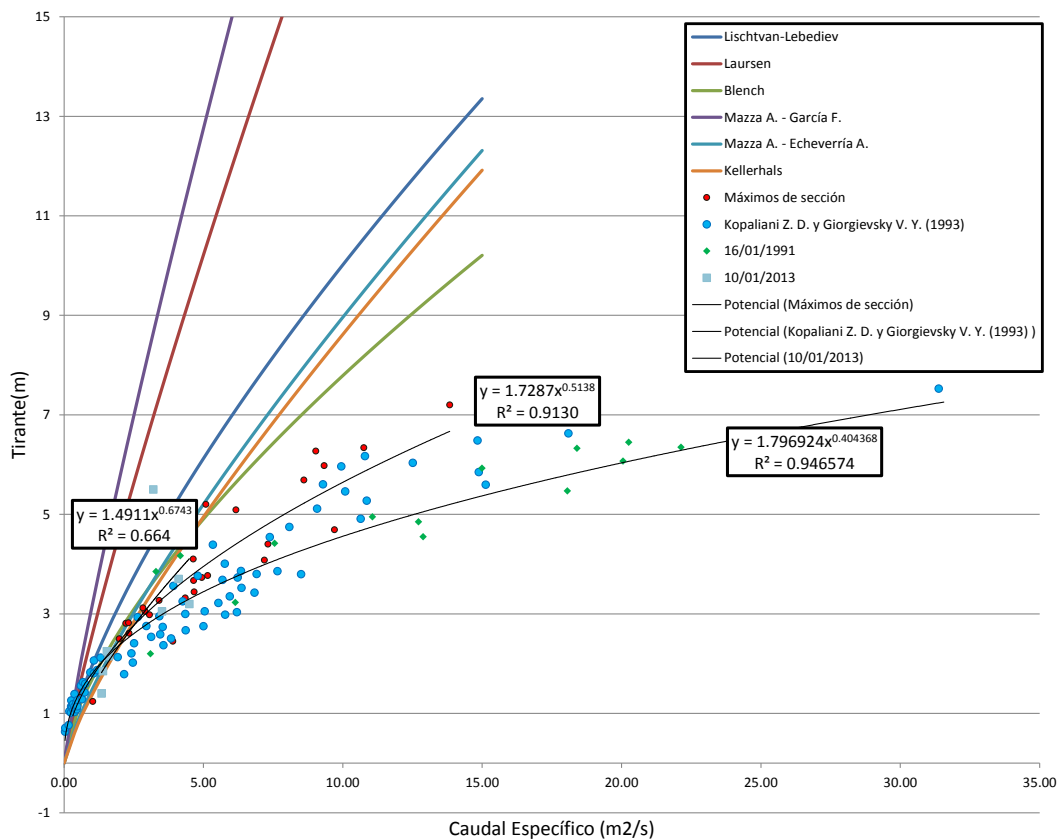
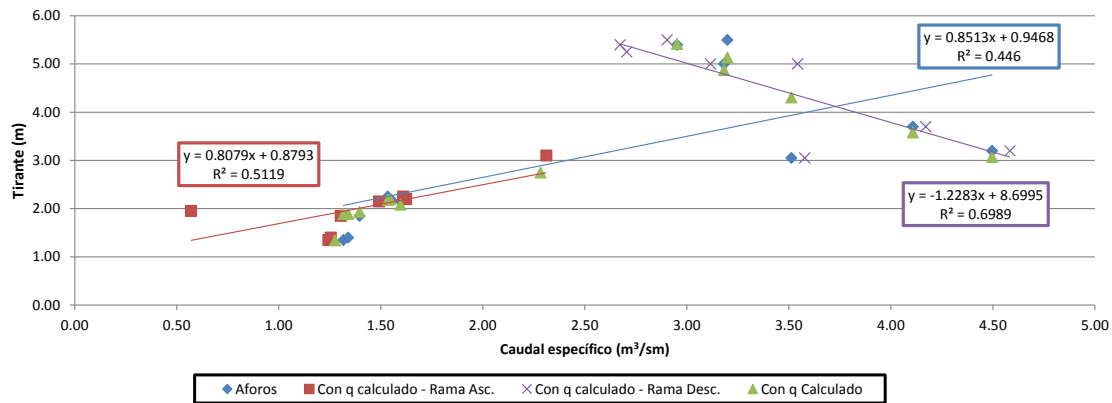


Figura 174.- Formulaciones de Erosión General Transitoria. (Baldissoni 2013) Modificada

Se ajustó una curva potencial que se aproxime con suficiente precisión teniendo en cuenta varias crecidas del río. Se llegó a  $h = 1,7287 \cdot q^{0,5138}$ , donde h es el tirante y q el caudal

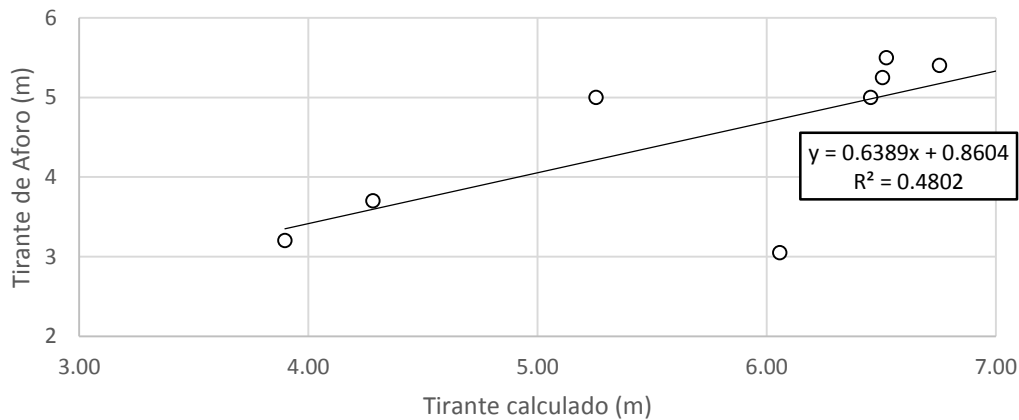
específico. El fondo se calcula restándole a la lectura de escala el tirante obtenido y da buenos resultados para la rama ascendente del hidrograma.

Por otro lado, se dividió el hidrograma en rama ascendente y descendente para la crecida del año 2013 y se obtuvieron dos fórmulas para calcular el tirante a partir del caudal específico (Figura 175).



**Figura 175.-** Tirante en relación al caudal específico para las ramas ascendentes y descendentes del hidrograma. Crecida 2013

Los valores diarios de caudal obtenidos a partir de la lectura de escala no coinciden plenamente con los aforados. Esta situación nos ha llevado a realizar una corrección a la rama descendente como se observa en la Figura 176.



**Figura 176.-** Corrección del tirante para rama descendente del hidrograma

En la Figura 177 se han representado los valores aforados de niveles, lecho o fondo y caudales así como los calculados según diferentes formulaciones, incluyendo las de caudal específico calculado con rama descendente corregida y sin corregir. Se puede observar que hay un desplazamiento de nueve días entre el caudal máximo y la máxima profundidad del lecho medido en campo.

Movimiento de Fondo en la Sección de Aforo de Misión La Paz

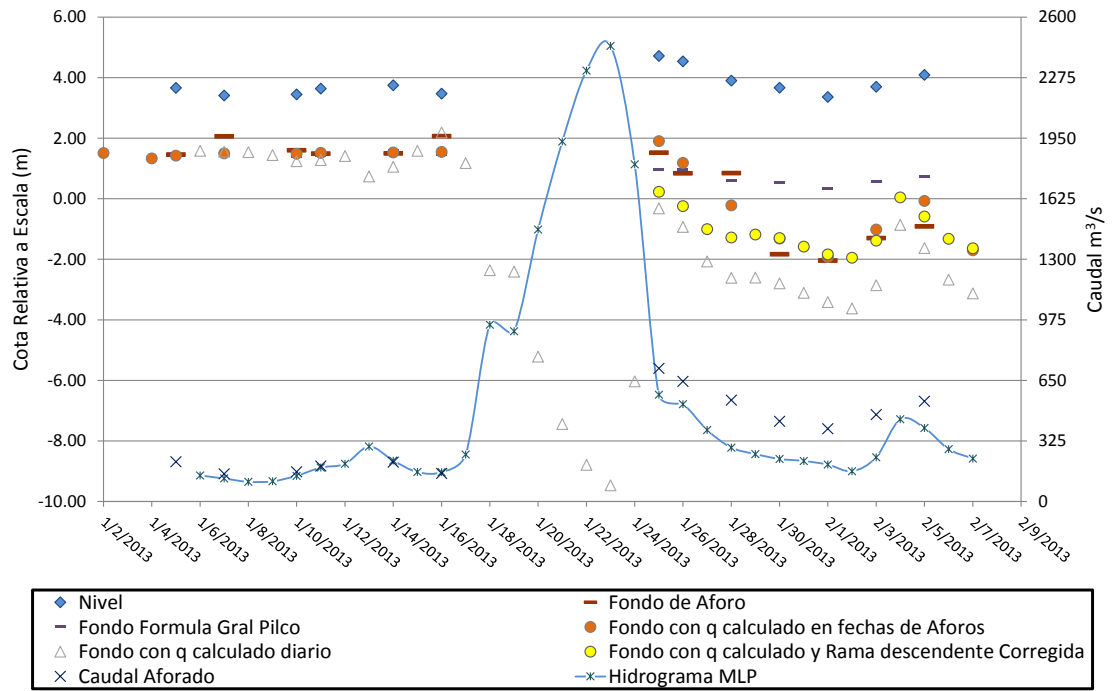


Figura 177.- Cotas relativas de la Superficie de Agua, del fondo y del fondo calculado.



## **10. Propuesta de Metodología para el Estudio de Crecidas**

Como se ha visto en los capítulos precedentes, al ir abordando la temática desbordes se fueron presentado nuevos desafíos que fueron necesarios sortear para poder avanzar en el estudio.

Con toda esta información se ha confeccionado una metodología para el estudio de crecidas en el Río Pilcomayo.

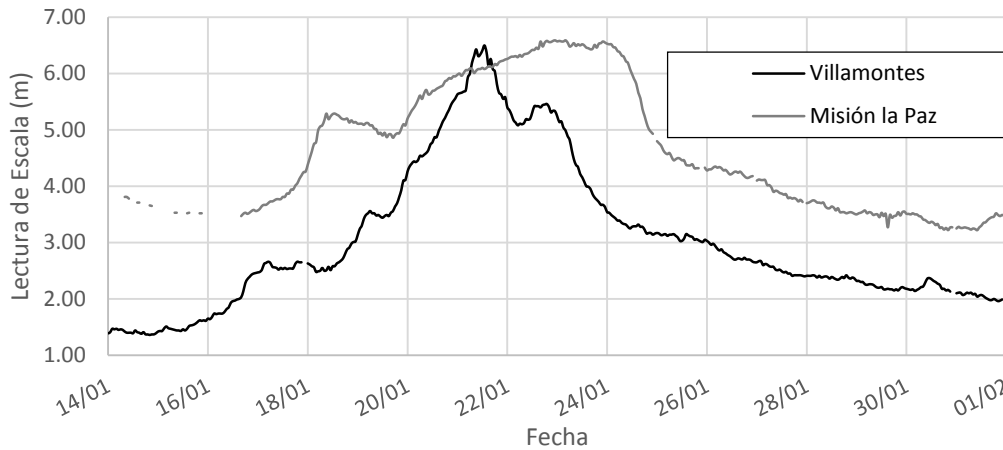
- 1.- Recolección de lecturas de Escalas
- 2.- Aplicación de la curva H-Q de Villamontes y verificación con los aforos que se realice durante la crecida. Obtención de H-Q de Misión La Paz a partir de los aforos y contraste con H-Q histórica y de crecidas anteriores. Determinar si es necesario formulaciones diferentes para rama ascendente y descendente del hidrograma de crecida.
- 3.- Análisis de lectura de escala, con el fin de determinar el tiempo de arribo del pico y frente de crecida así como 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 tiempo por encima de los 2700 m<sup>3</sup>/s en VM, es decir con desbordes.
- 6.- Aplicación de los modelos numéricos desarrollados y comparación con modelaciones de otras crecidas.
- 7.- Con los Aforos de Misión la Paz, analizar los movimientos del lecho y comparar con casos anteriores y formulaciones generales.

### 10.1. Análisis de la Crecida del año 2013

Se presenta a continuación la metodología aplicada al año 2013, año hidrológico 2012.

#### 10.1.1. Lecturas de Escala

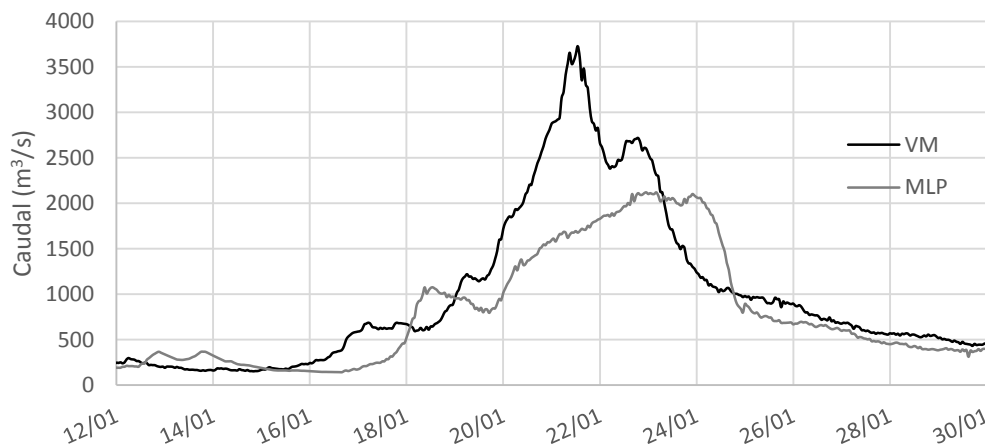
Se poseen las lecturas de escala horarias para VM y MLP, las que se presentan en la Figura 178. Se observa que hay algunas discontinuidades que serán rellenadas por el método lineal.



**Figura 178.-** Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.

#### 10.1.2. Hidrogramas

Se obtienen las curvas altura-caudal. Para Villamontes se aplica la formulación presentada en el inciso 3.1. Para Misión La Paz se obtiene la h-q a partir de los aforos con diferentes formulaciones para la rama ascendente y descendente. Los resultados se presentan en la Figura 179. El periodo de retorno calculado a partir de la ecuación propuesta para MLP en el Capítulo 4 es de 2,50 años.



**Figura 179.-** Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz.



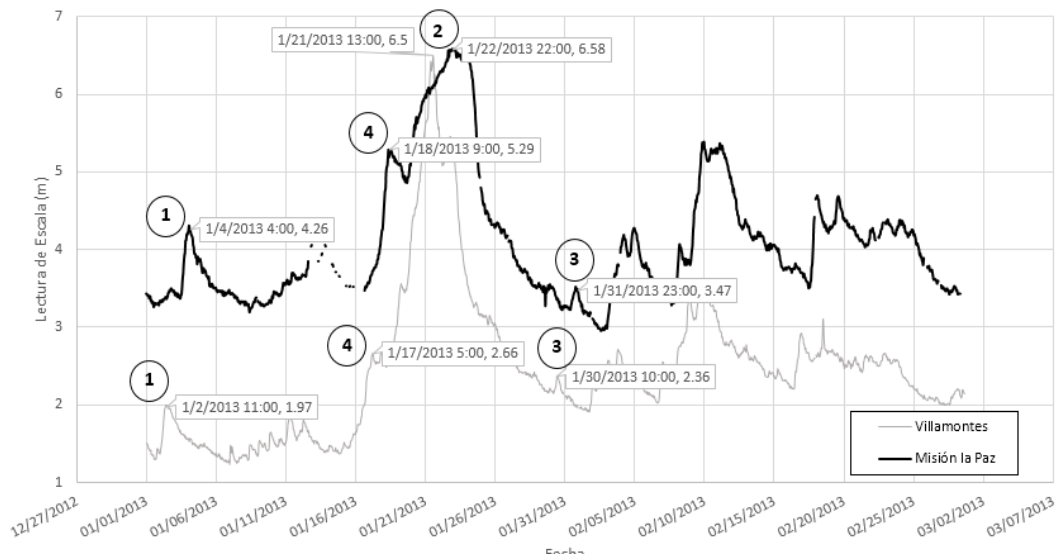
10.1.3. Análisis de las lecturas de escala

Estudiando las lecturas de escalas proporcionadas de manera horaria 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. Así, por ejemplo, se han calculado velocidades de tránsito para el pico mayor de la crecida, un pico menor y los puntos de inflexión en Rama descendente y ascendente del hidrograma, encontrándose valores en un rango que oscila entre 33 y 37 hs para el pico mayor y hasta 41 hs para que viaje el punto de inflexión de la rama descendente. Estos valores se presentan en la Tabla 35.

**Tabla 35.-** Tiempo de tránsito y propagación de la Crecida a partir de lecturas de escala en VM y MLP

	Hora y Fecha del Pico		ΔTiempo
	VM	MLP	Horas
<b>(1) Pico</b>	02/01/2013 11:00	04/01/2013 04:00	<b>41.0</b>
<b>(2) Pico mayor</b>	21/01/2013 13:00	22/01/2013 22:00	<b>33.0</b>
<b>(3) Inflexión R.Desc.</b>	30/01/2013 10:00	31/01/2013 23:00	<b>37.0</b>
<b>(4) Rama Asc.</b>	17/01/2013 05:00	18/01/2013 09:00	<b>28.0</b>

También se calculó el tiempo de duración de la base del hidrograma, obteniéndose que duró 27 días en Villamontes y 17 días en Misión La Paz. Respecto a la duración del pico, se estableció de 10 hs en Villamontes y de 38 hs en Misión La Paz. Estos valores se presentan en la Tabla 36 y, en la Figura 180 se presenta un esquema de los productos utilizados para esta descripción.



**Figura 180.-** Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.

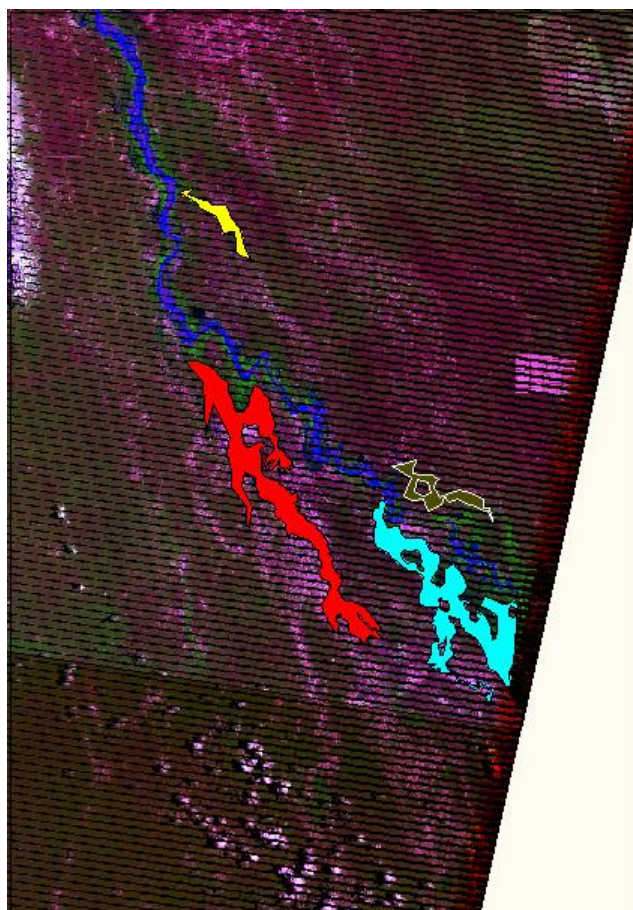
**Tabla 36.-** Duración base del hidrograma de crecida y duración del Pico

	Duración Base del Hidrograma de la Crecida		Δ Tiempo
	Inicio	Fin	Días
Villamontes	14/01/2013 16:59	01/02/2013 16:59	18
Misión La Paz	16/01/2013 16:59	02/02/2013 19:59	17,13

	Duración del pico de la Crecida		Δ Tiempo
	Inicio	Fin	Horas
Villamontes	21/012013 06:59	21/012013 16:59	10
Misión La Paz	22/012013 14:59	24/012013 04:59	38

#### 10.1.4. Análisis de Imágenes Satelitales

Siguiendo el procedimiento detallado en el capítulo 6 se obtuvo la Figura 181. Con la imagen georeferenciada y herramientas de análisis de imágenes se identifican y delimitan los desbordes.



**Figura 181.-** Imagen Landsat 2013025 (25/01/2013).

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

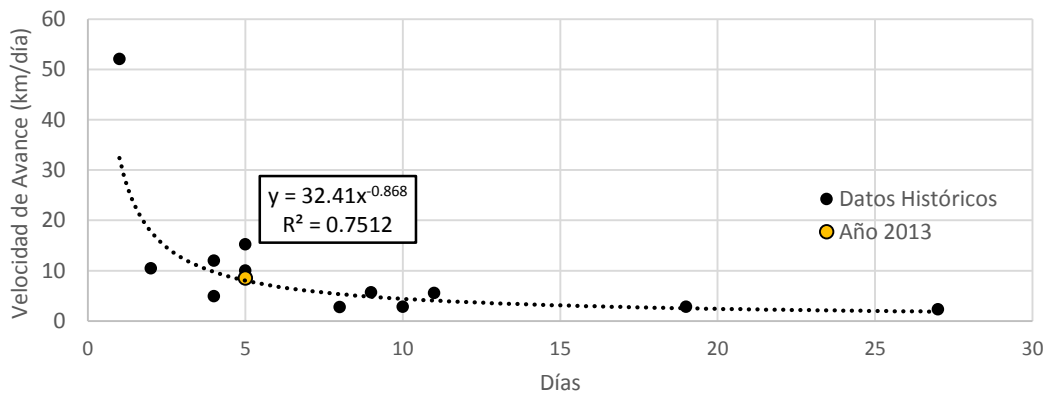
A partir de los datos recolectados, en los análisis anteriores se obtienen las áreas de desborde, las longitudes afectadas, el volumen desbordado y velocidad de avance del desborde. Los resultados para esta crecida se presentan en la Tabla 37. Se comparan estos valores con los de años anteriores como ya se realizó en el capítulo 6. Para este año la

diferencia de volúmenes que pasa por VM y luego por Misión La Paz es de 285 hm<sup>3</sup> y el periodo de retorno del evento, obtenido a partir de 4.1 es de 2,50 años

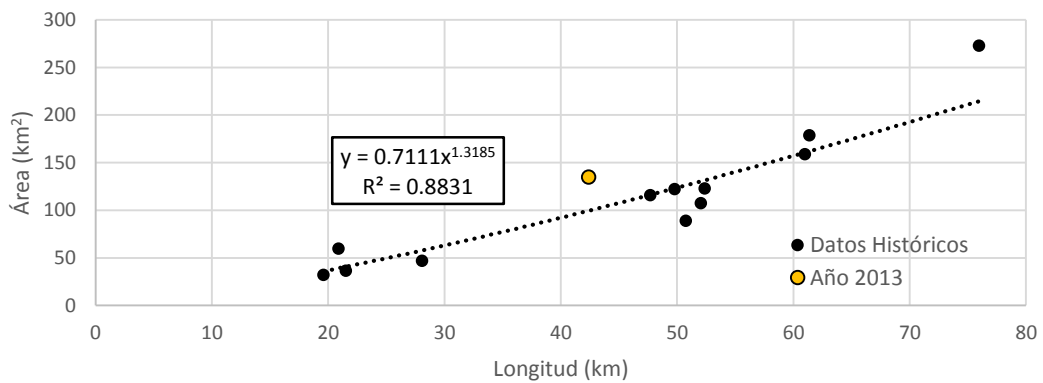
**Tabla 37.-** Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes.

Imagen	Fecha	Fecha del Pico VM	Qp VM m <sup>3</sup> /s	Fecha del Pico MLP	Qp MLP m <sup>3</sup> /s	Q VM m <sup>3</sup> /s	Q MLP m <sup>3</sup> /s	ΔT pico días	ΔT foto y píed días	Desbordes hacia Argentina		Desbordes hacia Paraguay					
										El Chañaral		La Gracia		Pozo Hondo		La Puerta	
										Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>	Longitud km	Área km <sup>2</sup>
2013025	25/01/2013	18/01/2013	3860	23/01/2013	2446	964	573	5	2	42.38	135.00	28.27	111.72	14.21	20.09	12.03	13.82

Los valores obtenidos se grafican en conjunto con los obtenidos en años anteriores. Las gráficas principales son las que vinculan el tiempo de la imagen con la distancia recorrida desde la activación del desborde (Figura 182) y las longitudes con las áreas inundadas (Figura 183), ya que han mostrado tener una buena relación y otra que se pueda proponer que despierte el interés.



**Figura 182.-** Relación Velocidad de Avance vs. Días transcurridos desde activación del desborde El Chañaral.



**Figura 183.-** Relación Área Inundada vs Longitud del desborde El Chañaral.

### 10.1.6. Aplicación de los modelos numéricos

La aplicación de los modelos numéricos permite corroborar los valores obtenidos de volúmenes desbordados y además una primera aproximación al hidrograma de desbordes. Ya se presentó la metodología en el capítulo 8. La Figura 184 presenta un resultado de la modelación hidrodinámica y el caudal observado que arriba a Misión La Paz.

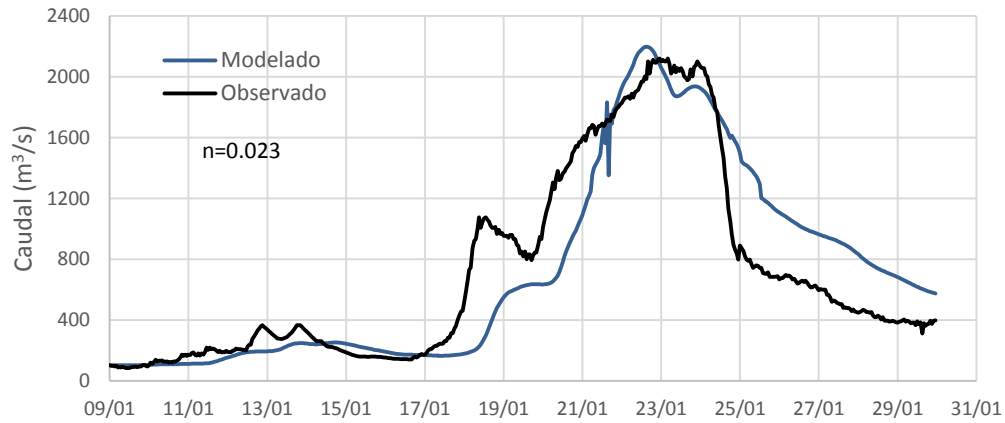


Figura 184.- Caudales que arriban a MLP, observado y modelado.

La Figura 185 presenta el hidrograma que representa la suma de los cuatro desbordes principales del tramo.

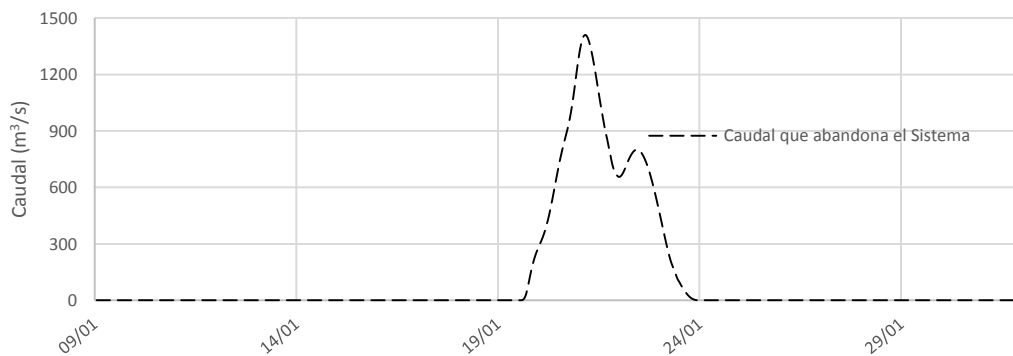


Figura 185.- Hidrograma modelado de los desbordes, efecto del vertedero lateral.

10.1.7. *Movimiento del Fondo*

En el Capítulo 9 se presentó en detalle el análisis del movimiento de fondo en MLP. Aquí se presenta nuevamente en la Figura 186 entre el 10 y el 30 de enero de 2013. Se observa en la Figura 178 que los niveles para este periodo van desde 3,50 m hasta 6,50.

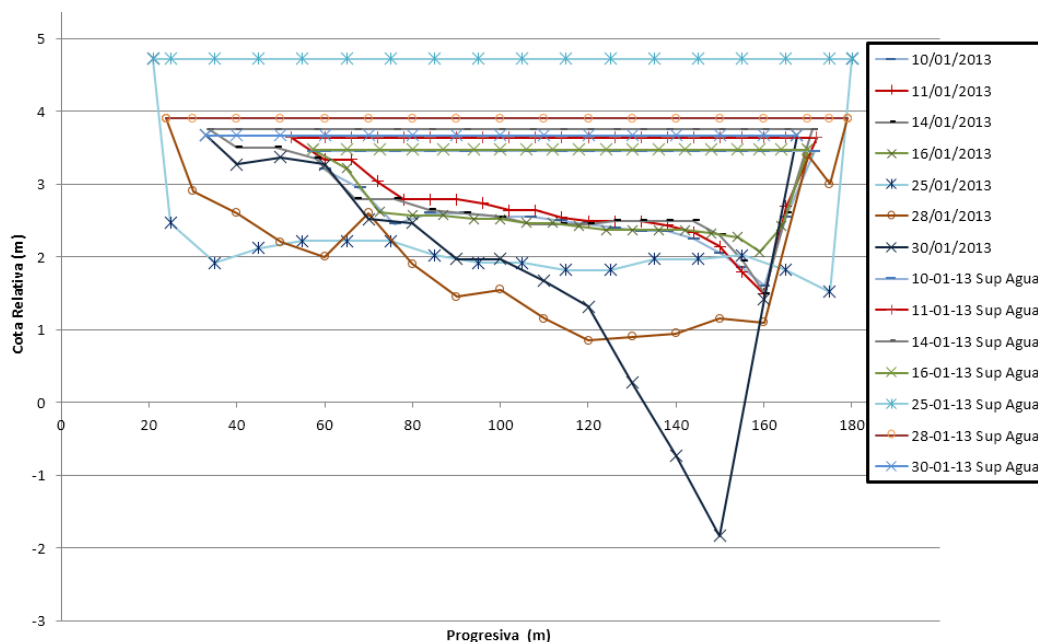


Figura 186.- Movimiento del Fondo y Superficie de Agua, Crecida año 2013.

Se observa que el fondo ha descendido desde 1,80 m de lectura de escala hasta los -1,90 m, es decir 3,70 m.

Para Villamontes no se poseen aforos para el mes de enero de 2013, por lo que no se puede realizar el análisis.



## **11. CONCLUSIONES**

En este trabajo se caracterizó el tramo del Río Pilcomayo comprendido entre Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP) mediante el análisis de datos de aforos líquidos, sólidos, batimetrías, curvas H-Q, imágenes satelitales y análisis de probabilidades de excedencia de caudales, para series históricas medidas durante más de 35 años en VM y 50 años en MLP.

Se obtuvo una curva de caudal, duración y recurrencia para Misión La Paz (Figura 57).

Se analizaron las principales restricciones que surgen al estudiar el tramo: la variabilidad de la sección en MLP, el movimiento del fondo, la necesidad de una curva H-Q para cada evento, la imposibilidad de aforar durante las crecidas en tiempos próximos al pico por resguardo del personal, así como tampoco se pueden hacer aforos con flotadores por la falta de batimetría que permita sacar un área próxima al paso de crecida.

El estudio de imágenes satelitales y datos hidrométricos han permitido caracterizar los desbordes comprendidos en el tramo: localización, caudales para los que se activan, velocidad de avance y pérdidas como insumos necesarios para un adecuado manejo de agua y sedimentos y diseño de defensas en la planicie de inundación correspondiente a la zona de estudio, y extendiendo el alcance del estudio hacia aguas abajo de MLP.

Se pudo establecer que los desbordes se activan en el siguiente orden: El Chañaral, La Gracia, y luego, con muy poca diferencia temporal La Puerta y Pozo Hondo. Se concluye que El Chañaral y La Gracia han desbordado para caudales de 2700 m<sup>3</sup>/s, estos son los principales desbordes en magnitud y persistencia y ambos vierten sus aguas para Argentina. Los desbordes La Puerta y Pozo Hondo, de menor magnitud y persistencia, vierten sus aguas al Paraguay. Todos los desbordes se encuentran activos cuando el caudal del pico en Villamontes es de 3500 m<sup>3</sup>/s. Se ha evaluado el efecto de los desbordes aguas arriba de Misión La Paz que regulan el caudal que llega a esta ciudad, que para el periodo en estudio, no supera los 3000 m<sup>3</sup>/s incluso si el caudal en VM es cercano a los 7000 m<sup>3</sup>/s.

Se ha determinado que para una diferencia de volúmenes de 495 hm<sup>3</sup> entre VM y MLP, en el año 2006, en 10 días desde el paso del pico por Misión La Paz se logra evacuar toda el agua de las zonas inundadas por los desbordes. En el año 2008 se observó mayor persistencia de la mancha de inundación, evacuándose en 12 días el agua de los desbordes de Pozo Hondo y La Puerta, encontrándose todavía agua en los desbordes El Chañaral y La Gracia. Así mismo, se ha establecido que se podría hablar de una referencia de tasa de reducción de área inundada de 1,9 a 4,5 km<sup>2</sup>/día para El Chañaral y de 7,5 a 9 km<sup>2</sup>/día para La Gracia.

A partir del análisis de curvas de excedencias de caudales para las estaciones de Villamontes y Misión La Paz se concluyó que hay pérdidas de 15 m<sup>3</sup>/s entre VM y MLP con una excedencia superior al 2 % que nos indica 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. Las primeras



pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de 2551 m<sup>3</sup>/s en VM y de 2100 m<sup>3</sup>/s en MLP, Valores muy próximos a los que se deducen por el análisis de hidrogramas e imágenes satelitales. Caudales de 3817 m<sup>3</sup>/s en VM y 2613 m<sup>3</sup>/s en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 %, producen grandes desbordes de aproximadamente 800 m<sup>3</sup>/s. Estos valores son congruentes con los que se observaron a partir de las imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados.

Los resultados en relación a desbordes en el tramo, obtenidos a partir de hidrogramas e imágenes satelitales, se contrastaron con una modelación hidrodinámica unidimensional del tramo. Utilizando un vertedero lateral en la modelación se pudo evacuar caudales simulando los desbordes para tener una información acabada de lo que verdaderamente ocurre en el tramo y el caudal que arriba a MLP.

Con todos los resultados anteriores se estableció un método para el análisis de crecidas, que en esta tesis se presentó para la crecida del año 2013.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amarilla, L. «Logros y Metas en Obras del Pilcomayo.» 2014.
- Amarilla, M. «Proyecto de Defensa para la localidad de El Potrillo y su zona de influencia debido a los desbordes del Río Pilcomayo, al Noroeste de la Provincia de Formosa.» 2005.
- Andréassian, V., y otros. «Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. .» *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Volume 6, 2009.
- Baldissone, M. «Estudio del Sistema Fluvial Embocadura del Río Pilcomayo para la Evaluación de la Distribución de Caudales entre Argentina y Paraguay.» Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba - Tesis de Maestría, 2013.
- Baldissone, M, A. Cristanchi, y A. Testa. «Informe Interno, campaña Septiembre 2013.» Misión la Paz, Septiembre de 2013.
- Baldissone, M., A. Cristanchi, y A. Testa Tacchino. «Informe Interno, campaña Septiembre 2013.» Misión la Paz, Septiembre de 2013.
- Berthet, L. «Prévision des crues au pas de temps horaire: pour une meilleure E21assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique.» PhD Thesis de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech., 2010.
- BIOSIS. «Informe Final - Reparación y Rehabilitación de Estaciones automáticas de Medición en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo.» Cochabamba, 2014.
- Blade, E., M. Sánchez-Juni, H. P. Sánchez, D. Niñerola, y M. Gómez. «Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable.» Edicions UPC, 2009.
- Brea, J. D., P. Spalletti, M. A. Irigoyen, G. Hillman, P. Gyssels, y C. Marcelo Baldissone. «Modelación Matemática del Río Pilcomayo en la zona de la Embocadura.» *Informe Final*. La Plata: UNLP, Mayo de 2014.
- Brea, J. D. , y P. Spalletti. «Avances, retrocesos y estancamientos sobre el conocimiento de los procesos fluviales del Río Pilcomayo.» *Ríos 2011*, 2011.
- Breusers, H. N. C., y A. J. Raudikivi. «Scouring.» A. A. Balkema Publishers, 1991.
- Caccato, M. «Diseño Preliminar de las Estaciones Hidrometeorológicas del Río Pilcomayo.» 2000.
- Cafaro, E. D. «Estabilización del cauce principal y márgenes del río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos, tramo: Hito 1 / D'orbigny – el Pantalón. Análisis Geomorfológico.» 2010.
- Cafaro, E. D. «Evaluación de la información necesaria para el Diagnostico de una posible zona de avulsión del rio Pilcomayo.» Santa Fe, 2007.

- Cafaro, E. D., y C. G. Ramonell. «Evaluación de la Información Necesaria para el diagnóstico de una posible avulsión del Río Pilcomayo.» *Informe Final*. Santa Fe: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Mestro de la Cuenca del Río Pilcomayo, 2007.
- Cafaro, E., y C. Ramonell. «Respuesta Morfológica a variaciones interanuales de Caudales en el río Pilcomayo, Gran Chaco.» Cartagena de Indias: XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, s.f.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, y L. W. Mays. «Hidrología Aplicada.» McGraw hill Interamericana S.A, 1995.
- CIAT. 2014. <http://dapa.ciat.cgiar.org/datos-de-elevacion-para-el-mundo/> (último acceso: 14 de 08 de 2014).
- Clausen, B., y C. P. Pearson. «Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought' .» (Journal of Hydrology ) Nº 173 (111–130). (1995).
- Colegio Mayor Santo Tomás de Aquino*. 19 de 01 de 2014. <http://www.santotomas.edu.bo/>.
- Collischonn, W., y C. E. M. Tucci. «Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico.» Porto Alegre: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.
- Cordini, I. R. «Los ríos Pilcomayo en la Región de Patiño.» Buenos Aires, 1947.
- Corral, M. «Estabilización del Cauce Principal y Márgenes del Río Pilcomayo en Segmentos Identificados como Puntos Críticos. Tramo: Hito 1 / D'Orbigny – Misión la Paz / Pozo Hondo.» Córdoba, 2010.
- Corral, M. «Términos de Referencia para el Proyecto de Intervenciones en las márgenes de los tramos Críticos.» 2012.
- Cristanchi, M. A., y A. J. S. Testa Tacchino. «Informe Interno, Campaña enero de 2014.» Misión la Paz, Salta, Enero de 2014.
- Cristanchi, M. A., y A. J. S. Testa Tacchino. «Informe Interno, Campaña Julio 2014.» Córdoba, Julio de 2014.
- CTN - CCE. *Misión de Identificación y Análisis para el plan del Manejo Integrado - Geomorfología (Anexo 1)*. Comisión Trinacional para la Cuenca del Pilcomayo; Comisión de las Comunidades Europeas, 1997.
- De Lío, J. C., J. D. Brea, P. Jaime, y P. Spalletti. «Estudios de Erosión, Transporte y Sedimentación en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo.» Ezeiza, Marzo de 2007.
- De Simone, S. «Contenido de Metales Pesados en Peces Capturados en el Río Pilcomayo.» La Plata: VI Congreso Argentino de Limnología, Agua, Ambiente y Sociedad, 2014.

- Díaz, É. B., y A. J. S. Testa Tacchino. «Informe Interno - Curvas de Excedencia para VM y MLP.» 03 2014.
- Dirección Ejecutiva, Comisión Trinacional para el desarrollo de la Cuenca del Pilcomayo. *Pilcomayo.net*. 05 de 01 de 2014. *Pilcomayo.net*.
- ERSDAC. «Aster reference Guide Version 1.0.» Earth Remote Sensing Data Analysis Center, 2003.
- EVARSA. «Análisis Granulométrico y Determinación de la Concentración del Material en Suspensión de muestras líquidas en la Zona de Divagación del Río Pilcomayo.» Julio de 2007.
- Farías, H. D. «Erosión General en Lechos Aluviales. .» *Revista de Ingeniería del Agua, Vol. 15 N°2*. Córdoba: Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua, 2008.
- Farías, H. D. «Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales.» Editado por Fundación para la Ingeniería del Agua. Córdoba: Revista de Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. 3, 1995.
- Farías, H. D. «Presentación de Clases - Hidráulica Fluvial - Maestría en Recursos Hídricos - FCEFyN, UNC.» Córdoba, 2011.
- Farías, H. D., y E. C. «Estabilización del Cauce Principal y Márgenes del Río Pilcomayo en Segmentos Identificados como Puntos Críticos Tramo: Misión la Paz/Pozo Hondo - El Pantalón.» Agosto de 2010.
- Fernandez, C. «Discurso, Anuncio de Obras.» Capital Federal, 04 de 02 de 2013.
- García, M. H., D. M., Zhu Z., G. R. Torres, E. Cafaro, y C. G. Ramonell. «Modelación del Río Pilcomayo en el área de Misión la Paz - Pozo Hondo (2º Informe de Avance).» Santa Fé / Illinois, Enero de 2014.
- Gilard, O. *Recursos Hídricos de la Cuenca del Pilcomayo*. EUROPEAN FRAMEWORK GROUP, 1996.
- Gobierno de la Provincia de Salta. «Archivo Fotográfico.» Salta, 2013.
- Guccione, M. J., M. F. Burford, y M. G. Kendall. «Pemisot Bayou, a large distributary of the Mississippi River and a possible failed avulsion.» Smith & Rogers, 1999.
- Halcrow. «Obtención de información básica para la realización del estudio de prefactibilidad de la obra del dique distribuidor. Informe Final.» 2010.
- Halcrow, y Serman. *Línea Base Ambiental y Socioeconómica de la Cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, 2007.
- Halcrow, y-Serman. *Línea Base Ambiental y Socioeconómica de la cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, Bolivia: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo., 2007.

- Hopwood, H. J. «Taponamiento progresivo del cauce del Río Pilcomayo.» 2003.
- Iriondo, M., F. Colombo, y D. Kröhling. «El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina - Bolivia - Paraguay): Características y significado sedimentario.» *Geogaceta*, 2000: 79-82.
- Jack Kizobzi, J. , M. Ramette, y C. Roquero. «Misión de identificación y análisis para el Plan de Manejo Integrado - Fluviomorfología.» 1997.
- Khalid, M., y S. Bazoberry Otero. «Propuesta Preliminar Investigación: Erosión-Sedimentación.» La Paz, 1990.
- Klemes, V. «Dilettantism in Hydrology: transition or destiny?» *Water Resources Research*, 1986.
- Kopaliani, Z.D., y V.Y. Georgievsky. «Informe Técnico - Río Pilcomayo.» 1993.
- Laboranti, C. «Informe Campaña Enero 2014 en Villamontes.» Mesa Fluvial, UNLP, Enero de 2014.
- Lagranja, C. J. *Pilcomayo, Río de la Vida*. Formosa: Gobierno de la Provincia de Formosa, 2001.
- Leopold, L. B., M. Gordon Wolman, y J. P. Miller. «Fluvial Processes in Geomorphology.» New York: Doven Publications Inc., 1995.
- Makaske, B. «Anastomosing rivers: a review of their classification, origin and sedimentary products.» *Earth Science\_Reviews*, 2000.
- Malbrunot, A. *Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo*. 2006.
- Malbrunot, A, y M. A. *Sedimentología De La Cuenca Alta Del Rio Pilcomayo Aguas Arriba De Mision La Paz (Argentina)*. Tucumán: XXI° Congreso Nacional del Agua 2007, 2007.
- Martín Vide, J P., M. Amarilla, M. Gamarra, y F.o Zárate. «Problema de sedimentación en el río Pilcomayo.» 2006.
- Martinez Vega, J., y M. P. Martín Isabel. *Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid: España, 2010.
- Menéndez, Á. «Onda de Contaminación por Rotura de Diques de Colas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo.» 2014.
- OEA. «Aprovechamiento Múltiple de la Cuenca del Río Pilcomayo 3a Fase.» 1981.
- OEA, BID, y PNUD. *Aprovechamiento Múltiple de la Cuenca del Río Pilcomayo - Vol II, Recursos Hídricos*. 1977.
- OTT. «Operating Instructions - Radar Sensor Velocity - OTT Kalesto V.» Kempten, 2008.

- Pilgrim, D. H. «Model evaluation, testing and parameter estimation in hydrology. In: Prediction in Catchment Hydrology.» T.G.Chapman & F.X.Dunin, 1975.
- Pool, M., E. Usai, y J Baas. «Estudio del Río Pilcomayo, Informe Final.» Bruselas: EURAGRI temporary Association, 1993.
- 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.» 1996.
- Pool, M. «Reporte de la Misión técnica al área del Río Pilcomayo - Repúblicas de Argentina y Paraguay.» 1994.
- Rey Balmaceda, Raul C. «Límites y Fronteras de la República Argentina.» OIKOS, 1979.
- Rubín M., Á. «Clasificación de presas y evaluación del riesgo con programa HEC-RAS. Minor Thesis.» Catalunya: Minor Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, 2006.
- Salúm Flecha, A. «Historia Diplomática del Paraguay del Novecientos a la Paz del Chaco.» 1983.
- Slingerland, R., y N. D. Smith. «River Avulsions and their Deposits.» 2004.
- Spandre, R. «Resultados de la Segunda Misión del Experto Europeo en Hidrogeología.» 2005.
- Szupiany, R., y otros. «Evaluación de Tecnologías para la Cuantificación de Caudales y Caracterización del Flujo en el Río Pilcomayo.» Santiago: Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2014.
- Tsakiris, G, y otros. *Drought characterization*. Vols. Capitulo 7. páginas 85-102, de *Drought management guidelines technical*. Zaragoza: CIHEAM, 2007.
- Tujchneider, O., M. Paris, M. Perez, y M. D'Elia. «Estudio Hidrogeológico de la porción Apical del Abanico Aluvial del Río Pilcomayo, entre Ibibobo y Misión la Paz / Pozo Hondo (Argentina-Paraguay Y Bolivia).» Santa Fé, 2007.
- USACE. «HEC-HMS 4.0.» 2013.
- USACE. «HEC-RAS v. 4.1.0.» 2010.
- USACE. «Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual.» Washington, 2000.
- USGS. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc second (30m)*. 14 de 08 de 2014. <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>.
- Wentworth, C. K. «A Scale of Grade and Class terms for Clastic Sediments.» *Journal of Geology*, 1922.





**ANEXO - I.**

**PUBLICACIONES REALIZADAS**  
**EN EL CONTEXTO DE LA TESIS**



Se presentan a continuación los resúmenes de los artículos científicos y técnicos en los cuales ha participado el autor y están relacionados a la temática presentada en este trabajo.

- Baldissone, C. M., Rodríguez, A., Pagot, M., Corral, M., Farías, H.D., Testa Tacchino, A.J.S., Hillman, G. **(2012)**: *Problemáticas hidrosedimentológicas en la cuenca media-baja del Río Pilcomayo y aportes a la solución*. Revista del Centro de Estudios y Tecnología del Agua, Córdoba.
- Baldissone C. Marcelo, Testa Alejo, Rodríguez Andrés, Zambón Horacio **(2013)**: *Modelación hidrodinámica bidimensional de las nuevas obras de división de las aguas del Río Pilcomayo entre Argentina y Paraguay*. Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2013, San Juan, Argentina.
- Baldissone C. M., Gyssles P., Spalletti P., Hillman G., Brea D., Irigoyen M., Testa Tacchino, Rodriguez A. **(2013)**: *Modelación Hidrodinámica de las Intervenciones Sobre el Río Pilcomayo en la Zona de Embocadura*. Sexto Simposio Regional de Hidráulica de Ríos 2013, Santa Fe, Argentina.
- Testa Tacchino, Alejo, Baldissone C. M., Rodríguez A., Corral M., Farías H. D. **(2013)**: *"Caracterización de los desbordes del Río Pilcomayo en su tramo de Villamontes a Misión La Paz"*. Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2013, San Juan, Argentina.
- Testa Tacchino, Alejo; Baldissone, Cristian Marcelo; Rodríguez, Andrés; Corral, Mariano; Farías, H. Daniel. *"Análisis de los desbordes del Río Pilcomayo en su tramo de Villamontes a Misión La Paz"* **(2013)**: Sexto Simposio Regional de Hidráulica de Ríos 2013, Santa Fe, Argentina.
- Alejo J. S. Testa Tacchino, Érica B. Díaz, C. Marcelo Baldissone, M. Alejandra Cristanchi, Mariana Pagot, Leticia Tarrab, Horacio Herrero, Mariano Corral, Claudio Laboranti, Andrés Rodríguez. *"Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: Caracterización y Restricciones"*. **(2014)** Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.
- Ricardo Szupiany, Carlos M. García, Lucas Domínguez Rubén, Antoine Patalano, Francisco Latosinski, Alejo Testa, María Alejandra Cristanchi, Claudio Laboranti y Andrés Rodríguez **(2014)**: *"Evaluación de tecnologías para la cuantificación de Caudales y Caracterización del flujo en el río Pilcomayo"*. Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.
- R. Szupiany, L. Domínguez Rubén, F. Latosinski, C. M. García, A. Alvarez, A. Testa, M. A. Cristanchi, C. Laboranti y A. Rodríguez **(2015)**: *"Caracterización del sedimento suspendido en el Río Pilcomayo. Evaluación de la tecnología acústica para su cuantificación"*. Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, La Plata, Argentina.
- R. Szupiany, C. M. García, L. Domínguez Rubén, A. Patalano, F. Latosinski, A. Testa, M. A. Cristanchi, C. Laboranti y A. Rodríguez **(2015)**: *"Evaluación de Tecnologías Hidroacústicas para una cuantificación de Caudales en el Río Pilcomayo"*. Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, La Plata, Argentina.

- Testa Tacchino, Alejo, Cristanchi, María Alejandra, Constanza Vargas, Rodríguez, Andrés, Laboranti, Claudio, Corral, Mariano, Pagot, Mariana, Hillman, Gerardo, Farías, H. Daniel (2015): *“Análisis de la crecida del año 2014 del Río Pilcomayo en su tramo entre Villamontes y Misión La Paz”*. Congreso Nacional del Agua, Paraná, Entre Ríos.

**ANEXO - II.**

**CAMPAÑAS EN EL RÍO PILCOMAYO**  
**CON PARTICIPACIÓN DEL AUTOR**



Se ha participado en 3 campañas de la DE-CTN a la región del Pilcomayo con los objetivos de reconocer el terreno, observar y relevar las zonas de desbordes. Además se han realizado aforos con Molinete en la zona de embocadura, en Misión La Paz y Villamontes. Se realizaron también aforos con flotadores en Misión La Paz y Villamontes, además de filmaciones para obtener velocidades superficiales por seguimiento de partículas.

### *II - 1. Primera Campaña*

Se presenta a continuación el itinerario y fotografías de los puntos más relevantes producto de la campaña de reconocimiento del Río Pilcomayo durante el mes de septiembre del año 2013. La misma se realizó con medios de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y estuvo compuesta por la ingeniera Cristanchi y el señor Mongelos por parte de la DE-CTN, el ingeniero Baldissone por el CIRSA-LH-CETA y el autor.

#### *II - 1. 1. Itinerario*

Día 1, Domingo 22: Partida desde Córdoba a Formosa.

Día 2, Lunes 23: Arribo a Formosa pasado el mediodía. Recepción a cargo del Dr. Luis Gambino en las oficinas de DE-CTN. Reunión con el Ing. Claudio Laboranti y la ingeniera Alejandra Cristanchi. Temas tratados: definición final del itinerario, puntos críticos.

Día 3, Martes 24: Por la mañana intercambio de información. Reunión con la ingeniera Alejandra Cristanchi y el ingeniero Diego Ortiz. Pasado el mediodía salida hacia el Bañado de la Estrella. Noche en Ingeniero Juárez, Formosa.

Día 4, Miércoles 25: Salida a la zona de embocadura, llegada al mediodía. Navegación por el canal Las Torres. aforo en la sección del Río Pilcomayo aguas arriba de dicho canal. Navegación por el río hacia aguas arriba, navegación por el canal paraguayo. Visita a la sección de puesto Pinto y puesto Jerez. Regreso a ingeniero Juárez donde se pasó la noche.

Día 5, Jueves 26: Salida hacia el Pilcomayo pasando por la localidad de Tartagal (Salta), llegando a Hito 1 cerca del mediodía. Iniciamos la recorrida hacia aguas abajo por la margen derecha identificando D'Orbigny (Bolivia), La puntana (Salta), Monte Carmelo, La Curvita, La Garrapata, La Monona, Santa María, Delfín y Marca Borrada. Noche en Misión La paz.

Día 6, Viernes 27: Recorrida por Misión La Paz, vieja estación de aforos de EVARSA y sección actual, anillo de protección en Santa Victoria y La Gracia. No se pudo acceder a las Vertientes por el estado del camino. Salimos de Argentina y cruzamos a Pozo Hondo Paraguay, por margen izquierda del río nos dirigimos hacia aguas arriba hasta Esmeralda (Bolivia) y de ahí continuamos hasta Ibibobo, donde no pudimos tener acceso al río ya que éste se encuentra escurriendo por la margen derecha. Llegamos a Villamontes para pasar la noche.



Día 7, Sábado 28: Recorrida por Villamontes, Visitamos la sección de aforo, el Puente Ustarez y el puente carretero. Al mediodía finalizamos el recorrido, regreso a Argentina.

### *II - 1. 2. Zona embocadura, Puesto Pintos y Puesto Jerez*

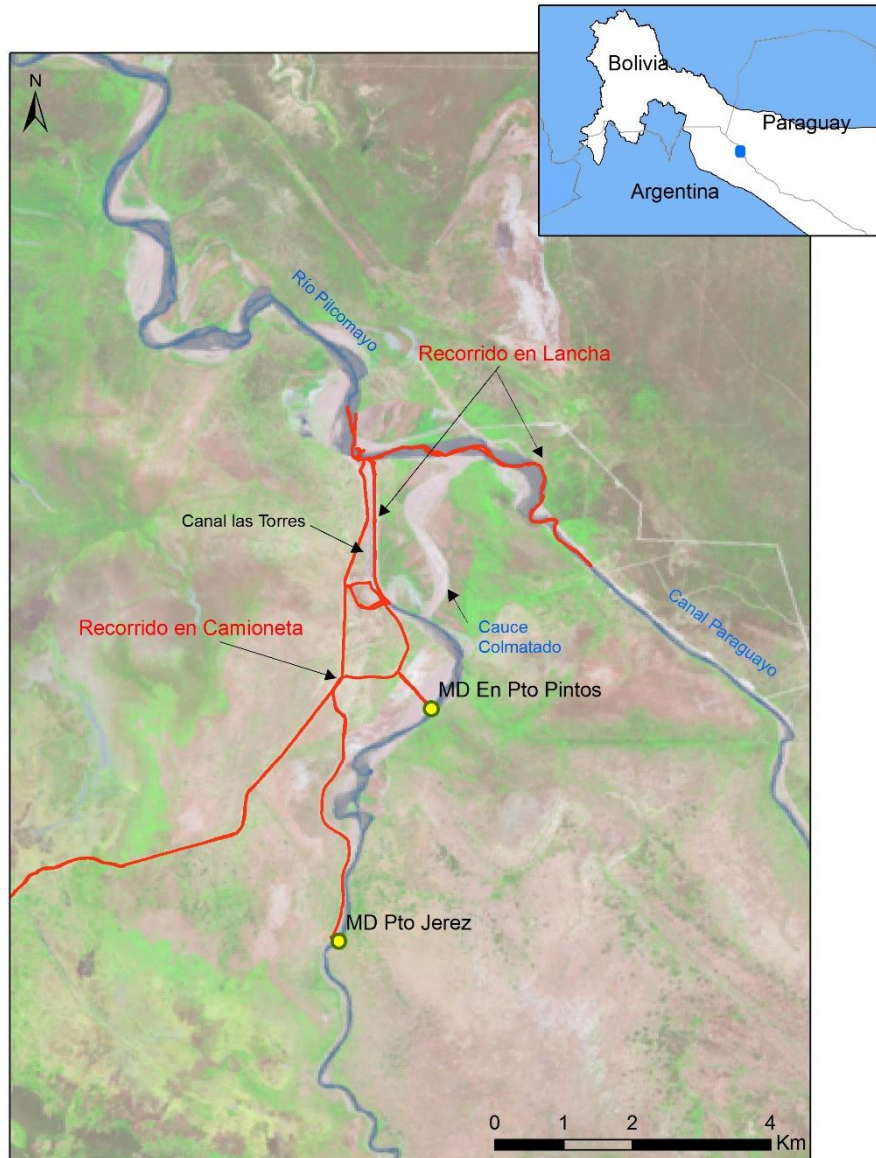
Llegamos a la zona de Embocadura cerca del mediodía. Recorrimos las inmediaciones del campamento que vialidad de la provincia de Formosa tiene en las cercanías, el cual sirve de base de operaciones para las intervenciones en el cauce. Accedimos al río en la unión del canal Las Torres (CLT) con el cauce del Río Pilcomayo del lado sur. Recorrimos el canal en lancha y se observó la erosión de las margenes, se pudo apreciar, en comparación con relevamientos anteriores, que las barrancas del canal son prácticamente verticales en lugar del talud 2:1 con el cual se excavó. Al llegar a la embocadura del canal el tirante era del río era muy bajo lo que obligó a sortear unos bancos de arena por vadeo y remolcar la embarcación unos metros hasta aguas más profundas sobre el río.

Luego comenzamos las tareas de aforo en la sección inmediatamente aguas arriba de la embocadura al canal Las Torres (Figura 190), sea aforó con micromolinet OTT propiedad de la Dirección Ejecutiva de la CTN. El caudal medido fue de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Luego se recorrió hacia aguas arriba (unos 1500 m) por el cauce del Río Pilcomayo donde se reconocieron diferentes signos de erosión de margenes sobre el lado paraguayo y signos de sedimentación sobre margen derecha con diversas islas dentro del cauce principal, muchas de ellas con presencia de alisos previamente arrastrados por la corriente.

Posteriormente se emprendió hacia aguas abajo la recorrida hasta ingresar al canal paraguayo, prácticamente no se reconoce una transición desde el río hacia dicho canal. Por otro lado se pudo apreciar el escalón existente desde el río hacia el sector de río parcialmente colmatado. En los casi 4 km recorridos del canal paraguayo el tirante no superaba los 80 cm en prácticamente ningún sector y varias fueron las veces en las que se tuvo que vadear un tramo de río para poder acceder a un sector con una profundidad compatible con la navegación de la embarcación.

Se tenía previsto luego de esta recorrida efectuar otro aforo en la sección de Puesto Pintos (Río Pilcomayo aguas abajo de la Embocadura) para completar la estimación de la distribución de caudales, pero dados los inconvenientes durante la navegación por el canal paraguayo se tuvo que cancelar dicho aforo ya que se arribó a dicha sección casi en horas nocturnas, no siendo factibles las tareas dentro del río. También se visitó Puesto Jeréz, observese la diferencia en el material de la llanura de inundación en las Figura 193 y Figura 194.



**Figura 187.-** Recorrido por zona de la Embocadura, parte en camioneta, parte en lancha (Img Landsat 08/10/2013).



**Figura 188.-** Canal Las Torres y taponamiento del cauce seco argentino, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 189.-** Río Pilcomayo visto hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 190.-** Sección de aforo, aguas arriba de la Embocadura septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 191.-** Sección de aforo, aguas arriba de Embocadura Sept 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)





**Figura 192.-** Puesto Pintos septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 193.-** Puesto Pintos septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)

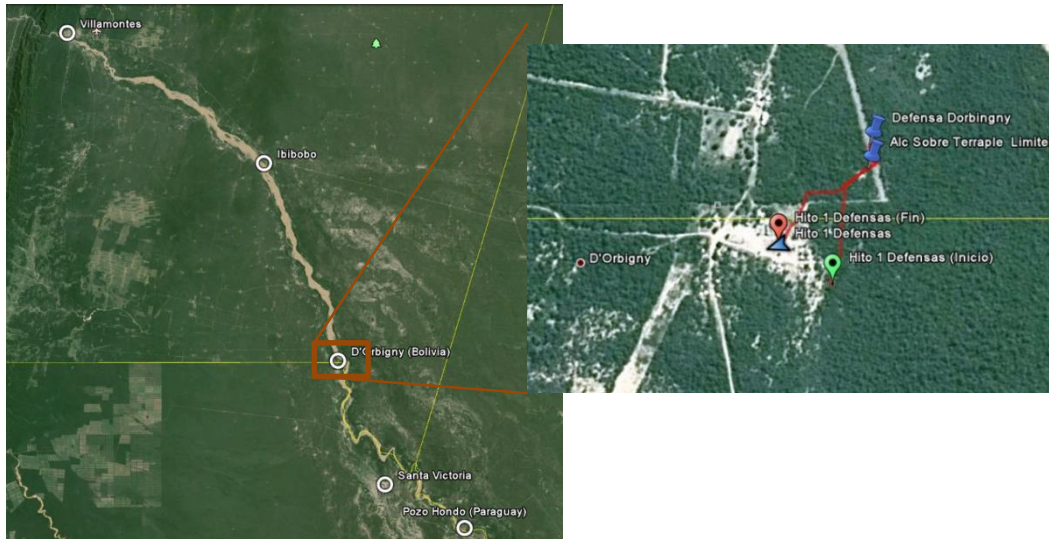


**Figura 194.-** Puesto Jeréz, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)

### *II - 1. 3. Zonas de Desbordes Hito 1, D'Orbigny y La Puntana*

Hito 1, Argentina se encuentra justo enfrentada a D'Orbigny, Bolivia. Ambas localidades se encuentran sobre la margen derecha del Río Pilcomayo. En esta zona se producen desbordes todos los años. La zona habitada ha sido protegida por defensas, que consisten en terraplenes de cerca de un metro de altura. Se observó que del lado húmedo del terraplén el nivel de suelo se va elevando consecuencia de la deposición de sedimentos cuando la crecida se retira. Como consecuencia la zona poblada va quedando dentro de un pozo en relación con los alrededores, situación que se debe tener en cuenta. El agua en la zona suele permanecer 15 días.

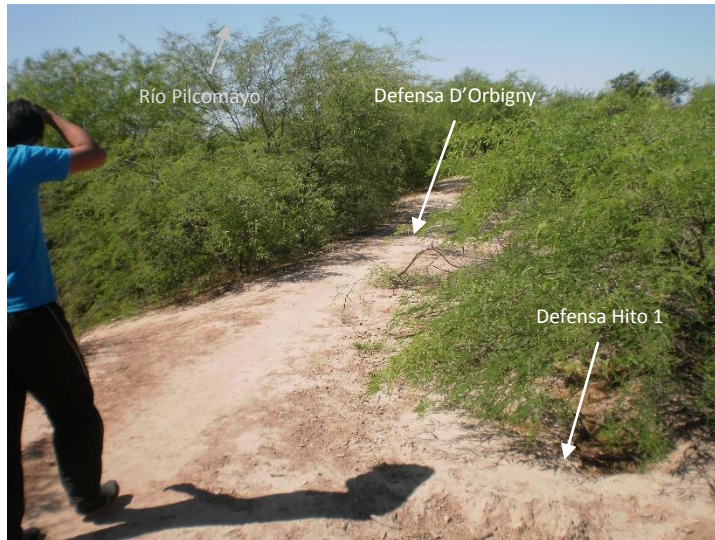
La Puntana es una localidad Argentina que se encuentra unos 5 km aguas abajo de Hito 1



**Figura 195.-** Defensas en D'Orbigny (Bolivia) y en Hito 1 (Argentina).



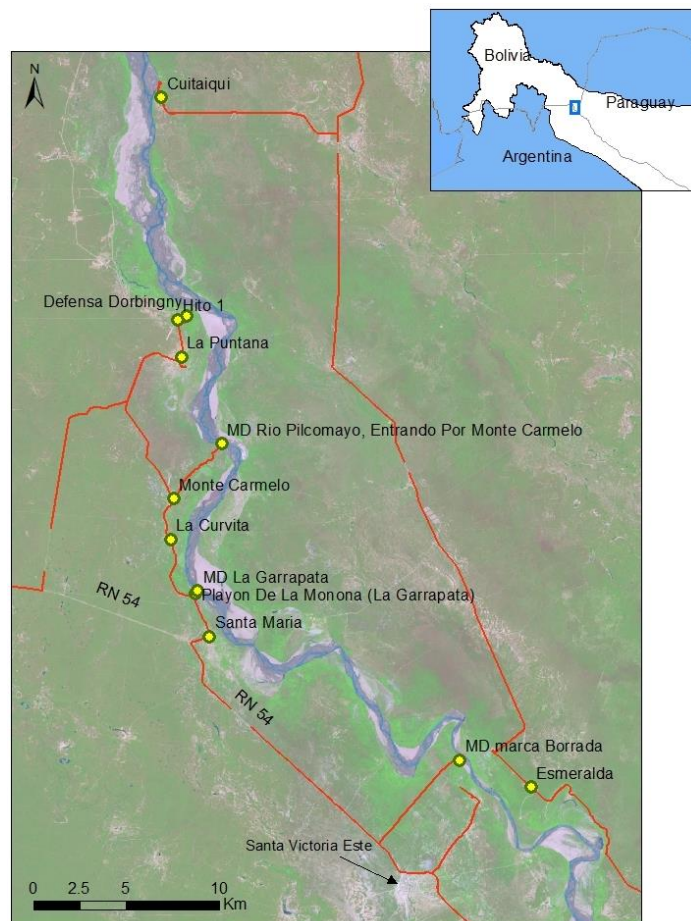
**Figura 196.-** Defensa de D'Orbigny (Bolivia) septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 197.-** Encuentro de Defensas de Hito 1 y D'Orbigny. La de Hito 1 es 50 cm más baja, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)

**II - 1. 4. Monte Carmelo, La Curvita, La Garrapata, La Monona, Santa María, Bajada Delfín y Marca Borrada**

Estas zonas de desbordes, en la margen derecha, se caracterizan por poseer barrancas que van siendo comidas por el río y nunca se recuperan. Hay una gran preocupación por la pérdida de suelo además de la pérdida de tierra fértil consecuencia de los enlames.



**Figura 198.-** Recorrido desde Hito 1 (Img Landsat 08/10/2013).



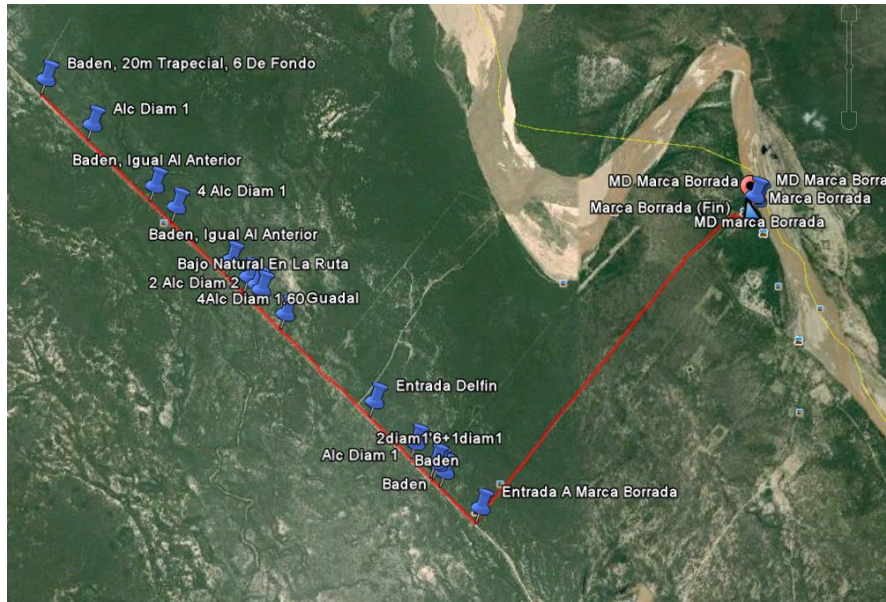


**Figura 199.-** Monte Carmelo. Vista aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissoni, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 200.-** Monte Carmelo. Vista aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissoni, Cristanchi y Testa 2013)





**Figura 201.-** Identificación alcantarillas y badenes, entrada a Bajada Delfin y Marca Borrada, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).



**Figura 202.-** Camino a La Garrapata, zona de desborde, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).



**Figura 203.-** La Garrapata, vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013).



**Figura 204.-** La Garrapata, vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013).

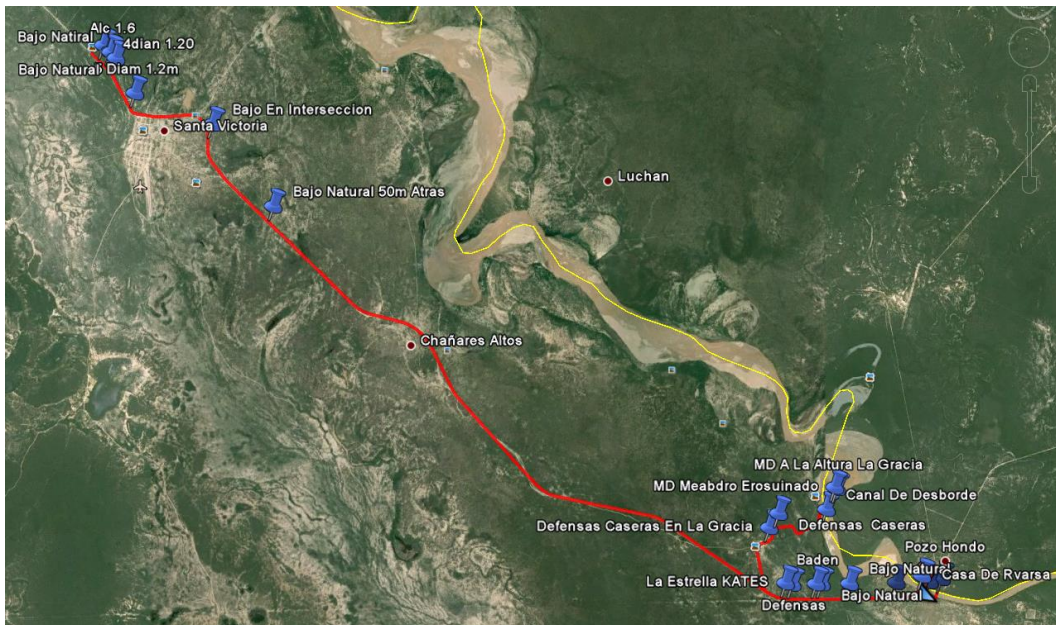


**Figura 205.-** Barranca en Marca Borrada, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013).



## II - 1. 5. Santa Victoria, La Gracia y Misión La Paz

La Gracia se localiza 4 kilómetros aguas arriba de Misión La Paz y es uno de los sitios dónde tiene origen uno de los desbordes principales de la zona. Se observó una gran presencia de alisos que evidencian la capacidad de aporte de material vegetal en crecida y el dinamismo en la movilidad de las márgenes. Santa Victoria Este es una localidad de importancia en la región por su tamaño, ésta queda todos los años rodeada de agua consecuencia de los desbordes del Pilcomayo y sus defensas en forma de anillo. En Misión La Paz se visitó la antigua estación de aforo la cual se encontraba a unos 120 m aguas arriba del puente internacional. Se recorrió las protecciones de gaviones sobre la margen derecha y se constató su buen estado de conservación. Se visitó la actual sección de aforo, ubicada a unos 300 m aguas abajo del puente.



**Figura 206.-** Recorrido desde Misión La Paz hacia Santa Victoria y La Gracia



**Figura 207.-** Pilcomayo sobre el puente MLP - Pozo Hondo, vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 208.-** Pilcomayo sobre el puente MLP - Pozo Hondo, vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 209.-** Defensa de Santa Victoria, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 210.-** Defensa de La Gracia, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa 2013).





**Figura 211.-** Alisos (Palos Bobo) en La Gracia, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013).



**Figura 212.-** Sección en La Gracia, Vista hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013)



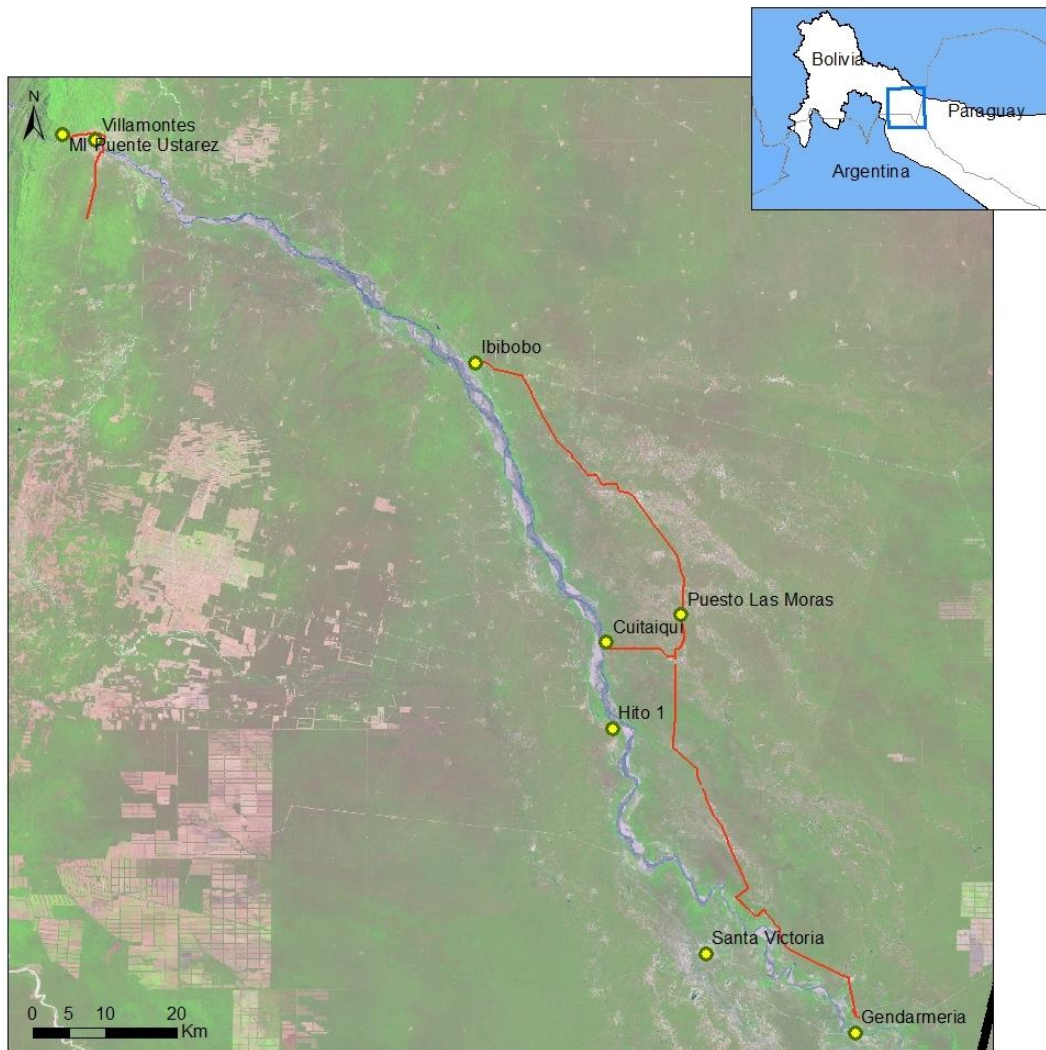
**Figura 213.-** Sección en La Gracia, Vista hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissonne, Cristanchi y Testa 2013)



**Figura 214.-** Sección en La Gracia, Vista hacia aguas arriba, continuación de la anterior, septiembre 2013  
(Baldissoni, Cristanchi y Testa 2013)

## II - 1. 6. Ibibobo y Villamontes

Se recorrió por Margen Izquierda territorio paraguayo y boliviano desde Pozo Hondo, al frente de Misión La Paz, hacia el norte hasta Villamontes pasando por Ibibobo. En Cuitaiqui, pudimos llegar a la margen izquierda y observar la curva que da el río en esta parte y el estado de las márgenes. Como se puede observar en la Figura 215, en Ibibobo las aguas estaban dentro del cauce por lado argentino, había cerca de 3 kilómetros de playa que impedían llegar al agua en vehículo.



**Figura 215.-** Recorrido desde Misión La Paz – Pozo hacia Villamontes por Margen Izquierda (Img Landsat 08/10/2013).



Se identificaron zonas bajas y obras de arte en el camino desde Cuitaiqui a Ibibobo. Se observan en las imágenes satelitales zonas sin vegetación que son zonas de escurrimiento de agua (Figura 216).

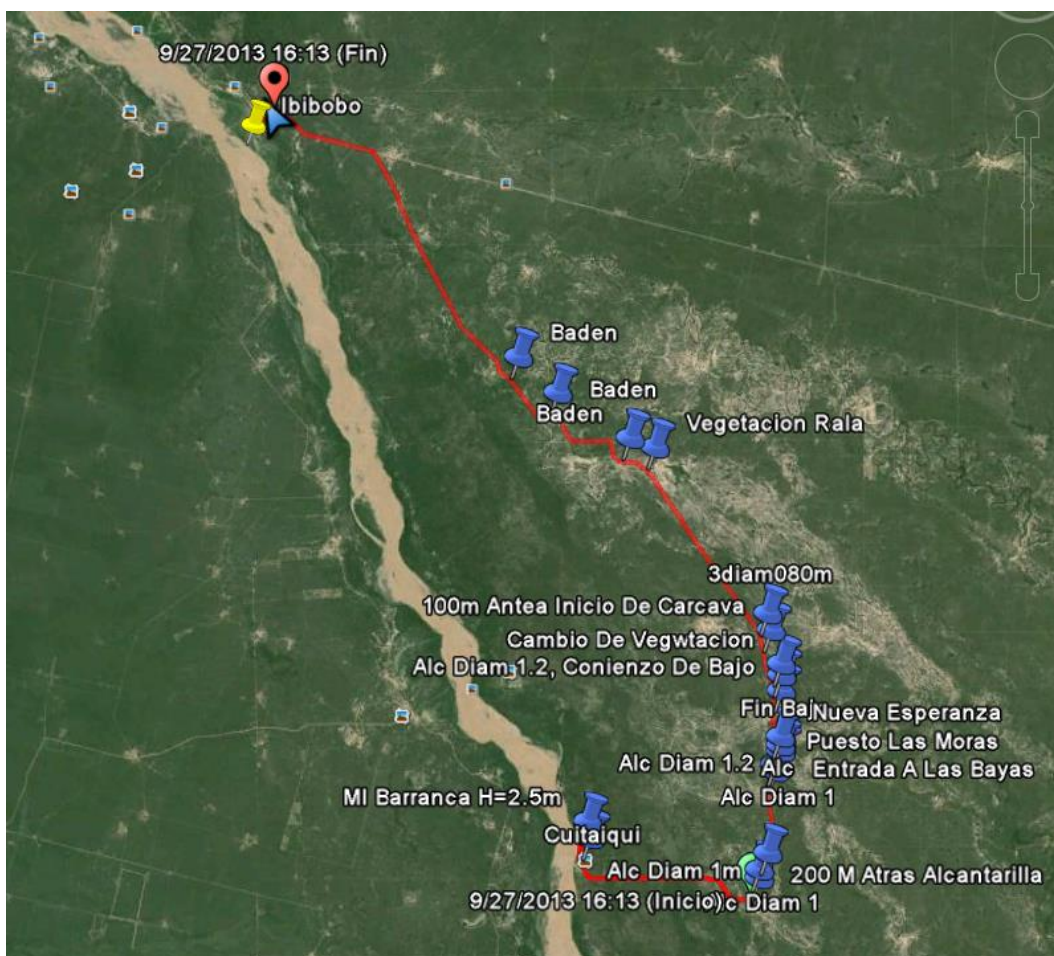


Figura 216.- Identificación de Zonas Bajas y obras de arte en el camino de Cuitaiqui a Ibibobo.



Figura 217.- Cuitaiqui, hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 218.-** Cuitaiqui, cauce entrelazado, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).



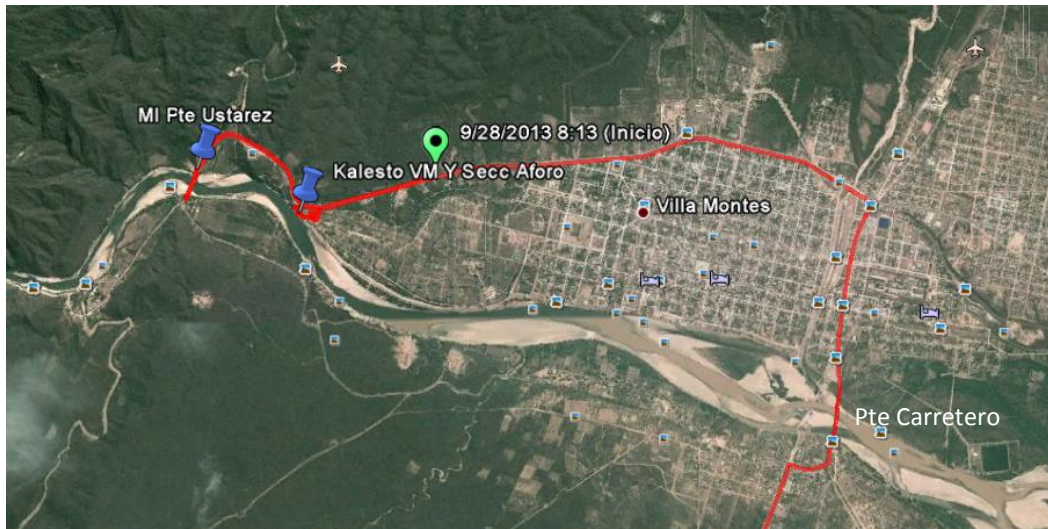
**Figura 219.-** Cuitaiqui, hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013).



**Figura 220.-** Cuitaiqui, segundo nivel de barrancas, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



En Villamontes se visitaron la estación de aforo y los puentes Ustárez y Carretero.



**Figura 221.-** Recorrido en Villamontes



**Figura 222.-** Villamontes, Hacia aguas abajo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



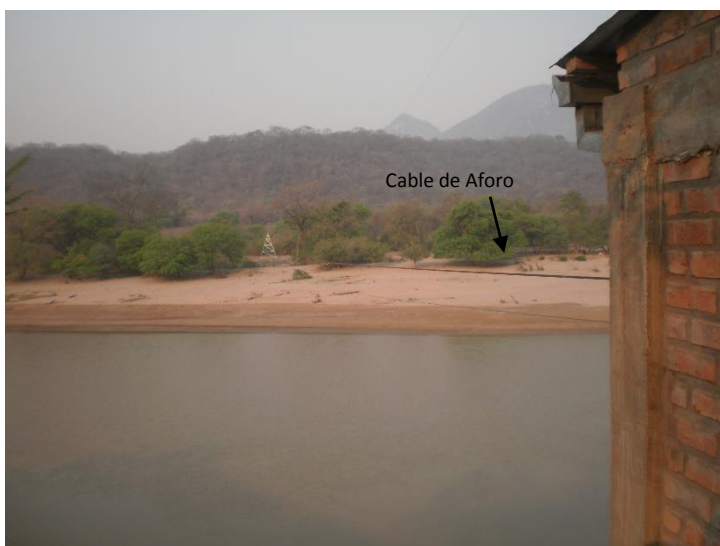
**Figura 223.-** Villamontes. Sección de aforos, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 224.-** Villamontes, medidor automático de niveles, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 225.-** Villamontes hacia aguas arriba, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 226.-** Estación de aforo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 227.-** Molinete de aforo, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 228.-** Aguas Arriba del puente Ustarez, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 229.-** Aguas Abajo del Puente Ustarez, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)





**Figura 230.-** Aguas Arriba del Puente Carretero, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)



**Figura 231.-** Aguas Abajo del Puente Carretero, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi y Testa Tacchino 2013)

## II - 2. Segunda Campaña

Esta campaña de aforos y reconocimiento del Río Pilcomayo se realizó entre el 13 y el 24 de enero de 2014. La misma se formalizó con medios de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y estuvo compuesta por los Ingenieros Claudio Laboranti y Diego Ortiz, la ingeniera Alejandra Cristanchi y el señor Walter Mongelos por parte de la DE-CTN y el autor.

Los Ing. Laboranti y Ortiz aforaron en Villamontes, mientras los Ing. Cristanchi y el autor en Misión La Paz. El objetivo de esta campaña fue tratar de registrar un pico de crecida y probar diferentes técnicas de aforo: molinete, flotadores y seguimiento de partículas por video. Además se visitó la Misión Las Vertientes, zona de desbordes que no habíamos podido recorrer en la campaña anterior por encontrarse inaccesible para vehículos.

### II - 2. 1. Zona de Desbordes – Las Vertientes

Pudimos visitar Las vertientes, identificar sus defensas y visitar dos márgenes del río, en las que habitualmente hay desbordes.



**Figura 232.-** Recorrido desde Misión La Paz hacia Las Vertientes (Img Landsat 08/10/2013).



En la Figura 233 se observa el anillo de defensa que se pudo recorrer con la camioneta así como también bajos naturales, cañadas y zonas donde pasa el agua cerca de las márgenes.



**Figura 233.-** Identificación de Defensas, Bajos Naturales, y Zonas de Escurrimiento (Img Landsat 08/10/2013)

En las siguientes figuras se presentan fotos que ayudan a tener una buena comprensión de la zona visitada.



**Figura 234.-** Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 235.-** Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 236.-** Las vertientes, hacia aguas arriba, en punto sur, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 237.-** Las vertientes, hacia aguas abajo, en punto sur, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).





3

**Figura 238.-** Suelo Agrietado y Alisos, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 239.-** Cauce del Río con Resaca, vista hacia aguas abajo en punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 240.-** Cauce del Río con Resaca, vista hacia aguas abajo en punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).





**Figura 241.-** Zona de Desbordes, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 242.-** Zona de paso de agua en desbordes, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 243.-** Cauce del Río, vista hacia aguas arriba, punto norte, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

## II - 2. Aforo con molinete desde vagoneta en Misión La Paz

Durante las campañas se aforó con molinete desde vagoneta una vez por día a la mañana y, si el nivel de agua variaba en 20 cm, se aforaba una vez más a la tarde (Figura 244).

Las mayores profundidades se registraron sobre margen derecha (Argentina).

El criterio para tomar velocidades en la sección fue el siguiente; para profundidades (h) menores a 1 m: superficial, (0,6 h) y (0,8 h); para profundidades entre 1 m y 2 m: superficial, (0,2 h), (0,6 h) y (0,8 h); y para profundidades mayores a 2 m: superficial, (0,2 h), (0,4 h), (0,6 h), (0,8 h) y fondo.

Con los valores obtenidos se graficaron las variaciones de fondo de la sección en cada aforo, como así también los perfiles de velocidades.

Utilizando las escalas limnimétricas de la sección (Figura 245) y otras 500 m aguas arriba se pudo obtener la pendiente de la superficie de agua para caudales entre 740 m<sup>3</sup>/s y 1640 m<sup>3</sup>/s. Los tramos de escala eran insuficientes en la sección de aforo, por lo que solo se pudo registrar pendiente para lecturas de escala mayores a los 5 m.

Se observó que todavía se utilizan técnicas muy rudimentarias, que demanda mucho esfuerzo físico, para mover la vagoneta por el cable, solo una polea con una palanca. Se ha sugerido se implemente un sistema hidráulico o se evalúen otras alternativas. También se sugirió cambiar algunos de los requisitos, muy exigentes, al momento de rellenar las planillas de aforo que traía como consecuencia que los operarios, para cumplir con estos, a veces “dibujasen algunos números”, con las graves consecuencias de falsear datos.



**Figura 244.-** Aforo con Molinete sobre vagoneta. Sección MLP, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 245.-** Escalas en sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

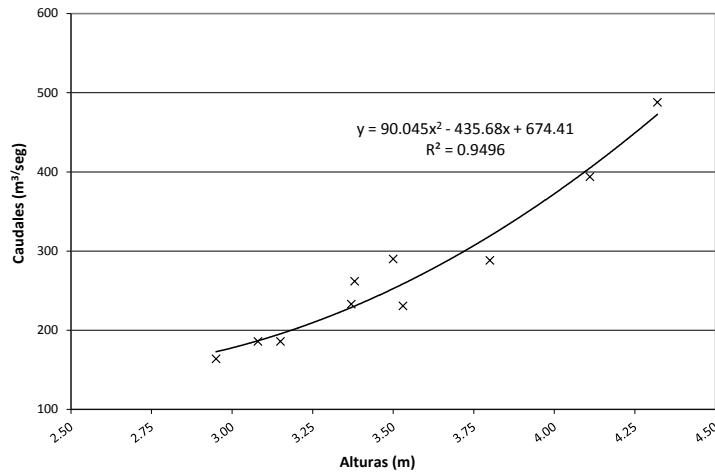
En la Tabla 38 se presenta un resumen de los aforos con molinete desde vagoneta realizados durante la campaña, entre el 16 y 24 de enero. Además se trazó la curva H-Q que se presenta en la Figura 246, puede observarse que hay un buen ajuste para lecturas de escala menores a 5 m. Para lecturas mayores el ajuste no es bueno y no se ha podido definir todavía la tendencia de la curva H-Q.

**Tabla 38.-** Aforos con molinete desde vagoneta, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

Fecha	Lectura de Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /seg)	Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad media sección (m/seg)
16-/01/14, mañana	3,15	186	151,2	1,23
16/01/14, tarde)	2,95	164	133,86	1,23
17/01/2014	3,08	186	145,95	1,27
18/01/2014	3,38	271	177,39	1,53
19/01/2014	3,50	290	188,31	1,54
20/01/2014	3,37	233	158,44	1,47
21/01/2014	4,32	488	255,31	1,91
22/01/2014	4,11	394	231,43	1,70
23/01/2014	3,80	288	192,01	1,50
24/01/2014	3,53	231	163,23	1,41

Además se trazó la curva H-Q con los valores de los aforos realizados entre el 16 y 24 de enero de 2014.





**Figura 246.-** Curva H-Q a partir de aforos con molinete desde vagoneta del 16 al 24 de enero de 2014.

### II - 2. 3. Aforo con Flotadores en Misión La Paz.

Se utilizaron botellas plásticas pintadas con aerosol y rellenas hasta un 75 % con agua como flotadores. En una primera etapa se arrojaban desde el puente y se contaba el tiempo hasta que llegasen a la sección de aforo, 320 m aguas abajo. Se detectó que la distancia era muy larga y por las características de circulación todos los flotadores tendían a pasar por un mismo tramo de la sección de aguas abajo, es decir, las líneas de corriente se juntaban en esta sección. Posteriormente se arrojaron los flotadores desde la vagoneta en la sección de aforo y se recorrieron 50 m aguas abajo con mejores resultados. Los aforos con flotadores desde vagoneta se realizaron en las progresivas 50 (Margen Izquierda), 110 (Centro) y 155 (Margen Derecha), tirando en cada una de ellas 3 flotadores.

Es importante resaltar que en Misión La Paz no se puede aforar con molinete desde vagoneta cuando la lectura de escala supera los 4,5 m porque se vuelve inseguro para los operarios. Cuando se supera esta lectura es necesario medir con otras técnicas y aforo con flotadores es una de estas.



**Figura 247.-** Llenado de botellas para aforo con flotadores, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 248.-** Preparación de botellas para el aforo con flotadores, enero 2014 (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Tabla 39.-** Resultados de aforos con flotadores desde el puente y desde vagoneta, enero 2014 y comparación con los resultados de molinete (**Cristanchi y Testa Tacchino 2014**).

Fecha	Aforo con molinete				Aforo con flotadores			Relación entre caudales
	Lectura de escala	Caudal	Área	Velocidad Media de la sección	Caudal	Velocidad Media de la sección	Sección de aforo	
	m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>2</sup>	m/s	m <sup>3</sup> /s	m/s		
16/01/14, mañana	3,15	186	151,2	1,23				
16/01/14, tarde	2,95	164	133,86	1,23	102	0,77	Desde puente	161%
17/01/2014	3,08	186	145,95	1,27	100	0,69		186%
18/01/2014	3,38	271	177,39	1,53	129	0,73		210%
19/01/2014	3,50	290	188,31	1,54				
20/01/2014	3,37	233	158,44	1,47				
21/01/2014	4,32	488	255,31	1,91	547	2,14	Desde vagoneta	89%
22/01/2014	4,11	394	231,43	1,70	434	1,87		91%
23/01/2014	3,80	288	192,01	1,5				
24/01/2014	3,53	231	163,23	1,41				

Se observa en la Tabla 39 que los aforos con flotadores realizados desde vagoneta presentan mejores resultados que los aforos con flotadores desde el puente. Durante los aforos desde el puente se observó que las pilas generan remolinos que dificultan un correcto desplazamiento de los flotadores; el ancho de la sección no se mantenía estable, en cercanías al Puente se encontraba reducida por bancos de sedimentos; y los flotadores finalizaban su recorrido sobre margen derecha, donde se había concluido por los aforos con molinete que habían mayores profundidades y velocidades. Esto último dificultaba tener valores de velocidades desde el centro a margen izquierda.

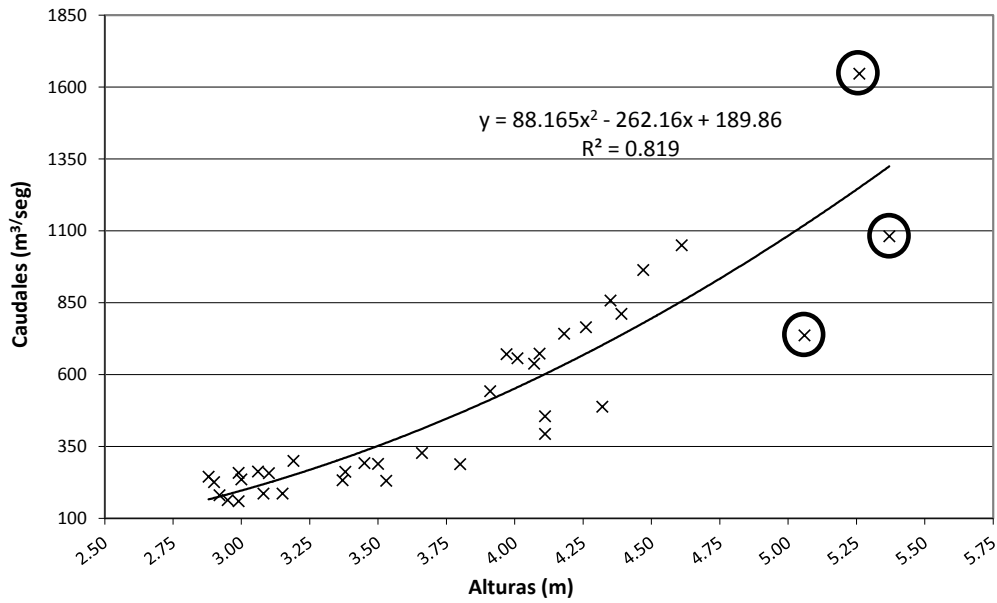
También se realizaron tres aforos con flotadores desde vagoneta para un nivel superior a 5 m, los resultados se presentan en la Tabla 40. Cuando se afora con flotadores se obtiene la sección arrojando un peso muerto a lo largo de varias verticales desde la vagoneta y se supone que esta permanece invariable hasta la sección de control de arribo del flotador.

**Tabla 40.-** Resultados de aforos con flotadores desde vagoneta para lectura de escala mayor a 5 m, enero 2014 (**Cristanchi y Testa Tacchino 2014**).

Fecha	Altura	Caudal por Flotador	Caudal Medio	Área	Velocidad media sección
	m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>2</sup>	m/s
27/01/2014	5,07	867,28	737,19	372,55	1,98
30/01/2014	5,37	1272,25	1081,41	483,2	2,24
5/02/2014	5,26	1937,66	1647,01	750,03	2,2

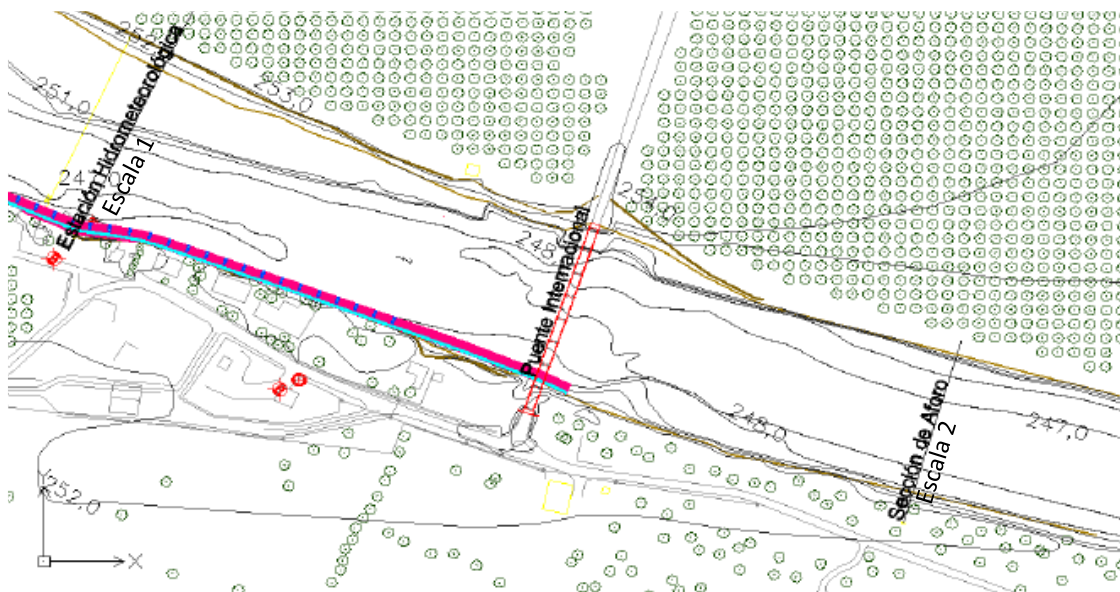
El caudal medio se obtiene afectando el caudal obtenido por los flotadores del coeficiente de flotador, que en este caso se toma 0,85.

También se trazó una curva H-Q con los valores de los aforos de enero a marzo del 2014 que se presentan en la Figura 249. Los valores en círculo negro, representan los valores aforados por EVARSA con flotadores desde vagoneta para alturas superiores a los 5 metros. Como se observa los mismos no tienen buen ajuste a la curva, por lo cual se recomienda continuar en lo posible aforando con alturas superiores a los 5 metros.



**Figura 249.-** Curva H-Q a partir de aforos de enero a marzo 2014. Con círculo se identifican los aforos con flotadores desde vagoneta.

Durante los meses de enero, febrero y marzo EVARSA realizó la toma de niveles de las escalas (2 veces al día) instaladas por la CTN en la sección de aforo. Se poseen escalas en la sección de aforo y en la estación hidrometeorológica de EVARSA. Se observó que la escala de la sección de aforo solo se mojaba cuando la lectura en la estación hidrometeorológica era superior a los 5 m.



**Figura 250.-** Croquis Ubicación de escalas de EVARSA de CTN, Distancia entre escalas: 825 m.

**Tabla 41.-** Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

Fecha	Lectura de Escala (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Coeficiente "n" de Manning	Pendiente de la Superficie de Agua	Velocidad media aforada (m/s)	Velocidad calculada con "n"	V <sub>mediaaforada</sub> /V <sub>calculada</sub> "n" %	Caudal calculado con "n"	Q <sub>aforado</sub> /Q <sub>calculado</sub> "n" %
1/27/2014	5.07	372.55	0.0375	0.00186	1.979	1.98	100%	737.90	100%
1/30/2014	5.37	483.20	0.0400	0.00186	2.238	2.25	99%	1089.59	99%
2/5/2014	5.26	750.03	0.0570	0.00198	2.196	2.21	99%	1659.87	99%

*II - 2. 4. Aforo por Sensor de Radar Kalesto en Misión La Paz*

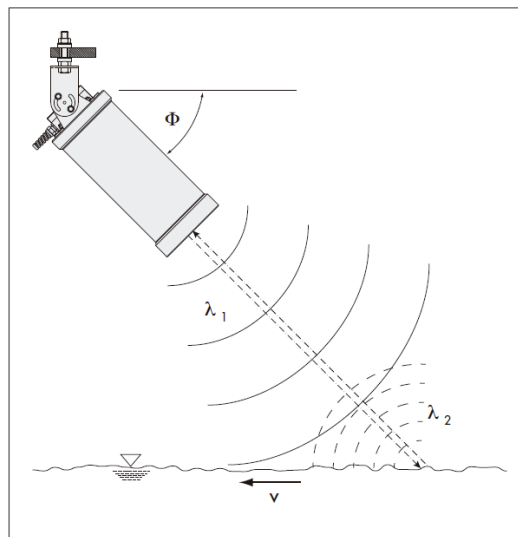
El sensor de radar Kalesto es un sensor de nivel y de velocidad construido por la empresa OTT que no entra en contacto con el agua. Su diseño compacto, así como el principio de medición sin contacto, facilitan el montaje sencillo y rápido, sin necesidad de efectuar obras costosas y de larga duración. El proceso de medición con Kalesto no se ve afectado por inundaciones, lodo, maderas flotantes, algas, etc. El filtro de software integrado para indicar el movimiento de las olas sustituye a los complicados pozos de flotadores. Las señales de medición se transmiten a través del interfaz RS 485 a un recolector de datos que puede estar situado a una distancia de hasta 1.000 m del Kalesto. La alimentación de 12 V (por pilas o energía solar) y el bajo consumo de corriente facilitan el servicio autónomo incluso en las regiones más apartadas.

A partir de enero de 2013 la Dirección Ejecutiva implementó un sistema de alerta de crecida, donde los usuarios reciben cada 2 horas en sus mails las últimas 8 lecturas de escalas (Nivel cada 15 minutos). Estos niveles son medidos con el sensor Kalesto instalado en el Puente Internacional. Se estableció como umbral de alerta en la estación de Misión La Paz un nivel de 5 metros. El Kalesto de MLP se instaló en junio del 2012, pero se liberó el acceso al público en enero del 2013, durante los primeros meses fue necesario verificar los datos obtenidos y ajustar detalles técnicos respecto a la transmisión de datos.



**Figura 251.-** Izq.) Sensor del Kalesto. Der.) Panel solar y Panel de Control y transmisión de datos del Kalesto (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

El principio de funcionamiento del Kalesto se basa en el cambio Doppler de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  como se observa en la Figura 252. El sensor mide la velocidad superficial puntual y si se conoce el área de la sección y la distribución de las velocidades en la misma se puede conocer el caudal con sólo la velocidad superficial y el tirante obtenidos por el sensor.



**Figura 252.-** Esquema de funcionamiento del sensor Kalesto (OTT 2008).

Se toman datos cada 15 minutos, los valores se transmiten vía GPRS a Cochabamba donde está el servidor de BIOSIS (empresa que instaló los sensores) esto es porque no se pudo adquirir el programa llamado addVANTAGE donde se almacena la información que envía el sensor. Después a través de una interfaz llamada BioCloud el dato llega a la Base de Datos Única (BDU) de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (Figura 253).

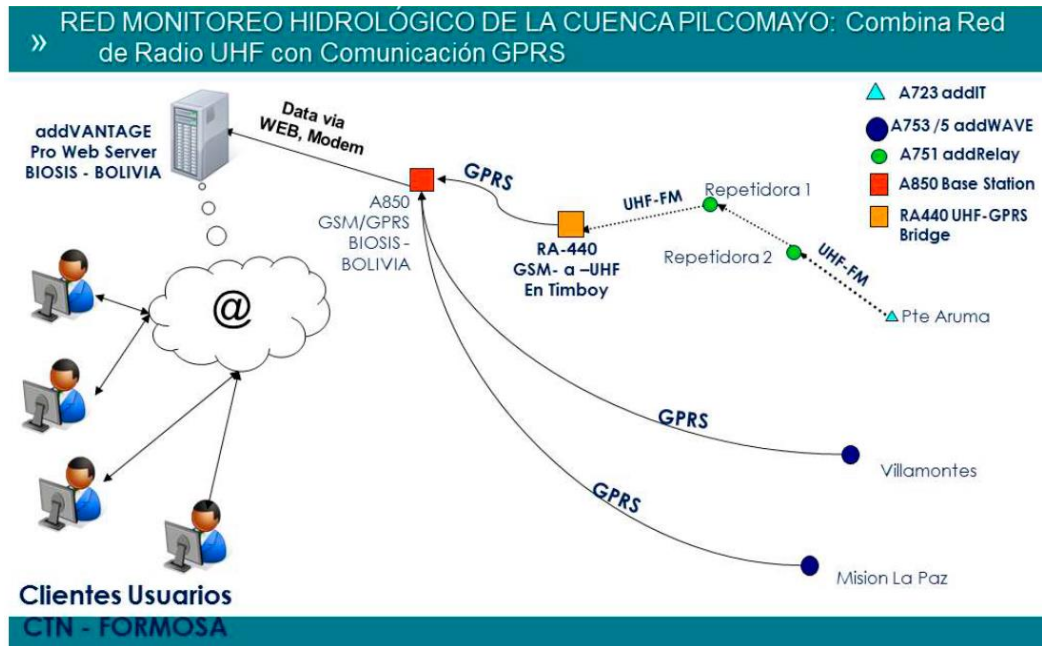


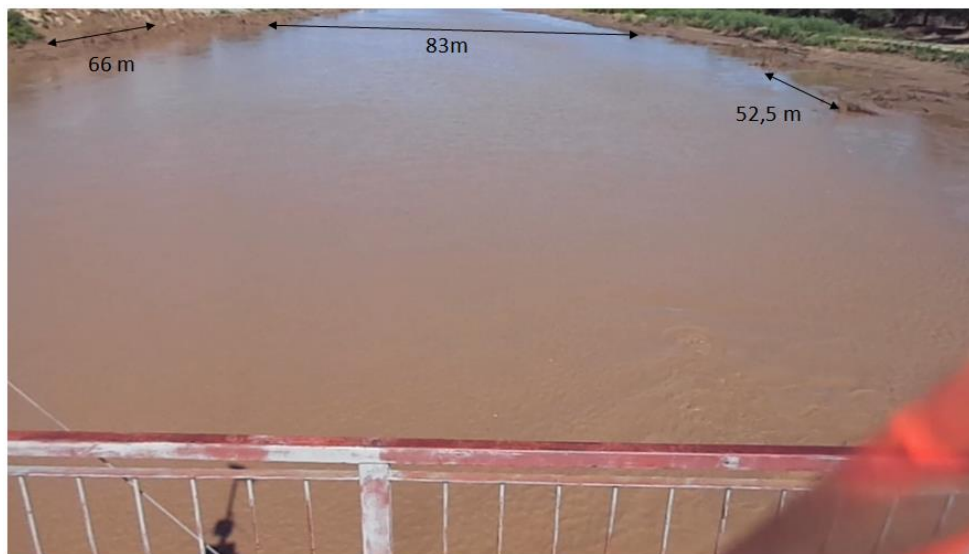
Figura 253.- Esquema del Sistema de Transmisión de Datos (BIOSIS 2014)

### II - 2. 5. Aforo por seguimiento de partículas en Misión La Paz.

La técnica consiste en filmar el cauce del río y utilizar el material flotante que acarrea para determinar las velocidades superficiales en una sección o tramo del río. La importancia de este método reside en que no siempre es posible aforar con molinete, método tradicional, en especial para elevados caudales. En Misión La Paz no se poseen registros de aforos con molinete para lecturas de escala mayores a 4,5 m. Para niveles de agua por encima de esta lectura se mide con flotadores. Además, muchas veces durante la crecida se vuelve inaccesible la zona, tener instalada una cámara que se pueda comandar remotamente permitiría obtener por primera vez velocidades para altos niveles de agua, que actualmente se extrapolan con un bajo nivel confianza.



**Figura 254.-** Sistema de sostén para la cámara digital, ancho del cauce (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



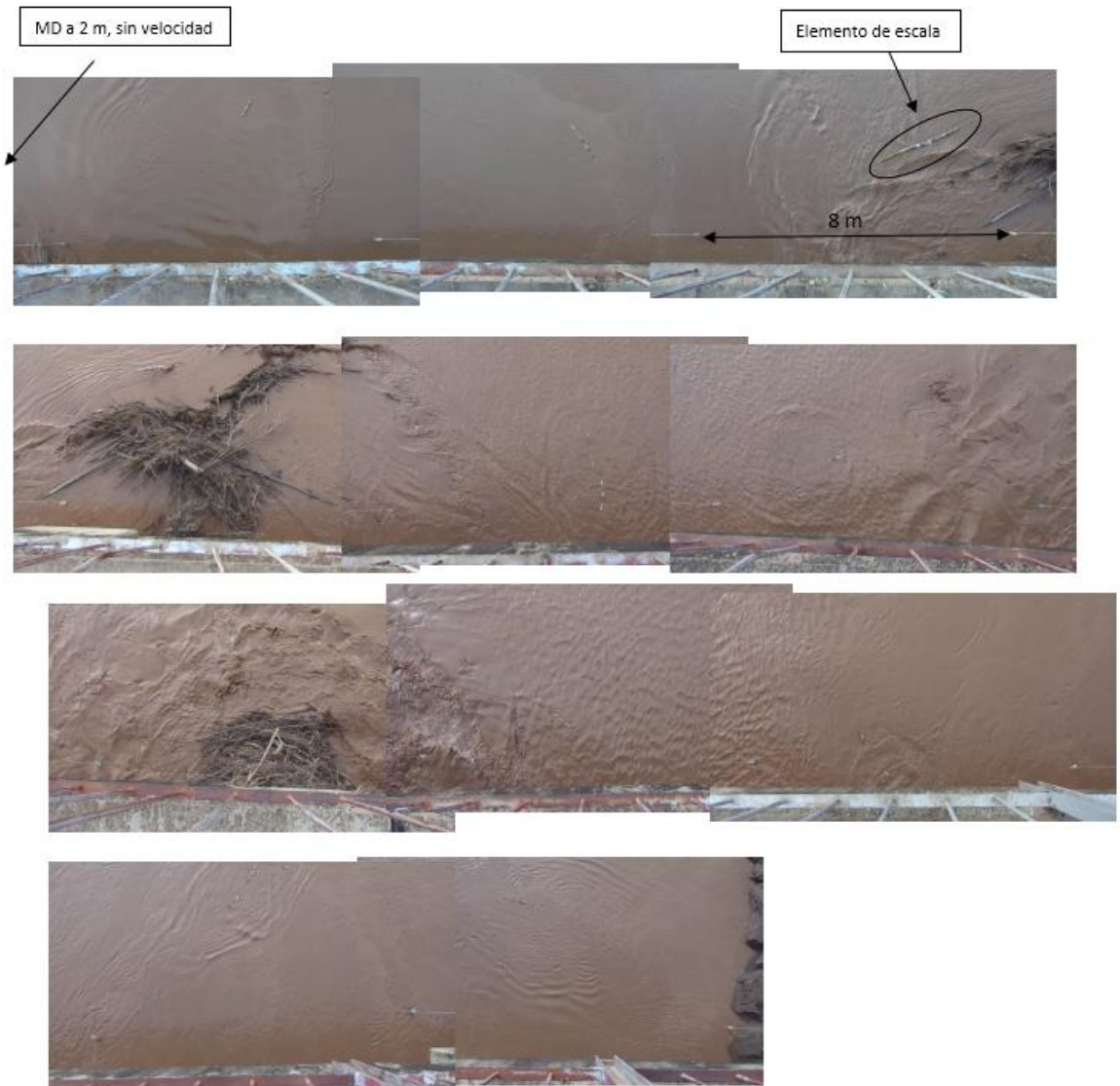
**Figura 255.-** Captura de video con distancias de referencia para rectificación (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

Cuando se filma es necesario tener cuatro puntos de referencia y la distancia entre ellos para utilizarlo como escala espacial en el posproceso y, de ser necesario, poder rectificar la imagen.

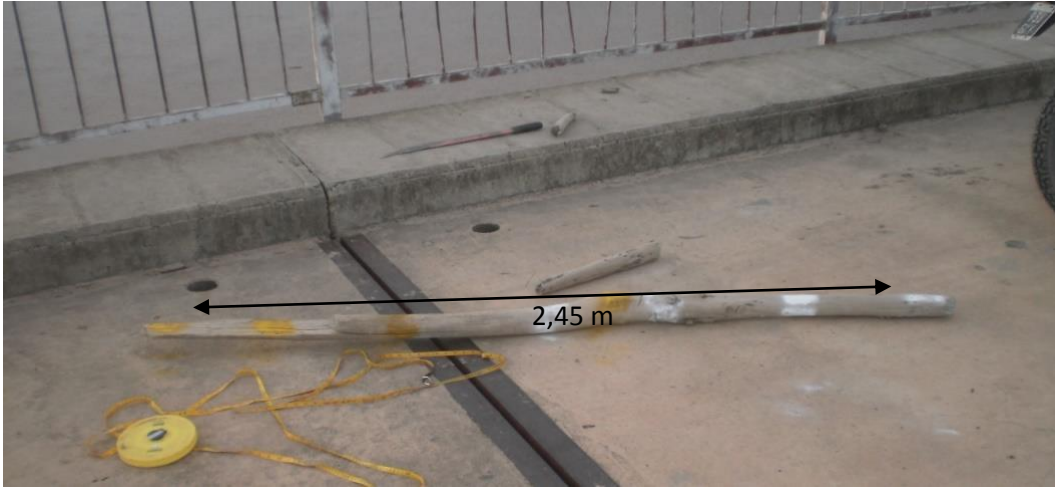
Se utilizaron dos metodologías para la obtención de imágenes, primero se filmó todo el ancho del cauce durante veinte minutos (Figura 255), la segunda consistió en dividir la sección en subsecciones de 8 m y filmar durante dos minutos en cada una de ellas (Figura 256). En el primer caso solo se utilizó el material flotante que arrastraba el río. En el segundo, además de utilizar el material flotante se sembró con troncos de longitud conocida para utilizarlos también como elementos de control de escala, es decir se



conocen la distancia de 8 m medidos sobre la superficie del agua, se utilizaron dos pesos muertos bajados desde el puente, y además la longitud de los troncos que sembramos.



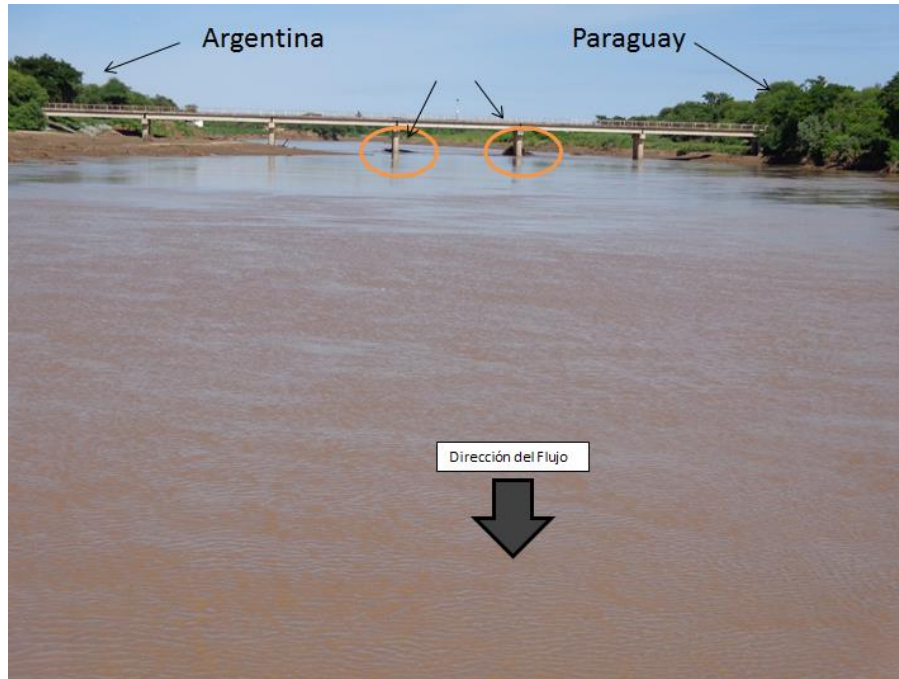
**Figura 256.-** Reconstrucción de la sección a partir de las Capturas de video de las 11 subsecciones del río, ancho total de superficie de agua 90 m. Se observan las ramas depositadas en las pilas centrales (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



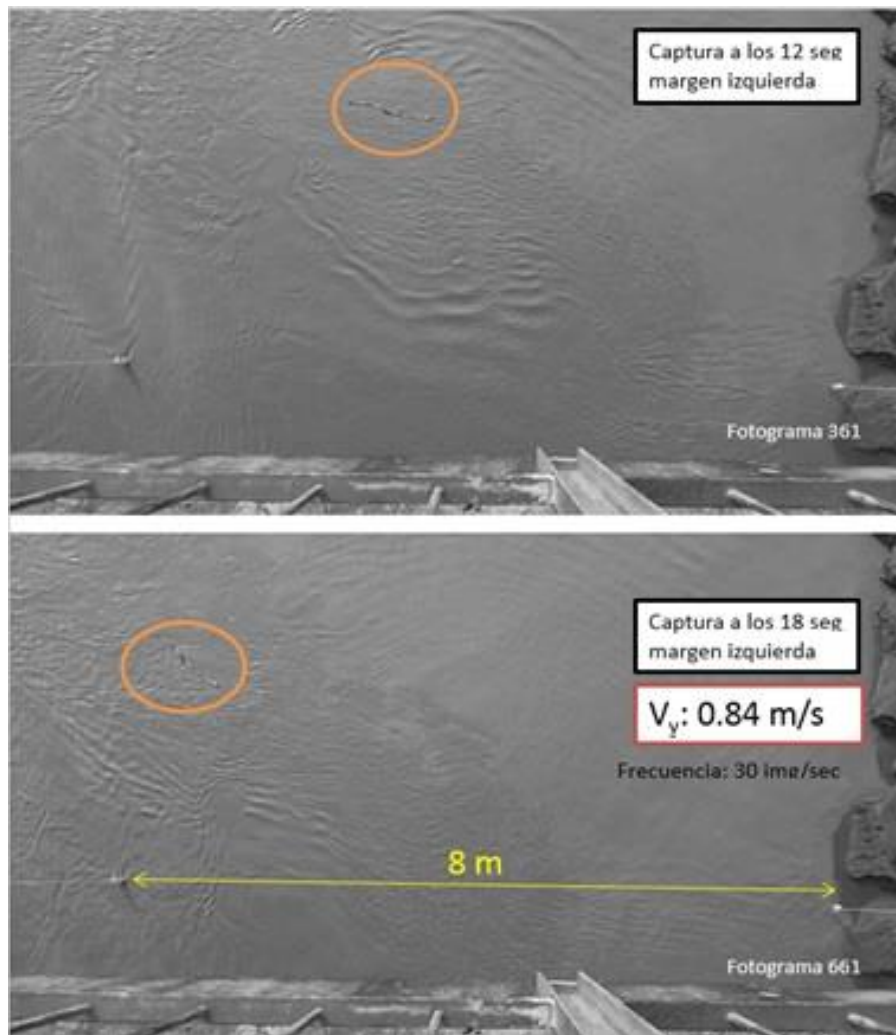
**Figura 257.-** Palo bobo pintado como referencia de escala (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).



**Figura 258.-** Sistema de sostén para la cámara digital perpendicular al flujo (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)

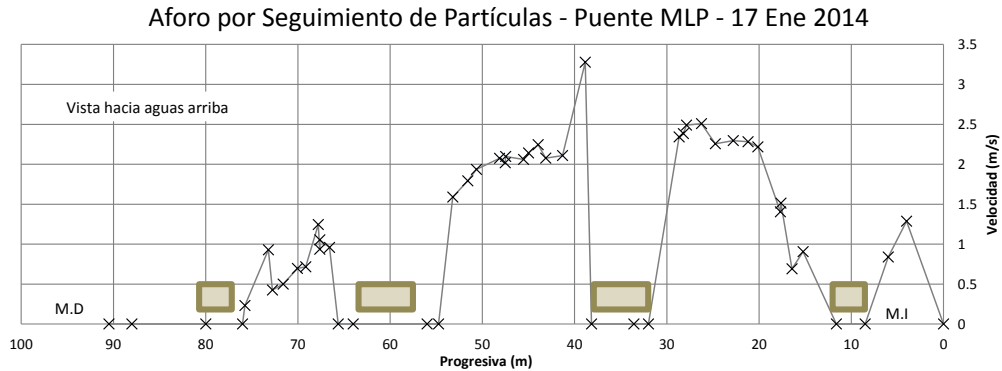


**Figura 259.-** Imagen de la sección desde Aguas Abajo sobre la vagoneta. Se observan las ramas en las pilas (Cristanchi y Testa Tacchino 2014)



**Figura 260.-** Metodología de Cálculo de la Velocidad Superficial, Imágenes obtenidas por software PTVlab (CETA-UNC), (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

En la Figura 261 se presentan los resultados de las velocidades superficiales obtenidas. El caudal aforado por molinete desde vagoneta para ese día, 17 de enero, fue de  $186 \text{ m}^3/\text{s}$ . Al procesar los datos se encontraron valores de velocidad negativos, consecuencia de áreas de recirculación, en la Figura estos valores se representaron nulos. Se observa, también en la Figura 261, el efecto de las pilas. Si bien todas las pilas tienen el mismo tamaño, las dos pilas centrales tienen un ancho efectivo mayor debido a las ramas depositadas en ellas, como se pueden ver en la Figura 259.



**Figura 261.-** Perfil de Velocidades, resultados de aforo por seguimiento de partículas. Se consideraron nulos los valores de velocidad negativa (Cristanchi y Testa Tacchino 2014).

### II - 3. Tercera Campaña

Esta campaña de aforos se realizó entre el 19 y el 23 de febrero de 2014. La misma se formalizó con medios de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

Los objetivos de esta campaña fueron el intercambio de información técnica y discusión sobre metodología de aforo y herramientas de procesamiento de las mediciones y la prueba de aforos con tecnología Doppler y la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas a gran escala. También se realizaron aforos sólidos.

Los aforos se Realizaron en Villamontes, Bolivia. Participaron de esta campaña diferentes equipos profesionales: Por la DE-CTN participaron el Ing. Claudio Laboranti, el Ing. Diego Ortiz, la Inga. Alejandra Cristanchi y el señor Walter Mongelos; Por EVARSA el Ing. Diego Fontana, y los Técnicos Raúl Canchi y David Acosta; Por el INA el Ing. Horacio Hillton; Por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de Universidad Nacional del Litoral el Dr. Ing. Ricardo Szupiany y el Ing. Lucas Domínguez Rubén (ADCP); Por Centro de Estudios y Tecnología del Agua y Laboratorio de Hidráulica Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba el Dr. Ing. Carlos M. García, el MSc. Ing. Antoine Patalano y el autor.

El Dr. Szupiany, el Dr. García, el Ing. Laboranti y el Ing. Dominguez Rubén fueron los responsables de las pruebas del instrumental ADCP y el Ing. Patalano de la técnica de Velocimetría por Imágenes.

La tecnología Doppler (que utiliza el principio físico del cambio de frecuencia ante el rebote acústico que produce una partícula transportada por el flujo) se ha tornado actualmente una práctica universal en hidráulica fluvial debido a su simplicidad y bajo costo relativo, a lo que se le adiciona el hecho de proveer una alta resolución temporal y espacial del campo de flujo adquiriendo información que no es posible obtener por medio de métodos convencionales. El instrumento acústico utilizado comúnmente en el caso de mediciones en campo, es el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Aun cuando se ha comprobado que los ADCP son muy eficientes para cuantificar los caudales escurridos, caracterizar los campos de flujo y estimar las descargas sólidas de sedimentos en suspensión, algunas mediciones realizadas con esta tecnología en el Río Pilcomayo



mostraron inconvenientes en su implementación debido a las altas tasas de transporte de sedimentos en suspensión presentes, las que atenúan significativamente las señales acústicas. Para las condiciones experimentales en las que los ADCP no puedan ser utilizados, existen antecedentes en la literatura donde se recomienda la implementación de una tecnología de medición óptima basada en una técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) la cual no es intrusiva, y puede ser implementada con bajo costo relativo.

Se compararon técnicas convencionales utilizando molinete desde vagoneta con tecnología Acústica utilizando tres diferentes ADCP con diferentes frecuencias acústicas y velocimetría por imágenes de partículas a gran escala.

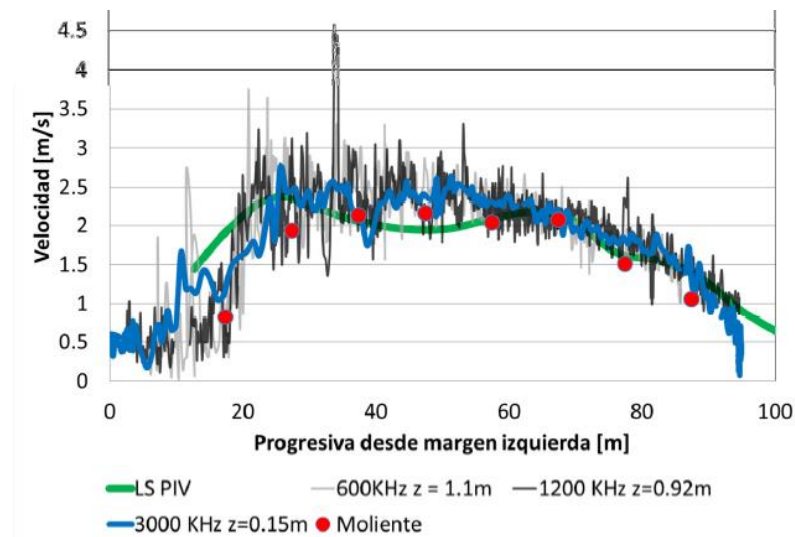
En la evaluación in situ se utilizaron tres Perfiladores de Corriente Acústico Doppler con diferentes frecuencias acústicas que definen las configuraciones de registro espacial y temporal. Así, se utilizó un ADCP "River Surveyour S5" para aguas poco profundas con una frecuencia acústica de 3MHz fabricado por la compañía YSI/Sontek y dos ADCP denominados "Workhorse Río Grande" fabricado por la compañía Teledyne RD Instruments, que presentan similares características físicas pero trabajan a diferentes frecuencias, (600 kHz y 1200 kHz), brindándoles diferentes capacidades y condiciones para aforar, caracterizar el flujo y el transporte de sedimentos. Todos los ADCP se instalaron en plataforma móviles para su utilización y se operaron desde la vagoneta. Para la implementación de LSPIV (medición del campo de velocidad superficial en la sección de interés) se ha utilizado una cámara digital WX300 de marca SONY. La cámara fue colocada sobre una grúa encima de un trípode lo que permitió tener suficiente altura para enfocar sobre la sección de interés y la cámara digital se controló de forma remota. Se asumió que los patrones visibles de a la superficie del agua se desplazan a la misma o casi a la misma velocidad que ella. Esta hipótesis nos permite utilizar las imperfecciones visibles a la superficie del agua como trazador. Todo el sistema experimental descrito se ubicó sobre la margen izquierda del río.



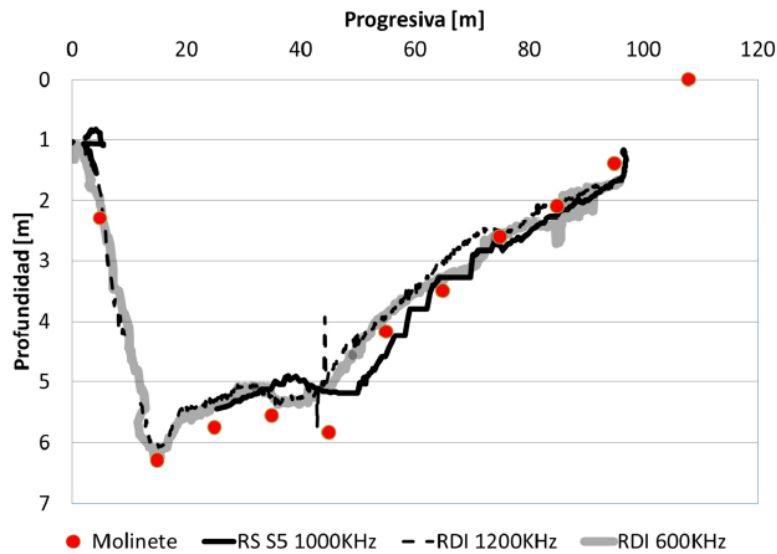
**Figura 262.-** Configuración del sistema para la implementación de la técnica de PIV. La cámara digital se ha montado sobre una grúa desde la margen izquierda del río (Szupiany, y otros 2014).



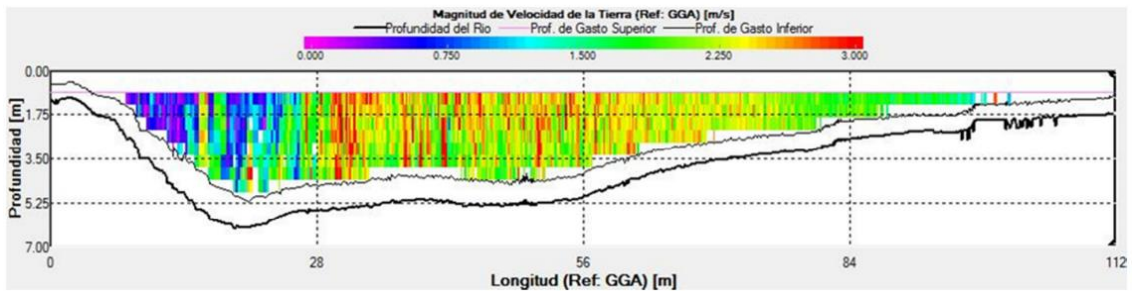
Se presentan a continuación los resultados y conclusiones a que arribaron los profesionales: El caudal aforado con técnicas convencionales (molinetes desde vagoneta) fue de  $628\text{m}^3/\text{s}$  mientras que los valores aforados con los ADCP “Workhorse Río Grande” fueron de  $659\text{ m}^3/\text{s}$  (diferencia con molinete de 4.9 %) y  $640\text{ m}^3/\text{s}$  (diferencia con molinete de 1.9 %) para las frecuencias acústicas de 600KHz y 1200KHz, respectivamente. La Figura 2 muestra el campo de velocidades de flujo [m/s] registrado con el ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz de frecuencia. Por otra parte el ADCP “River Surveyour S5” para aguas poco profundas caracterizó el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal. Este perfilador no registró valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica. A partir del perfil transversal de velocidades superficiales con LSPIV y la batimetría medida con ADCP se estimó el valor de caudal escurrido igual a  $582\text{ m}^3/\text{s}$  (diferencia menor al 7 % con el valor aforado con ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz).



**Figura 263.-** Contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos en la región cercana a la superficie libre con las diferentes técnicas (Szupiany, y otros 2014).



**Figura 264.-** Contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas en la sección de aforo de Villamontes (Szupiany, y otros 2014).



**Figura 265.-** Campo de Velocidades de flujo [m/s] registrado con ADCP "Workhorse Río Grande" de 600 kHz de frecuencia, utilizando una plataforma móvil. Las progresivas indican distancia desde margen izquierda (Szupiany, y otros 2014).

Los instrumentos y las metodologías experimentales evaluadas presentaron aspectos positivos y negativos. Los Perfiladores RDI "Workhorse Río Grande" de ambas frecuencias (600 kHz y 1200 kHz) demostraron ser aptos para determinar el caudal, perfil de velocidades y morfología del fondo. Ajustes de parámetros del instrumento debieron realizarse para ampliar los rangos límites producto de las elevadas atenuaciones de la señal. El ADCP de 600 kHz presenta mayor robustez (sin pérdidas de datos de velocidad ni registro del fondo) aunque su resolución espacial es menor que perfiladores con mayor frecuencia acústica. El valor de caudal registrado con ambos ADCP RDI difiere en menos de un 5 % respecto al método tradicional. La técnica LSPIV reprodujo en forma satisfactoria el campo de velocidades superficiales de flujo al contrastar esta información con la registrada con el ADCP "River Surveyour S5". Este último perfilador, si bien presenta la mayor resolución espacial (celdas de hasta 2cm) solo registra el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal. Este perfilador no registró valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica.

**ANEXO - III.**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y AMBIENTALES**  
**DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO**





El sistema de baja presión del Noroeste Argentino (BNOA) es importante en los procesos de transporte y convergencia de humedad hacia la región porque favorece la formación de precipitaciones en la época del mayor calentamiento (verano). La cuenca tiene un carácter “monzónico” debido a su comportamiento estacional, es decir existen presiones menores en verano que en invierno y diferencias marcadas entre la precipitación de verano (concentración > 90 %) respecto al invierno.

El vapor de agua necesario para originar las lluvias al este de los Andes proviene del Océano Atlántico y las selvas tropicales de Sudamérica. Las trayectorias del flujo de aire húmedo llegan a la cuenca desde el N, NE, E y SE. Cuando no está presente el flujo de humedad en la región aparecen prolongados períodos con sequías. (Halcrow-Serman 2007)

Existe un gradiente de temperaturas creciente de Sur a Norte y dado que la cuenca tiene una orientación NO - SE también se encuentra un gradiente positivo de temperaturas desde el NO al SE. La temperatura media anual en Misión La Paz para el periodo 1992-2002 es 26°C.

El año hidrológico para el Río Pilcomayo ha sido establecido desde el 1 de agosto al 30 de julio. Las precipitaciones pluviales en la cuenca alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90 % de la que precipita durante todo el año, repartiéndose el 10 % restante en los ocho meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial. (Pool y Van Duijne 1996)

Las precipitaciones medias anuales para el mes de enero varían entre 100 mm y 170 mm. Los valores más bajos se registran entre Misión La Paz y la zona donde ya no existe el cauce del Río Pilcomayo (aguas abajo del bañado La Estrella). En julio la precipitación media mensual es muy baja, en la cuenca alta no se superan los 5 mm y aguas abajo del Bañado La Estrella se encuentran valores entre 15 mm y 45 mm. Si observamos la precipitación acumulada anual hay un gradiente positivo de Oeste a Este, con valores desde 250 mm a 1400 mm anuales, Figura 267.

La evapotranspiración potencial (ETP) media Anual, en la cuenca alta y baja tiene un gradiente positivo Sur – Norte que comprende valores de 1000 mm a 1350 mm para la primera y entre 1350 mm y 1500 mm para la segunda (Figura 268).



CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y AMBIENTALES  
DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

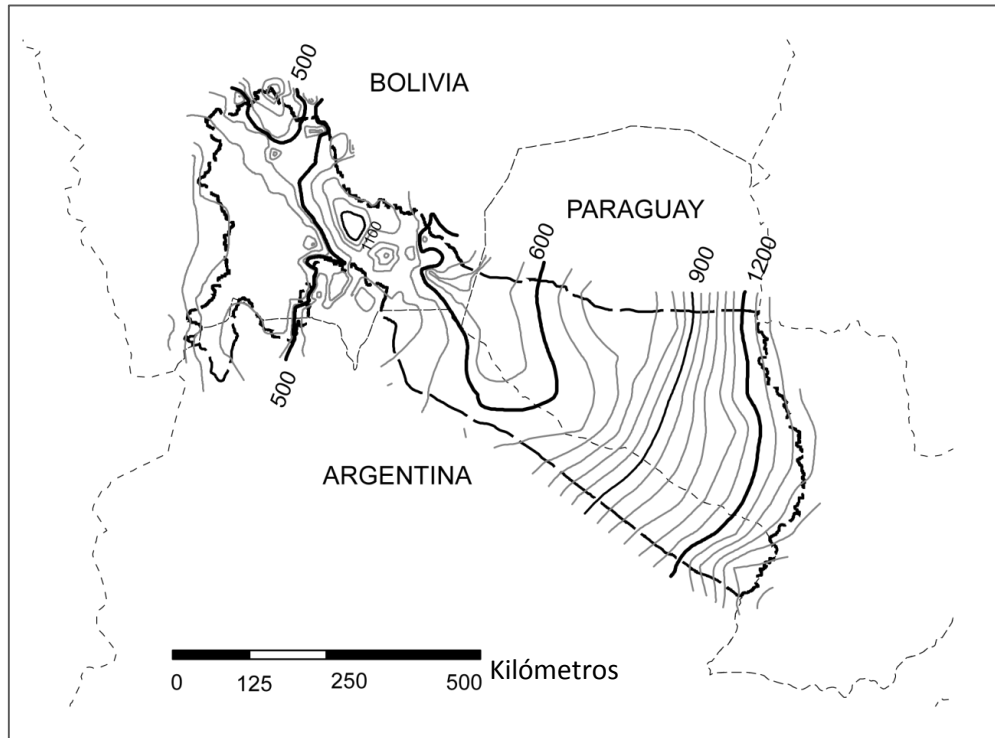


Figura 267.- Mapa de Precipitación Medias Anual en la cuenca del Río Pilcomayo. Fuente: (Halcrow-Serman 2007).

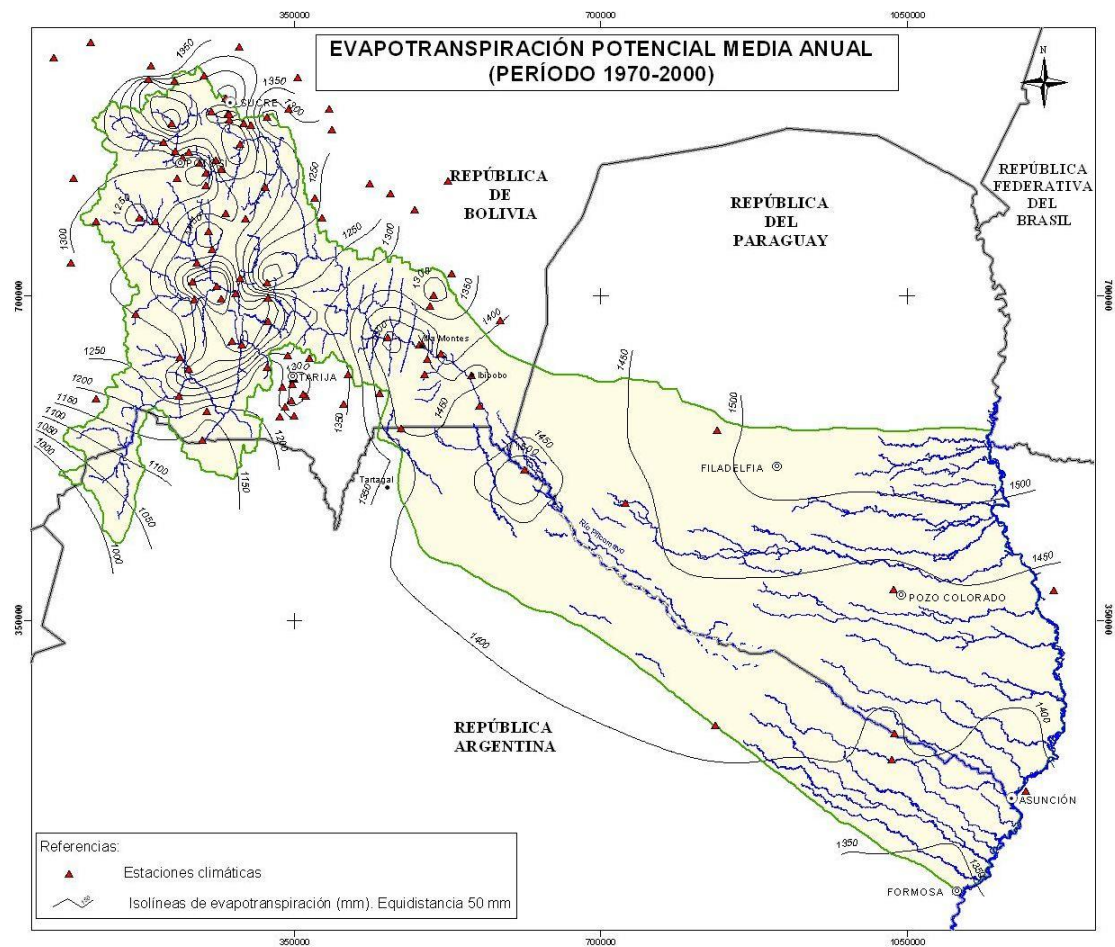


Figura 268.- Mapa de Evapotranspiración Potencial Media Anual en la cuenca del Río Pilcomayo. Fuente: (Halcrow-Serman 2007).

### III - 2. Características de las Poblaciones urbana, rural y originaria

La cuenca alta está formada por la puna y valles regados por la cuenca. En esta región el Quechua es el idioma indígena dominante y la población típica es campesina agricultora y pastora. También es la zona minera de la cuenca integrada por Tupiza, Potosí y áreas aledañas. Es una de las zonas donde se asentó el imperio Inca poco antes de que llegaran los españoles a América. Como modelo económico predomina la pequeña agricultura comunitaria de asiento familiar y el pastoreo de altura, en algunos casos trashumante. El paisaje es árido y los valles permiten agriculturas con riego, aprovechándose, por lo general distintos pisos ecológicos para cultivo y pastoreo. La organización social tradicional varía en un espectro cuyas variantes pasan por la integración institucional en diferentes niveles y la conservación de formas tradicionales de propiedad, derecho consuetudinario y economías con un componente muy importante de autoconsumo. La integración económica regional se da a través de mercados de confluencia e intercambio, pero también por medio de la producción especializada para mercados nacionales (Halcrow y Serman 2007).

Todavía dentro del área de montaña y hacia donde la cuenca se angosta en un cuello que precede al cono aluvial del río, el paisaje cambia, dando lugar a selvas de montaña hasta convertirse en el Chaco montañoso de Bolivia. Aquí junto a la agricultura de subsistencia es la ganadería la que domina el escenario. Aún hoy es zona de grandes haciendas, está caracterizada por formas de cría rudimentarias donde la alimentación principal del ganado es el ramoneo de monte. Con propietarios absentistas, conviven pequeños ganaderos criollos, con regímenes de tenencia precarios en muchos casos. La población Guaraní, tradicional de la zona, habita una treintena de comunidades dentro de su Tierra Comunitaria de Origen (TCO), reconocida por el estado Boliviano y en proceso de saneamiento. Penetrada desde el Norte y el Suroeste por no indígenas, la zona fue motivo de combates entre fuerzas armadas bolivianas y los guaraníes entre 1839 y 1892. Las derrotas indígenas dieron lugar a migraciones hacia la Argentina y a la entrada de ganaderos no indígenas a la región. Muchos guaraníes fueron integrados a las haciendas surgentes por sistema de deudas y por generaciones. La actual organización indígena en la zona es relativamente reciente y constituye un fenómeno de reagrupamiento y reconquista de territorios que el reconocimiento del TCO Itika Guasu refuerza. La experiencia de años hace que muchas comunidades guaraníes sean ganaderas en pequeña escala y que la venta de fuerza de trabajo en haciendas sea aún una de las principales fuentes de ingresos. Junto a estas fuentes practican la agricultura y la pesca (comunidades a la vera del río).



**Figura 269.-** Arte de Pesca utilizada en la zona, red Tijera (De Simone 2014).

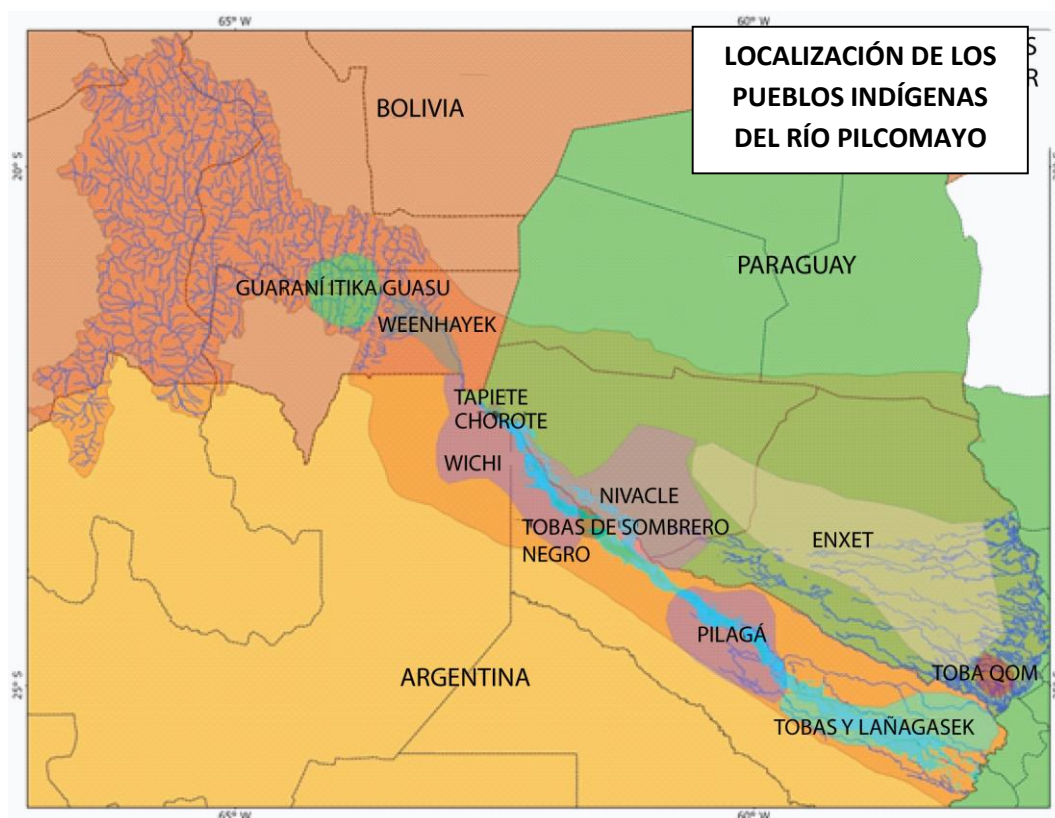


**Figura 270.-** Arte de Pesca utilizada en la zona, red Propia (De Simone 2014).

Pasando el Angosto se inicia lo que se conoce como cuenca baja, Pilcomayo superior. Comienzan los llanos chaqueños por los que el Pilcomayo adquiere un cauce ancho y variados meandros. La ciudad de Villamontes, con 16.000 habitantes (2001) se constituye en centro de una pesquería difundida desde el Angosto hasta la frontera con Argentina y aún más allá en todos los lugares de este país y del Paraguay donde las aguas del Pilcomayo dejan su impronta. La pesquería involucra por igual a criollos e indígenas, siendo estos últimos los pescadores tradicionales. El fenómeno comercial del sábalo ha llevado a la introducción de artes de pesca legalmente cuestionadas como las trampas para peces. La pesca de la zona es apreciada en toda Bolivia, siendo sus principales mercados las ciudades de Santa Cruz, Cochabamba y La Paz. En virtud del éxito comercial y la disminución de los volúmenes de pesca en los últimos años, la compra de sábalos por transportistas bolivianos se ha extendido aún allende la frontera argentina, siendo una variante de esta tendencia, el contrabando de sábalo de río desde la Argentina, vía Yacuiba.

Las comunidades Weenhayek que habitan mayormente la margen derecha del Río Pilcomayo, son unas 18. Los Weenhayek no sólo son los pescadores tradicionales en la zona, sino que entre los miembros de esa etnia se encuentra el mayor número de concesionarios pesqueros (33 de 46) autorizados por la Prefectura de Tarija.

Hacia el Sur se extienden unas 15 comunidades guaraníes ubicadas en las cercanías de la ruta que une Villa Montes con Yacuiba. Agricultores y ganaderos, sus habitantes son la principal oferta de mano de obra para los puestos ganaderos del área, muchos de ellos dentro del TCO weenhayek.



**Figura 271.-** Localización de Pueblos indígenas de la cuenca del Río Pilcomayo (Colegio mayor Sto Tomás de Aquino, 2014).

La producción ganadera en pequeña escala, practicada sobre superficies relativamente pequeñas y en el marco de explotaciones familiares se extiende desde la zona de O'Connor y hasta las cercanías del Río Paraguay. La situación de ganaderos ocupantes de tierra dentro del TCO Weenhayek ha generado gran inseguridad entre estos productores ya que, aún en los casos en los que tienen títulos legales de sus propiedades, parte de ellas puede ser reintegrada a los TCO en tanto no se les dé un uso "socioeconómico" adecuado.

Con la apertura del cono aluvial aumenta la diversidad de la cuenca yendo desde el seco paisaje del Chaco central paraguayo a la sobreabundancia acuática del Bañado La Estrella, o a las plantaciones de banana, soja y algodón en el Este formoseño y la granjillas hortícolas de las cercanías de Villa Hayes y Benjamín Aceval. Entre estas alternativas una sucesión de pueblos indígenas mantiene sus puestos a orillas del río o lo que quedó de él (Figura 271). De Oeste a Este y a ambas márgenes del río: Wichi, Chorote (Manjúi), Nivacle



(Chulupí), Tobas, Pilagás son las etnias principales. Dentro del perímetro de la cuenca, sin embargo, también hay grupos Chané, Chiriguano (Ava) y Tapiete. Junto a la población criolla o mestiza, hay otros grupos migrantes, entre los que se destacan los Mennonitas (Halcrow y Serman 2007).

La mayor concentración de población se encuentra en el noroeste del área de estudio, dentro del territorio Boliviano. Este fenómeno no se debe sólo a la presencia de dos áreas urbanas importantes como son Potosí y Sucre, sino que las áreas contiguas muestran gran concentración de población rural. Otro núcleo denso en habitantes por superficie lo constituyen las secciones de San Lorenzo, El Puente, Tarija y Uriondo. La sección de Villazón aparece con alta densidad en el mapa de población total, pero con baja densidad en el de población rural. La presencia de concentración urbana contrasta aquí con la baja densidad de población rural (1 a 5 habitantes por Km<sup>2</sup>).

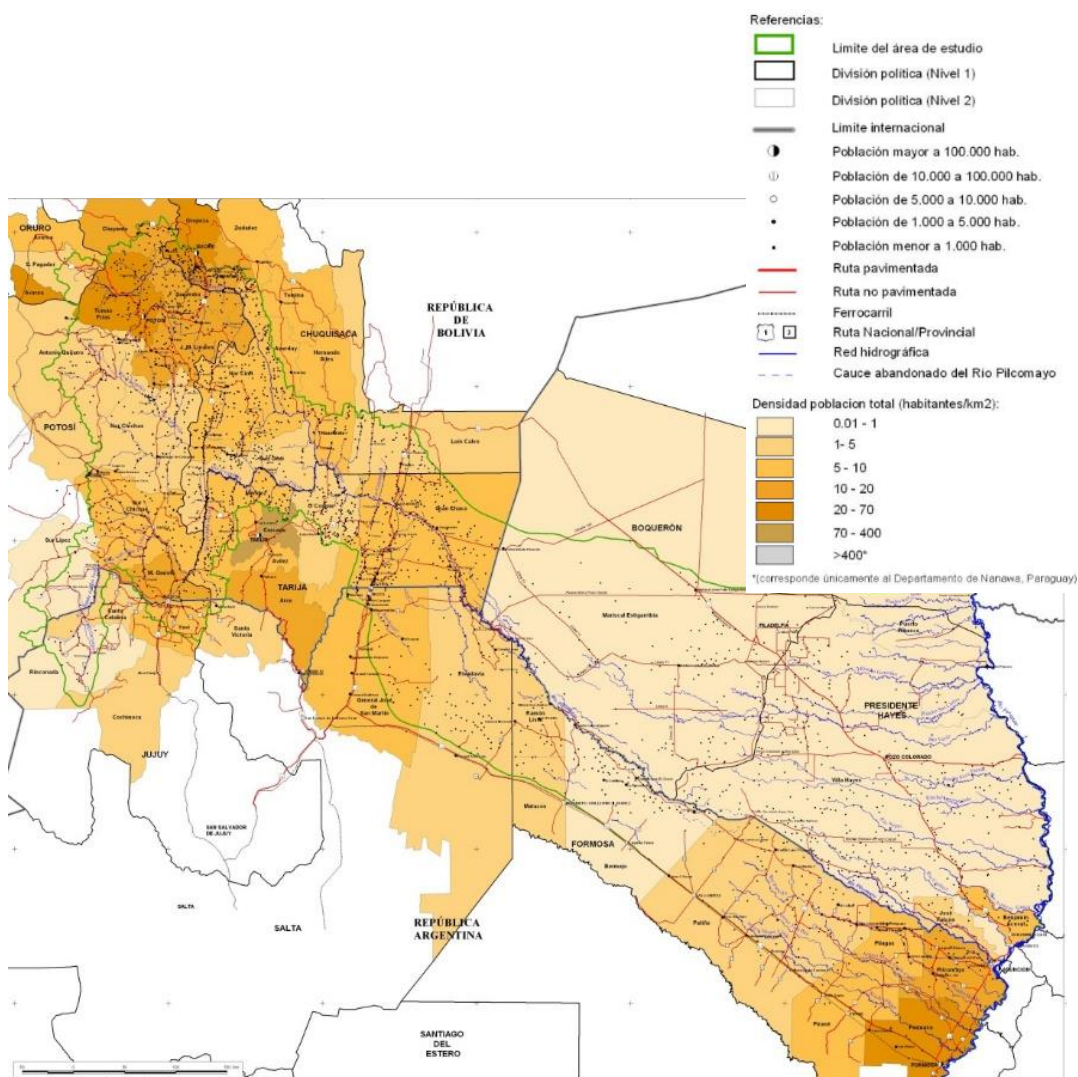


Figura 272.- Mapa de densidad Poblacional en la cuenca del Pilcomayo (Halcrow-Serman 2007).

También en los departamentos de Yavi en Jujuy y San Martín en Salta se da este fenómeno. La población urbana eleva la densidad en el mapa de población total, siendo esta baja en el de población rural.

Los pasos fronterizos y el comercio internacional hacen sentir su influencia en esta configuración. En Formosa la densidad aumenta en los extremos Este y Oeste. Esta forma de concentración también tiene que ver con la población urbana, al Este la presencia de la ciudad de Formosa y el río, al Oeste la cercanía de la provincia de Salta y la ocupación tradicional en la cercanía del punto trifronterizo. Sin duda el Chaco en general y el Chaco paraguayo en particular constituyen las áreas de menor densidad poblacional en la cuenca del Río Pilcomayo, también son las que tienen peores comunicaciones y menores niveles de desarrollo productivo.

### III - 3. Problemática Ambiental y Social

Diferentes causas pueden derivar en escasez y restricciones al aprovechamiento de los recursos hídricos por parte de las poblaciones. Las más importantes son el déficit por condiciones climáticas y la aleatoriedad en la distribución del agua entre Argentina y Paraguay como consecuencia del retroceso del río que, desde comienzos del siglo pasado a la actualidad, ha retrocedido en términos netos aproximadamente 290 km, además de las sucesivas *migraciones del ápice* de su cono aluvial. Por otro lado, hay un riesgo geológico con las consiguientes *transformaciones del relieve o paisaje*, el fenómeno principal que se aborda en esta problemática es el de *remoción en masa*, que podría ser una de las principales fuentes de aporte de material clástico, cuya intensidad depende de la confluencia de factores naturales internos como son el grado de cohesión de materiales, existencia de planos de discontinuidad, plasticidad de materiales y externos como precipitaciones extraordinarias, pendiente empinada y ondas sísmicas. Asimismo, la escasez y restricciones al recurso hídrico dependen del régimen del río, con sus fases de inundación y estiaje, el volumen de sedimentos transportado y por las restricciones emergentes de la existencia de la infraestructura y equipamiento necesarios para su acceso, distribución, consumo y utilización.

El sistema ambiental se estructura mediante una amplia y compleja serie de relaciones entre factores naturales abióticos y bióticos. Los frecuentes conflictos o desequilibrios entre lo demandado al ambiente y lo que este puede ofrecer, se manifiesta a través de *procesos de degradación ambiental* como la salinización, la deforestación de ecosistemas con dominio de especies arbóreas nativas y la desertificación. Los problemas de salinización y deforestación tienen un arraigo importante en el Chaco central mientras que la desertificación es importante en la cuenca alta a la vez que también puede derivarse de los otros dos problemas mencionados.

Se considera que existe *degradación de la calidad del agua* cuando ciertas variables cuantitativas y cualitativas no coinciden con los parámetros normales que se obtendrían al medirse en una situación de ausencia de contaminación por actividades antrópicas. Este tema fue claramente identificado en función de la percepción y evidencias sobre el posible nivel de contaminación como consecuencia de la actividad minera que tiene lugar en la cuenca alta. La *degradación ambiental por pasivos ambientales* impide utilizar los recursos naturales en el presente o futuro debido a la contaminación generada a partir de una mala disposición de residuos producidos por una actividad pasada. Este tema ha



cobrado mucha relevancia con relación al tema de la calidad del agua y por ser los pasivos una fuente cierta de contaminación.

La *Pérdida de hábitat y biodiversidad*, es una problemática de suma importancia que implica, además de la posible desaparición del sistema natural, la consecuente imposibilidad de continuar utilizando recursos y servicios naturales incorporados a la sociedad y desaprovechar el potencial (productos y servicios aún desconocidos) del ecosistema. La vinculación actual y potencial de los recursos naturales con la economía familiar, fundamentalmente de las distintas comunidades indígenas de la región, realzaron la necesidad de abordar esta temática como síntesis del resto de los procesos de degradación ambiental. Un caso característico de la región es la *degradación del recurso pesquero*. El sábalo es la especie migratoria más importante de la cuenca media y parte inferior de la cuenca alta del Pilcomayo y a lo largo de los años se ha observado las oscilaciones en su abundancia o escasez. La sustentabilidad del recurso se relaciona con factores naturales y antrópicos que influyen sobre su dinámica poblacional y que afectan la diversidad de stocks presentes, las áreas de reproducción y los patrones migratorios. Este tema es una de las problemáticas claves como consecuencia del elevado valor socioeconómico y cultural del sábalo y las diversas hipótesis arraigadas en la percepción social e institucional sobre las causas de su degradación.

Otra de las grandes problemáticas sociales de la región, con una fuerte carga histórica, es el *difícil acceso y tenencia de la tierra* entre otros factores que afectan una equitativa distribución de la riqueza consecuencia de la injusta distribución del beneficio en las principales actividades productivas y los límites que impone la pobreza para escapar de su círculo, sumados a la *desarticulación social y abandono de prácticas y tradiciones culturales* consecuencia de la injerencia de un sistema social "foráneo" sobre el que ha evolucionado en el propio territorio.

### III - 4. Breve Historia de los Tratados Binacionales y Trinacionales

La primera exploración moderna del curso chaqueño del Río Pilcomayo fue la expedición del Dr. Creveaux en el año 1876 que paró en el Chaco Paraguayo después de un ataque de los indios que mataron a todos los miembros del grupo. Dos años después, el Sr. Thouar realizó el reconocimiento completo del curso del Río Pilcomayo por demanda y con la ayuda de los gobiernos de Bolivia, Paraguay y Argentina. Esto significa que no disponemos de ningún mapa ni conocimiento del régimen del Río antes del comienzo de este siglo, sobre un periodo bastante corto, para un río que cambia muy rápidamente. Este hecho es importante para la dificultad de comprensión de esta cuenca y de sus problemas (Gilard 1996) .



Figura 273.- Ubicación en la cuenca (Kopaliani y Georgievsky 1993)

El Ing. Lange en 1906, recorrió el Pilcomayo desde su desembocadura hasta el paralelo 22°, haciendo uno de los relevamientos más completos hasta ese momento. Krayse y Ayala en 1908 elaboraron un informe en el cual afirmaban que por entonces aún el Estero Patiño recibía permanentemente agua del Río Pilcomayo. De allí en más Tapia, Groheber y otros comienzan a estudiar y desarrollar sus hipótesis acerca de los fenómenos que se producían en el Estero Patiño y sobre el sector del río que desemboca en el río Paraguay. Ya por esos años el Estero Patiño era una planicie anegadiza con un tirante que alcanzaba el metro, con vegetación acuática y fauna propia de pantanos. Según Volpi, en 1933, se producía el primer depósito importante entre Horqueta y Santa Ana. Volpi a través de sus observaciones concluyó que existía un gran delta sobre el río Paraguay integrado por varios tributarios, hacia el norte en territorio paraguayo, conformado por el Confuso, el Aguaray Guazú, el Negro y el Verde y en nuestro país primeramente alimentaba una zona de bañados que luego drenaba hacia los riachos Salado, Monte Lindo, Pilagá y Arroyo Guanacaré.

A partir de los sucesos ocurridos en mayo de 1810 en Buenos Aires la intendencia del Paraguay se aisló del resto del Virreinato del río de la Plata y declaró su independencia en 1842. Este acto no fue aceptado por Juan Manuel de Rosas, que entonces era gobernador de la Provincia de Buenos Aires y encargado de las relaciones exteriores de la Confederación Argentina, por lo que la emancipación sólo fue reconocida en 1852 por los vencedores en Caseros.

Tras la Guerra de la Triple alianza, llamada por Alberdi de la "Triple Infamia", que concluyó con la derrota del Paraguay en 1870, se acordó que las cuestiones de límite se abordarían cuando este se encontrara regido por un gobierno permanente.

Recién el 3 de febrero de 1876 se firmó la paz entre Argentina y Paraguay. Se estableció que el límite entre los dos países hermanos sería por el este y por el sur el río Paraná; por el Oeste el canal principal del río Paraguay. La soberanía sobre Villa Occidental y el territorio adyacente entre los ríos Verde y Pilcomayo sería sometida al arbitraje del presidente de los Estados Unidos, Rutherford Hayes, quién en 1878 dictó su laudo y sin exponer fundamento alguno cedió todo el territorio en disputa al Paraguay. El sector del Chaco Boreal entre Bahía Negra y el río Verde fue cedido definitivamente por la Argentina al Paraguay.

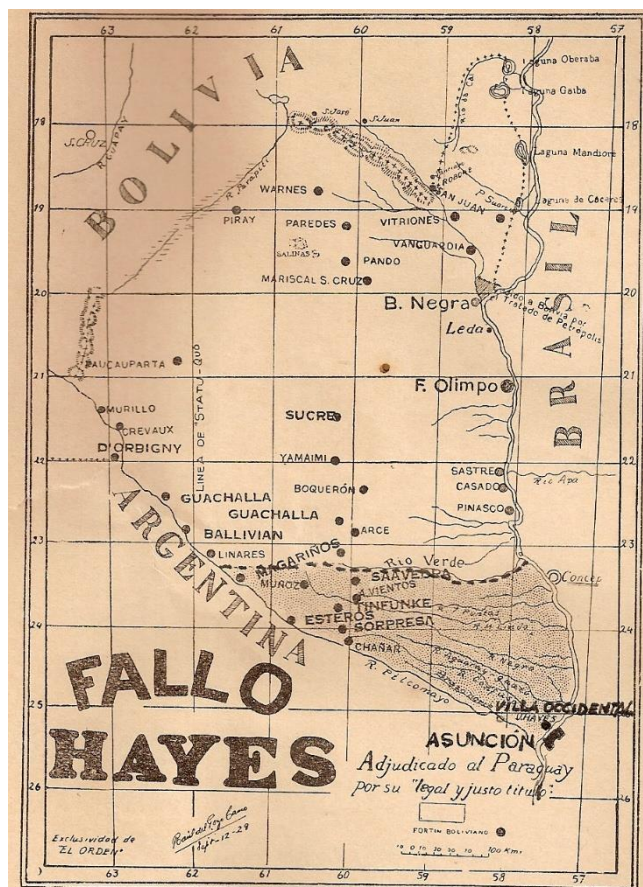


Figura 274.- Laudo Hayes

El árbitro estadounidense no se expidió sobre el límite occidental del territorio. Por ello sólo se fijó el punto tripartito entre Bolivia, Paraguay y Argentina, denominado Esmeralda en 1941, tras la conclusión de la guerra paraguay-boliviana.

El tratado Irigoyen – Machain, firmado en Buenos Aires el 3 de febrero de 1876 y el fallo arbitral de Hayes de 1878 establecieron que el brazo principal del Río Pilcomayo sería el portador del límite internacional entre el Paraguay y la Argentina. Cuando se procuró determinar ese brazo principal en el terreno se advirtió la inexistencia de un cauce definido en la zona correspondiente a los esteros Patiño. En 1905 y 1907 se firmaron protocolos que disponían la realización de estudios en la zona de los esteros. En 1939 se firmó el acuerdo Cantilo-Arbó, que dividió al Río Pilcomayo en tres sectores y definió el método para determinar el límite. Este tratado previó la realización de obras con el fin de asegurar la estabilidad de la línea limítrofe y la utilización de los caudales del río, pero no se llevaron a cabo (Rey Balmaceda 1979).

Posteriormente en 1945 se realiza la demarcación de hitos. Coincidentemente en este año se produce un nuevo retroceso del punto de quiebre de la pendiente ("Knickpoint" según la literatura anglosajona) que deja sin aportes líquidos al Estero Patiño lo que contribuye a su posterior desecamiento.

Después de la creciente de 1969-70 se observa nuevamente que 25 kilómetros del río se habían colmatado. Durante la década de los 70' se realizaron estudios en toda la cuenca promovidos por Naciones Unidas, el Banco Interamericano de Desarrollo y otros organismos internacionales, con el fin de programar el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca y dar solución a los problemas de retroceso del cauce natural. Desde Pedro P. Peña hacia aguas abajo los sitios donde el río sale de su cauce en épocas de crecida son numerosos. En junio de 1976, Puerto Irigoyen queda totalmente colmatado.

En definitiva, entre 1947-1976 los relevamientos realizados indicaron que el punto de quiebre o knickpoint había retrocedido 150 km. Ya en los 90' después de muchas confrontaciones con la República del Paraguay por la distribución de caudales se celebró un nuevo acuerdo. En esta ocasión se decide realizar un sistema de canalización "Proyecto Pantalón" que reparta los caudales de modo igualitario a cada país. Es así que en 1991 se construyen los canales derivadores.

El punto de taponamiento en 1995 se ubicaba a los 62°11' O, 22°40' S, 65 km aguas abajo del límite Trinacional. En 1997 se llevaban contabilizados más de 300 km del cauce natural del Río Pilcomayo colmatados de sedimentos.

La gran cantidad de sedimentos producidos en el altiplano, que luego son depositados en la planicie chaqueña, además de la alta variabilidad de los caudales líquidos producto del régimen de precipitaciones, se mencionan como factores claves que promueven los cambios morfológicos que traen aparejados desbordes y anegamientos (M. Amarilla 2005).

A pesar de las canalizaciones mencionadas, realizadas en los '90, que fueron diseñadas para la distribución igualitaria de caudales entre Argentina y Paraguay, este no ha sido el resultado observado.

En el año 1999 Paraguay construye su nueva toma, situada en la zona conocida actualmente como "Embocadura" (en el período de aguas bajas) este canal entra en

funcionamiento para la nueva crecida, del año 2000. Los ingresos de caudales a través de esta obra en el período de aguas altas se compatibilizan con su capacidad de conducción, totalmente despreciable para caudales de crecidas del río.

Conforme la ubicación de la toma, este canal recibe gran parte del material vegetal flotante, el cual obtura el tramo inicial del mismo y sedimenta buena parte del resto del canal, lo que provoca que, para el período de aguas bajas del río, no reciba agua. En este período de aguas bajas se construye una nueva toma a 200 m de la anterior, conectando con la traza de canal existente.

En el 2001, las condiciones de ingreso de aguas a territorio paraguayo se corresponden con idéntico comentario al anterior para el período de aguas altas, siendo nulo para aguas bajas. Los problemas de sedimentación en el canal paraguayo son una constante. En los años 2002, 2003, 2004 y 2005, se repiten las exiguas condiciones de ingreso hacia Paraguay, optando por proceder al cierre de la boca del canal, de tal manera de facilitar los trabajos de limpieza de sedimentos durante todo el año, con lo cual durante el 2006 no se producen ingresos de caudales tanto en períodos de aguas altas ni bajas.

En los años 2007 y 2008, ya con mejor capacidad de conducción del canal paraguayo se mejoran los ingresos de caudales, pero siguen siendo exiguos en comparación a los caudales del río. En el año 2009, para caudales bajos y ante obras de espigones en la toma paraguaya se producen los cambios en las distribuciones de caudales entre ambos países, asociado también al gran volumen de ingresos de sedimentos hacia territorio argentino.

En julio de 2010, se produce la interrupción de los ingresos de caudales hacia territorio argentino. En 2011 la interrupción se produce a inicios del mes de mayo. En 2012 las interrupciones de los ingresos ya se produjeron en enero, para repetirse finalmente en abril. Con caudales del orden de 500 m<sup>3</sup>/s, la derivación era total hacia Paraguay y se estima que en volumen anual sólo un 14 % entró a la Argentina (Baldissonne 2013). Ese año Argentina construye el Canal las Torres con el fin de recuperar los caudales hacia el lado argentino, aumentando a 18 % el volumen anual que entró a la Argentina. En el año 2013 se amplía el canal Las Torres. Después de las crecidas de 2013-2014 se taponan completamente el Canal Paraguayo y actualmente se lo está dragando para poder recuperar el ingreso de agua al Paraguay para la época de aguas altas.

Continuas negociaciones entre los países involucrados, Argentina, Bolivia y Paraguay, tratan de arribar a una solución definitiva a fin de lograr la repartición equitativa de caudales y solucionar el problema del retroceso del cauce.

### III - 5. Generación de Sedimentos

La Cordillera boliviana es el área fuente mayor de los sedimentos que son transportados en el Chaco. El relieve alto y las pendientes fuertes favorecen la erosión de barrancos profundos en capas Devónicas, Pérmicas, Cretácicas y Terciarias. Las capas típicas son de areniscas y arcillitas. Las subordinadas son tillitas (Pérmico), calizas y areniscas calcáreas (Cretácico) y conglomerados (Cretácico y Terciario superior hasta Cuaternario). Los conglomerados Cuaternarios fueron depositados en cauces precursores del Río Pilcomayo actual. La parte oriental del Cordillera tiene una estructura de anticlinales paralelas, los cuales favorecen una erosión fluvial. Los sedimentos en la cuenca alta están mal cementados, estando sujetos a una erosión intensiva. La escasa cobertura vegetal ayuda a este proceso. La erosión ocurre sobre todo durante las inundaciones o crecidas, entre diciembre y marzo.

En la base de la cuenca alta (cerca de Villamontes) la granulometría media del lecho del río es de arena media con diámetros de 0,250 mm a 0,500 mm, aunque existen sedimentos de tamaño de grano más grueso. Las gravas proceden también de los conglomerados de la cuenca alta y de las terrazas fluviales locales Cuaternarias. (Pool y Van Duijne 1996)

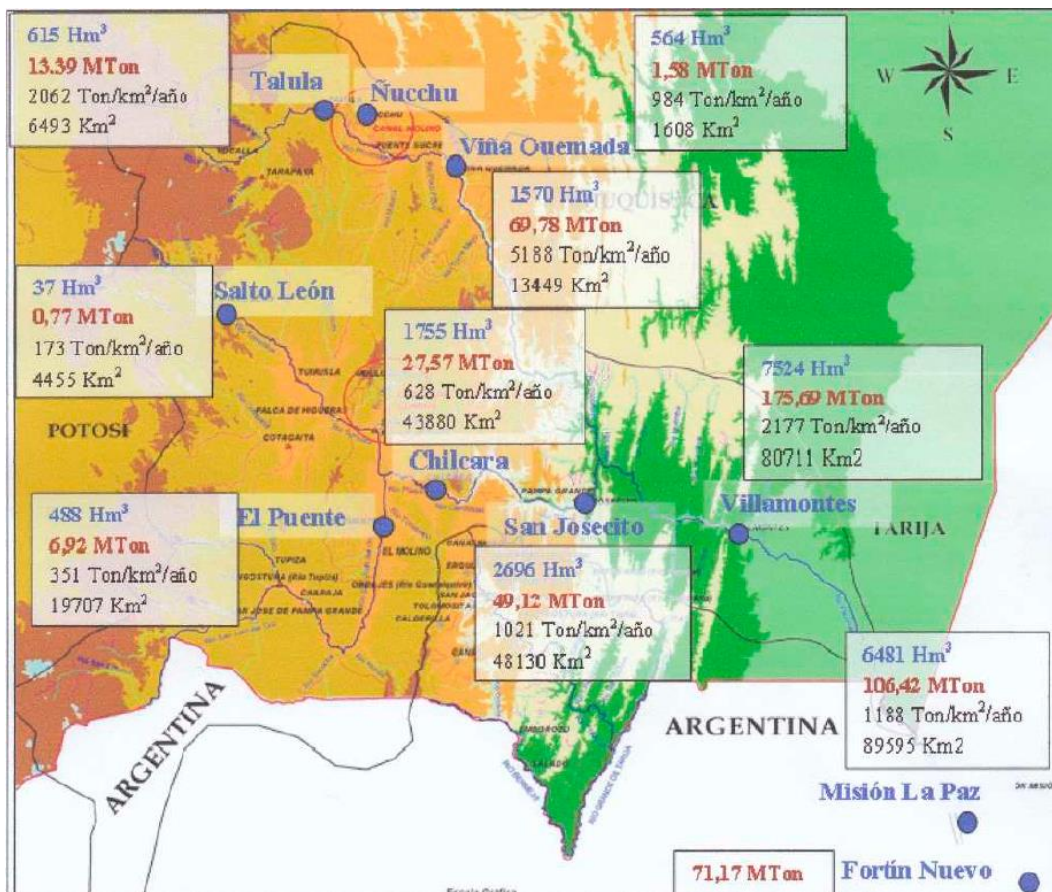


Figura 275.- Aportes interanuales líquidos, aportes interanuales sólidos y tasa de erosión interanual en la cuenca alta del Pilcomayo (Malbrunot y Amarilla 2007)



### III - 6. Transporte de Sedimentos

El transporte de material en suspensión es la forma mayor de transporte sólido en la cuenca del Pilcomayo. El transporte sólido de arrastre de fondo puede ser estimado en la cuenca en 10 - 11 %, el transporte de materias disueltas en 4 % y el transporte de materias en suspensión en 86 %. En Villamontes el aporte total sólido medio interanual (sobre el periodo de observación 1973-1987 y 1989-2005) puede ser estimado a 221,26 millones de toneladas, de los cuales 190,29 millones de toneladas en forma de material en suspensión, 8,85 millones de toneladas en materias disueltas y 22,13 millones de toneladas en arrastre de fondo.

El régimen del transporte sólido en suspensión sigue el régimen hidrológico de la cuenca con un aporte de más que 85 % durante los 4 meses de lluvia, de diciembre a marzo.

Las variaciones temporales son muy importantes y se recomienda medir el material en suspensión con una frecuencia de medición de algunos días particularmente en época de crecida para poder estimar con mejor precisión los aportes mensuales y anuales.

Estas variaciones temporales son menores si se consideran los datos mes por mes. En efecto se ha podido identificar que existía una relación en histéresis (más o menos marcada según las estaciones de la cuenca) de las concentraciones en función de los caudales líquidos: para un mismo caudal líquido, el río trae mucho más sólidos en suspensión en época húmeda que en época seca. Las transiciones de un comportamiento al otro se hacen antes de que empiece realmente la época húmeda y antes de que se acabe realmente la época húmeda. Para cada época hidrológica se han podido elaborar curvas de regresión potenciales, concentración como función del caudal líquido con potencia generalmente menor que uno.

Las variaciones interanuales pueden ser muy importantes lo que puede cambiar de manera sensible los promedios interanuales.

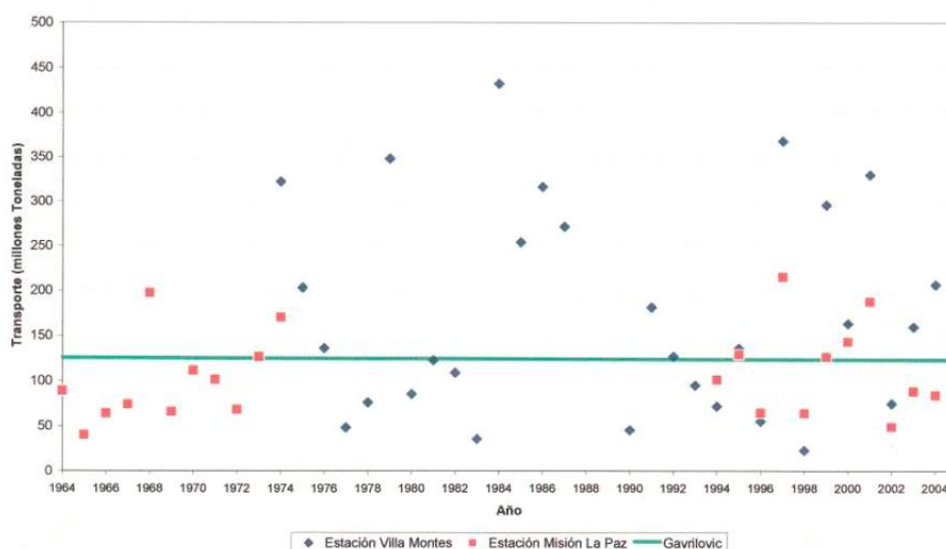


Figura 276.- Transporte Sólido Anual del Río Pilcomayo (De Lío, y otros 2007).

No se ha podido destacar una tendencia al aumento o a la disminución de los aportes sólidos anuales a lo largo de las últimas décadas. La granulometría de los sedimentos en suspensión en una misma estación varía de manera cíclica: en época seca los finos y los gruesos están en proporción casi idéntica, pero en época húmeda, los sedimentos finos representan la gran mayor parte del transporte sólido en suspensión, aproximadamente un 80 % del transporte sólido total.

Los datos disponibles no permiten concluir con certeza sobre las variaciones espaciales por tener periodos de observación bastante distintos. Sin embargo, la comparación de los aportes interanuales permite pensar que la mayoría del aporte sólido vendría de la cuenca del Pilcomayo alto (36 %).

La tasa de erosión global de materia en suspensión en Villamontes fue estimada a 2357,7 ton/(km<sup>2</sup>·año). (Malbrunot 2006)

### *III - 7. Hidrogeología*

El Sistema acuífero está constituido por acuíferos libres poco profundos y confinados/semiconfinados profundos. Estos últimos representan los más importantes del Chaco central paraguayo y argentino, ya que almacenan grandes volúmenes de agua de buena calidad, que pueden ser aprovechadas económicamente. Se presentan en varios niveles y a diferentes profundidades, constituyendo sistemas multicapas interdigitados y que a escala regional forman un solo sistema hidrogeológico. En términos generales se puede expresar que los grandes ríos que surcan la planicie chaqueña (Pilcomayo, Bermejo, Juramento, Dulce, etc.) brindan geoformas en las cuales se desarrolla un sistema de acuíferos que desde el oeste a este pasan de libres a confinados. Su potencia es variable y puede llegar a 200 metros. La recarga de estos acuíferos se produce, principalmente, a través del agua del Río Pilcomayo y también por infiltración local del agua meteórica que se acumula en grandes cantidades en las cañadas. El agua subterránea extraída en estos sectores ha dado edades de <sup>14</sup>C convencionales comprendidas entre 700 y 4000 años, lo que indica la presencia de agua relativamente joven. Estas áreas son favorables para la perforación de pozos y la extracción de agua dulce (Spandre 2005).

Parece ser que la infiltración de las aguas de crecida del Río Pilcomayo, que alimentan las aguas subterráneas, tiene lugar principalmente en las zonas de precordillera, el cono de deyección y la parte superior del Delta Segundo. El agua dulce subterránea se encuentra en la mayoría de los casos a modo de bolsones (agua de precipitación infiltrada) en un ambiente de agua salina. Estos bolsones reflejan en general la existencia y posición de cauces antiguos enterrados. Esto significa que los pozos tienen un caudal limitado y que están amenazados de salinización en el caso de realizarse una extracción excesiva. Como consecuencia existe una escasez de agua dulce subterránea y la población en una gran parte de la Cuenca Chaqueña del Río Pilcomayo depende realmente del agua superficial que proviene del Río Pilcomayo, durante sus crecidas (Pool y Van Duijne 1996).

A gran escala, se identifican cuatro complejos hidrogeológicos desde Villamontes a Misión La Paz (Tujchneider, y otros 2007) delimitados en la Figura 278 y Figura 277.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y AMBIENTALES  
DE LA CUENCA DEL RÍO PILCOMAYO

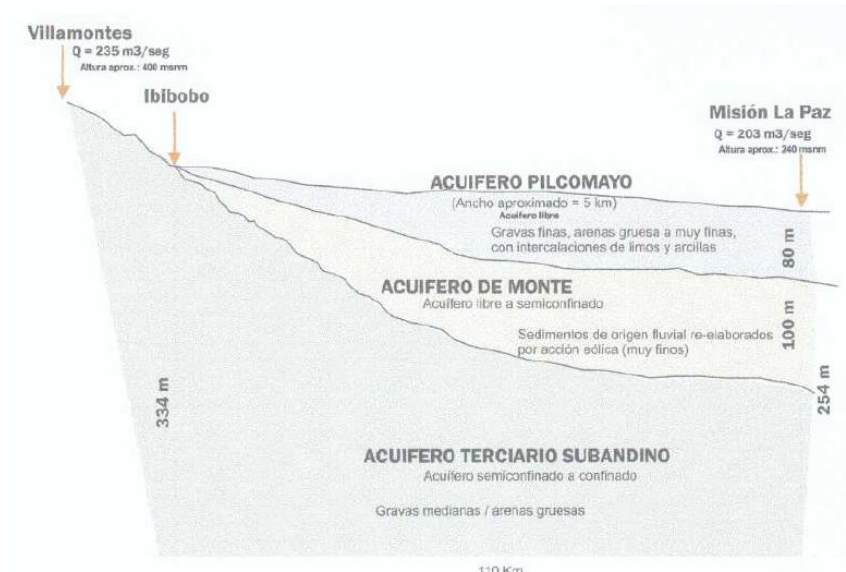


Figura 277.- Complejos de Acuíferos (Tujchneider, y otros 2007)

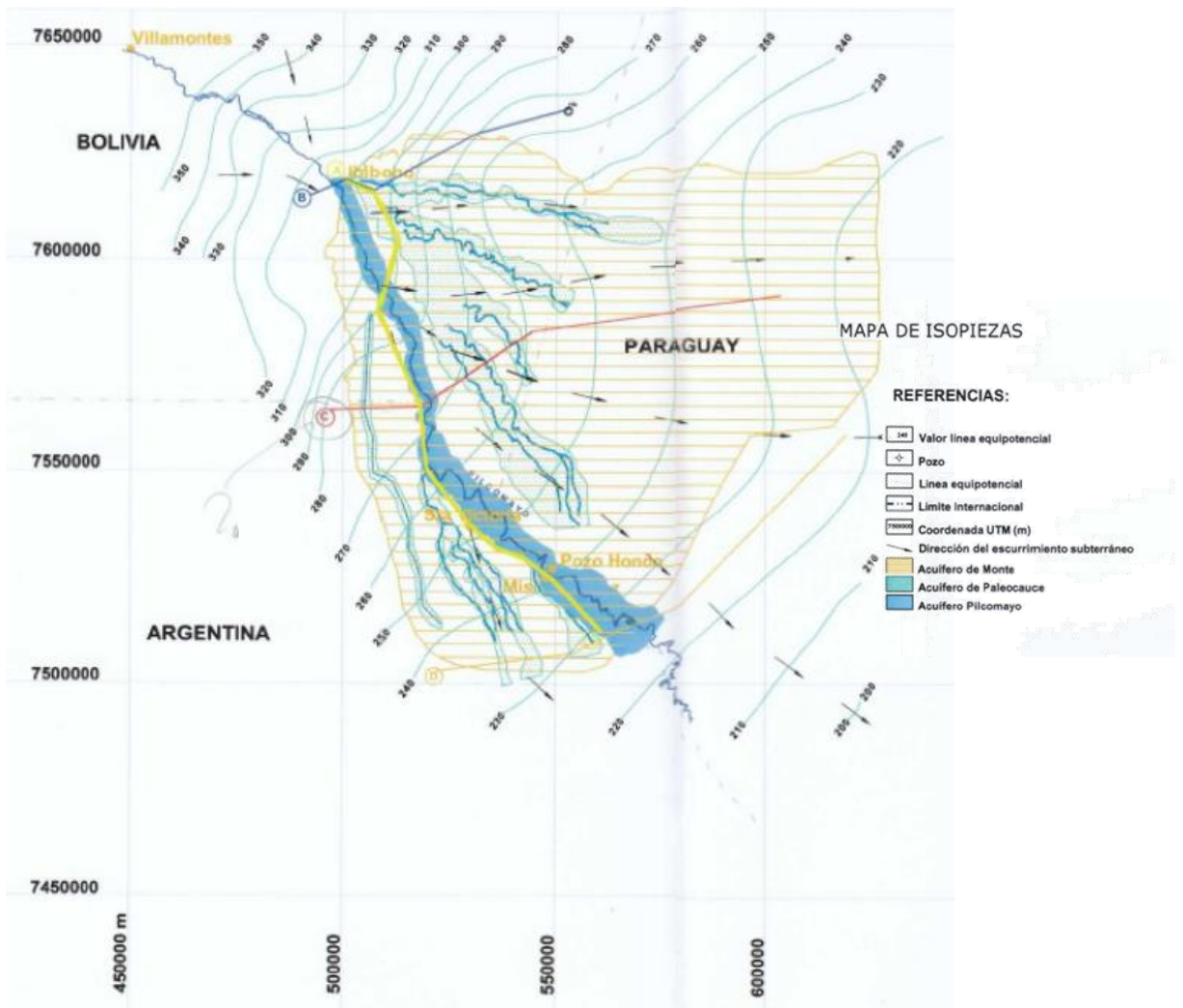


Figura 278.- Mapa de Isopiezas (Tujchneider, y otros 2007)

Complejo Acuífero Pilcomayo: Constituido por sedimentos de granulometría gruesa, media a fina, espesores máximos de hasta 80 metros, de carácter libre. Se lo caracteriza en relación directa a los derrames del Río Pilcomayo, extendiéndose por las dos márgenes del curso actual, hasta una distancia media de 5km. La calidad del agua es apta para consumo humano.

Complejo Acuífero de Monte: Constituido por sedimentos predominantemente fluviales, libre a semiconfinado, que se lo caracteriza con recarga principal local por precipitaciones. La calidad del agua se presenta, en general, con contenidos salinos no aptos para consumo humano. Los valores de conductividad eléctrica del agua varían entre 1500 y 20000 pS/cm.

Complejo Acuífero de Paleocauces: Se define ocupando las cañadas y madrejones, como reservorios relacionados genéticamente a los antiguos desbordes del Río Pilcomayo. Presenta espesores muy variables y agua de buena calidad.

Complejo Acuífero Terciario Subandino: Se ubica en el subsuelo abarcando la totalidad de la zona estudiada, y se lo presenta constituido por una sucesión de acuíferos confinados y semiconfinado, con agua dulce, aunque con variaciones espaciales.

III - 8. Contaminación del agua

El accidente del dique de colas de Porco, cuya ruptura, ocurrió el 29 de agosto de 1996, produjo el derrame de 400.000 toneladas de desechos mineros que contaminaron aproximadamente 300 km del río. Este evento ha puesto en evidencia la fragilidad del sistema de diques de colas existentes. Los efectos han sido proyectados en la cuenca alta, lo que hace prever numerosos otros accidentes que podrían ser detectados.

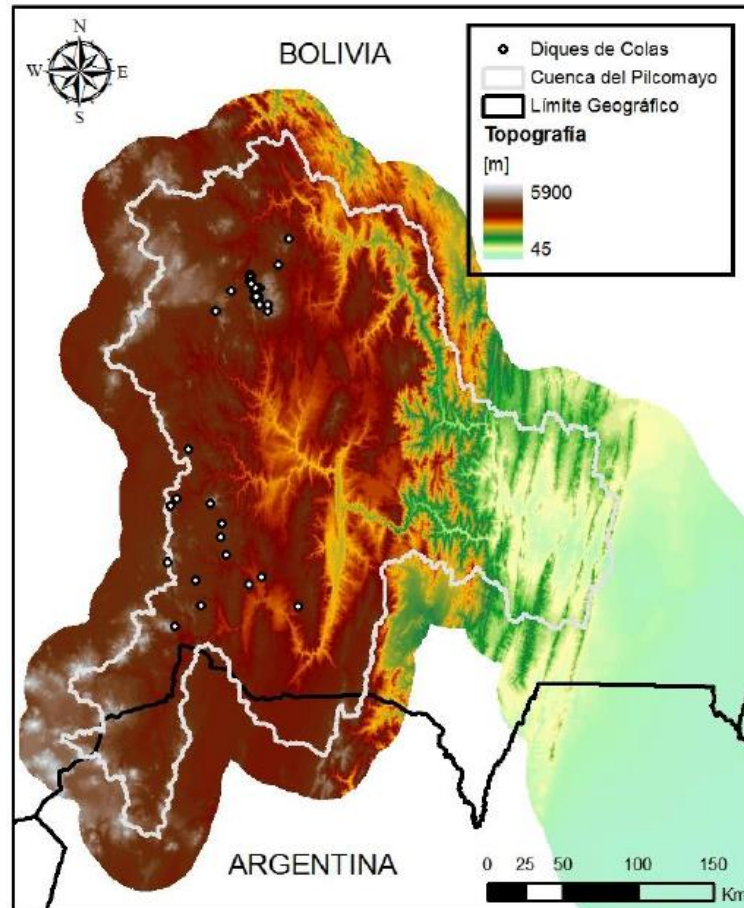


Figura 279.- Ubicación de Diques de Cola en la cuenca alta del Río Pilcomayo (Menéndez 2014)

De la información que se dispone, se obtienen datos que demuestran que, diariamente, se vierte un promedio de 1200 toneladas de desechos de 39 ingenios mineros en la zona norte de Potosí que tratan los efluentes de aproximadamente 500 minas, existiendo otras que no tienen ningún control de sus descargas (Caccato 2000).

En la actualidad el tema ha tomado vigencia nuevamente debido al colapso del dique de Colas en Tacobamba, Potosí, Bolivia el 4 de julio de 2014, operado por la minera Santiago Apóstol

El dique de Colas se rompe el 4 de julio de 2014 y la mancha contaminante pasa por Viña Quemada (Bolivia), 92 km aguas abajo de Canutillos por el cauce de río, desde el 6 de julio a las 9 hs hasta el 7 de julio a las 15 hs. (Datos registrados por el observador de Viña Quemada Gonzalo Ruiz, proporcionados por Lucy Romero y Alejandra Cristancho integrantes de la DE-CTN). Se estima el volumen derramado en 6800 m<sup>3</sup>.



Villamontes (Bolivia) se encuentra 361 km aguas abajo de Viña Quemada y siguiendo 216 km aguas abajo, siempre por el cauce del río, Misión La Paz (Argentina).



**Figura 280.-** Localización de Localidades importantes en el recorrido de la mancha contaminante. Fuente: Elaboración Propia



**Figura 281.-** Rotura dique de Colas, Mina Santiago Apóstol (Menéndez 2014).



**ANEXO - IV.**

**ALGUNAS CONSIDERACIONES TÉCNICAS**  
**SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO Y LÍQUIDO**  
**EN EL RÍO PILCOMAYO**



ALGUNAS CONSIDERACIONES TÉCNICAS  
 SOBRE EL TRANSPORTE SÓLIDO Y LÍQUIDO  
 EN EL RÍO PILCOMAYO

A partir de datos de aforos líquidos y sólidos proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos se han obtenido las siguientes figuras que explican la relación entre el transporte sólido, dividido en grueso de fondo y fino en suspensión, con el caudal líquido del Río Pilcomayo a la altura de Misión La Paz.

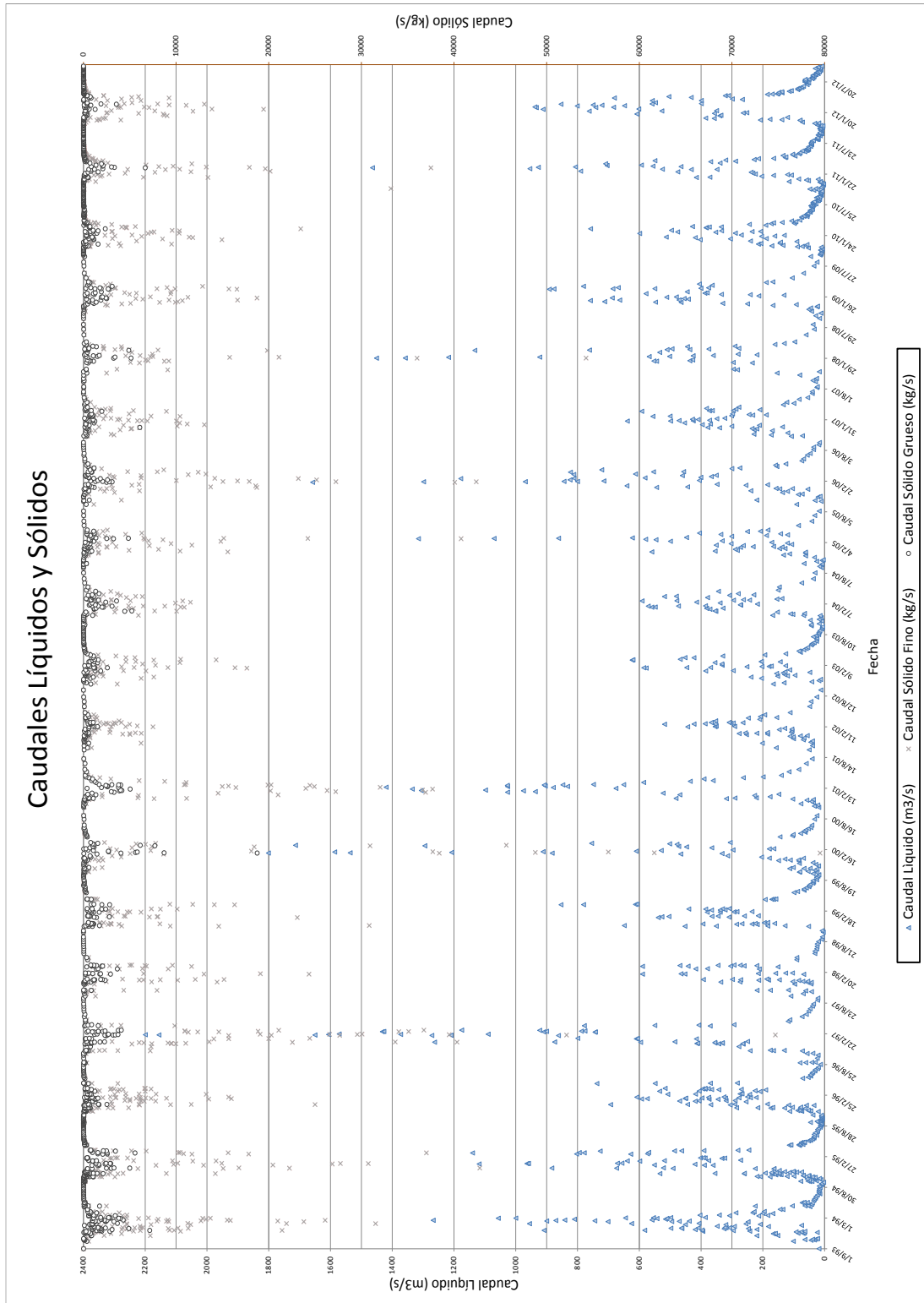
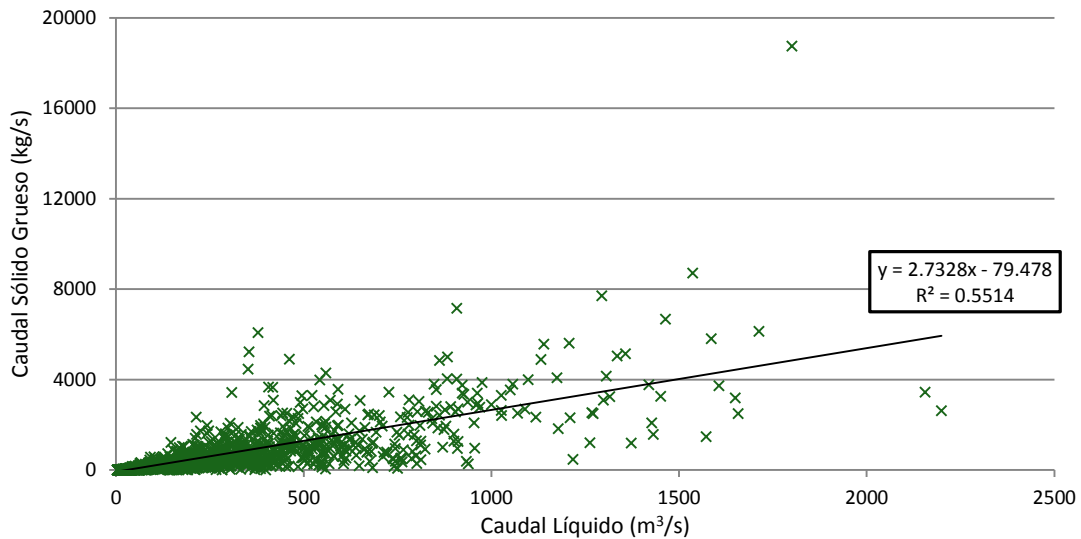


Figura 282.- Series de Caudales Líquidos y Sólidos fino y grueso entre 1993 y 2012

La Figura 283 presenta los valores de caudal sólido de fondo versus caudal líquido obtenidos a partir de aforos. La relación lineal que mejor los representa es

$$Q_{sf} = 2,74 \cdot Q_l - 79,48$$

Siendo  $Q_{sf}$  el transporte sólido por el fondo, es decir el material grueso medido en kg/s y  $Q_l$  el Caudal líquido en m<sup>3</sup>/s.

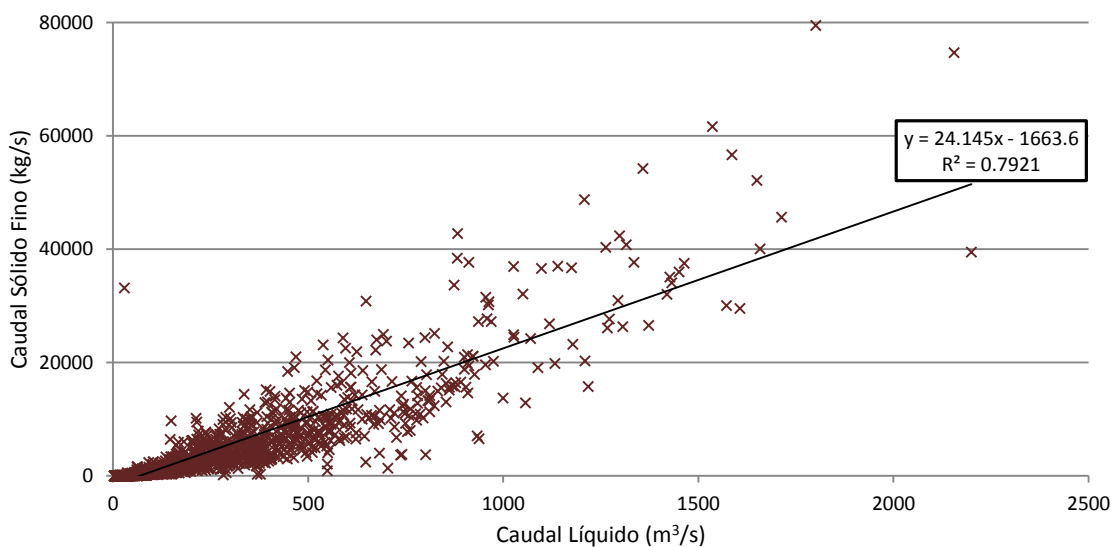


**Figura 283.-** Relación entre caudal líquido y caudal sólido de fondo o grueso (serie 1993-2014).

En la Figura 284 podemos ver los aforos líquidos y sólidos en suspensión que han sido aproximados por la relación

$$Q_{ss} = 24,15 \cdot Q_l - 1663,6$$

Siendo  $Q_{ss}$  el transporte sólido en suspensión o de material fino en kg/s



**Figura 284.-** Relación entre caudal líquido y caudal sólido fino, carga en suspensión (serie 1993-2014).

También se ha representado en la Figura 285 la relación entre transporte sólido de material en suspensión y de fondo, o transporte de finos y gruesos, obteniéndose la siguiente formulación lineal.

$$Q_{ss} = 5,74 \cdot Q_{sf} + 1014,4$$

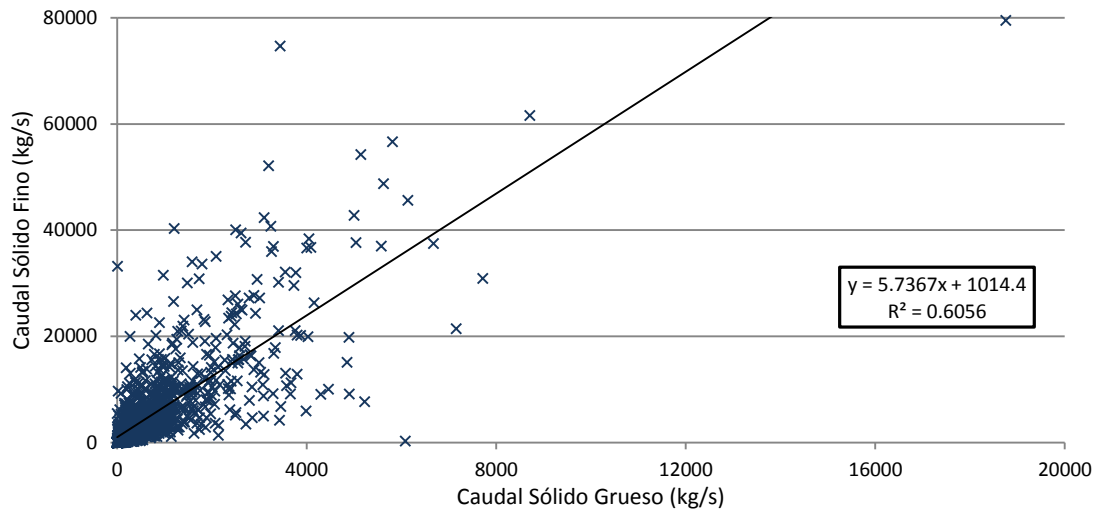


Figura 285.- Relación entre caudal sólido grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).

En la Figura 286 se presentan las relaciones entre caudal de material en suspensión y de fondo vs caudal líquido y en la Figura 287 la relación con el caudal sólido total.

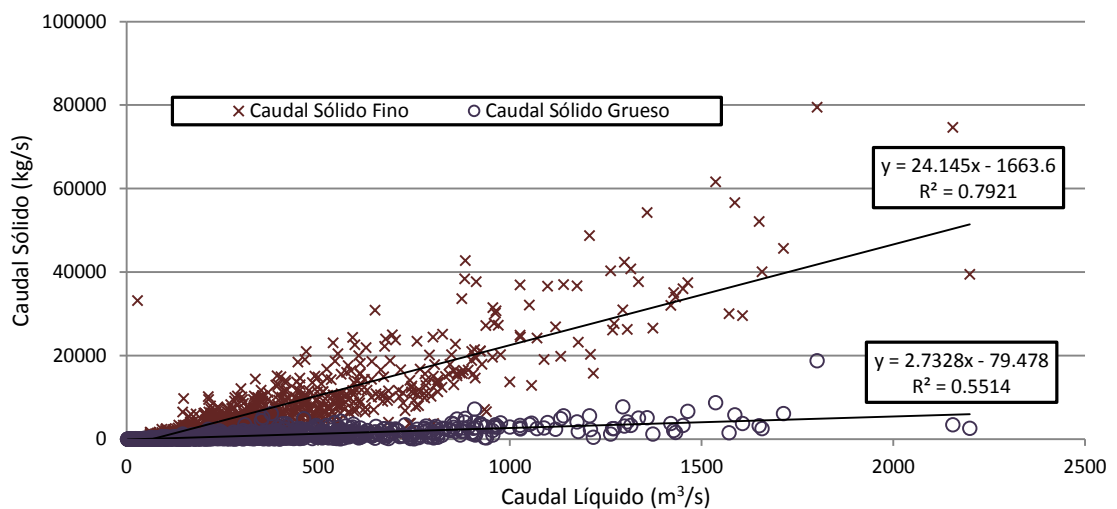
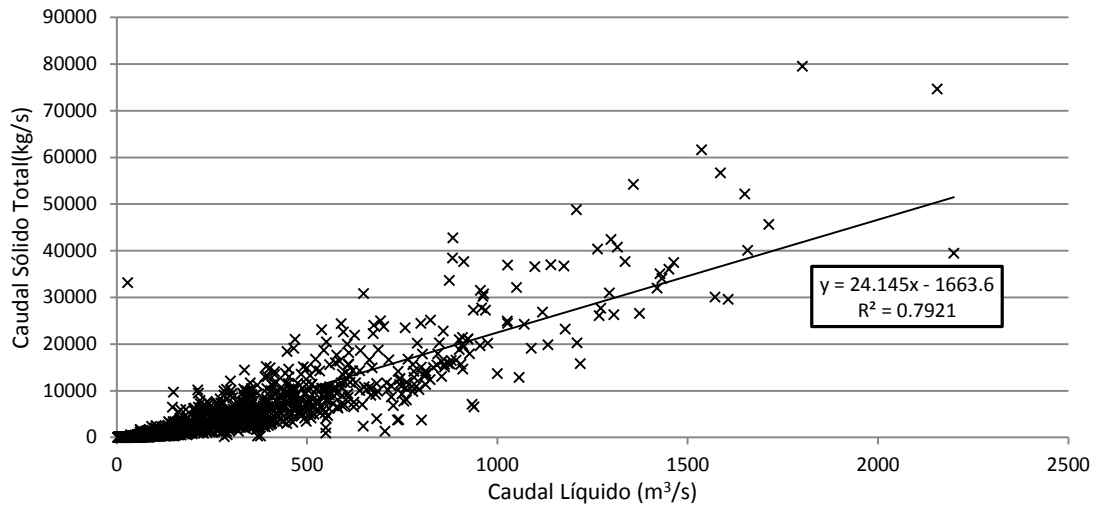


Figura 286.- Relación entre caudal líquido y caudales sólidos grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).



**Figura 287.-** Relación entre caudal líquido y caudal sólido total (serie 1993-2014).