

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSE, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

**EL USO DE INFORMACIÓN GLOBAL E IMÁGEN SATELITAL PARA LA
SIMULACIÓN DE HUMEDALES (BAÑADO LA ESTRELLA)**

Jorge Collins (1,3), Carlos Paoli (1,3), Álvaro Soldano (2), Norma Piccoli (1,3)

(1) Centro Regional Litoral – Instituto Nacional del Agua
P. Cullen 6161. 3000 Santa Fe Argentina Te: (054) 0342 4605910
(2) Centro de Información Hidrológica – Instituto Nacional del Agua
Ezeiza. Buenos Aires. Te: (054) 011 4480 4500

(3) Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral
Ciudad Universitaria Pje El Pozo. 3000 Santa Fe Argentina Te: (054) 0342 4575245
collinsjorge@arnet.com.ar, cpaoli@ciudad.com.ar

RESUMEN

Muchos ríos de llanura se desbordan e ingresan en humedales formando un sistema hidrológico independiente, que en muchas ocasiones, necesitan delimitar su extensión a fin de administrar y legislar sobre el uso del suelo, del agua y de las actividades productivas.

Se analiza un humedal denominado Bañado La Estrella (Argentina) de unos 10.000Km² aproximadamente y constituye una importante reserva hidroambiental que se inicia con los desbordes del río Pilcomayo. Se ha simulado su comportamiento para definir los límites más frecuentes que ocupan las crecidas frecuentes para definir su extensión. Debido a la complejidad física del sistema, se emplearon herramientas hidrológicas, de modelación hidrodinámica y de procesamiento y análisis de imágenes satelitales combinados entre sí para representar las avenidas ocurridas y establecer su extensión areal, como así también proveer de información a las autoridades gubernamentales. Se describe una metodología y criterios empleados para la elaboración de la línea de inundación frecuente.

ABSTRACT

Many plain rivers overflow and enter wetlands forming an independent hydrological system, which in many occasions, need to delimit its extension to manage and to legislate on the use of the soil, water and productive activities.

The wetland called Bañado La Estrella (Argentina) of about 10,000 Km² approximately is analyzed, establishing an important hydro-environmental reserve which starts with the overflow of the Pilcomayo River. His behavior has been simulated to define the most common limits dealing (extension) with frequent floods. Due to the physical complexity of the system hydrological and hydrodynamic models and the processing and analysis of satellite images tools were employed to represent the avenues and to establish its area extent, as well also provides information to government authorities. This article describes a methodology and criteria employed for the preparation of the frequent flood line.

PALABRAS CLAVES: Imágenes Satelitales; Modelación Matemática; Línea de Ribera

INTRODUCCIÓN

Desde ya larga data, el río Pilcomayo, en el tramo argentino – paraguayo se ha modificado por procesos de sedimentación de su cauce cuando se producen las crecidas periódicas anuales. Actualmente, las avenidas se desbordan e ingresan principalmente a dos humedales denominados Bañado La Estrella en territorio argentino (Prov. de Formosa) y Bañado Patiño en territorio paraguayo, generando dos sistemas hidrográficos independientes entre sí, en cada país. Para mantener activo cada sistema dentro de los períodos de estiaje, se construyó dos canales uno en territorio argentino y el otro en territorio paraguayo. El ingreso permanente sobre estas áreas, y en particular en el Bañado La Estrella, ha permitido mantener el sistema hidrográfico del centro norte de la provincia de Formosa.

En este estudio se hace referencia al Bañado La Estrella, constituyendo un humedal particular no convencional, con escasa información topográfica e hidrológica, Figura N° 1, que ingresa en el noroeste de la provincia de Formosa (Argentina) y finaliza en la ruta provincial N° 24, donde se inician los ríos y arroyos que forman parte de la red hidrográfica del centro norte de la provincia.



Figura 1.- Área de estudio

Es un área fluvio-lacustre, perteneciente a la subregión del Chaco semiárido y de transición. Forma un micro-clima propio, como una cuña subtropical en el oeste semiárido (Temp. media 23° C) y con una vegetación característica de las zonas subtropicales húmedas con bosques de alisos en bancos de arena o áreas de derrame fluvial. Presenta una escasa pendiente longitudinal.

El sistema hídrico Río Pilcomayo-Bañado La Estrella, se desarrolla en el sentido noroeste – sureste con una longitud de 430Km y un ancho aproximado de 20Km.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de la recopilación y un análisis de información del área de estudio, se dispuso la

siguiente información:

Imágenes-datos satelitales

Se utilizó escenas del sensor TM (Thematic Mapper) de la plataforma satelital LANDSAT y datos del sensor ETM (plataforma LANDSAT VII), desde el año 1997 al 2008, correspondiente a las siguientes escenas: PATH 229-ROW 076 (en número de 13), PATH 228-ROW 77 (en número de 15) y PATH 227-ROW 77 (en número de 14). En particular, un mosaico de 2 escenas del sensor SAR satelital ERS 2 de la ESA, de fecha 11 de abril de 2000.

Modelo digital de elevación

Se utilizó un modelo digital de elevación de la misión Shuttle Radar Topography Misión (SRTM) generado en la misión IFSAR (tecnología de interferometría de radar de apertura sintética) a bordo del trasbordador Space Shuttle. La captura de datos interferométricos se realizó entre el 11 y el 22 de febrero de 2000. Dicho modelo tiene un píxel de 90m con un error en posición de un píxel y un error en altura de 16m.

Información hidrométrica y pluviométrica

Se utilizó información pluviométrica e hidrométrica detallada a continuación:

Estación pluviométrica de Fortín Soledad: Precipitaciones diarias. Registros Discontinuos.

Estación Hidrométrica La Paz: Datos de niveles y caudales diarios.

Estación limnimétrica de Fortín Soledad, Punta del Agua y ruta provincial N° 28: Datos de niveles diarios. Registros discontinuos.

Se aplicó una metodología que permitió utilizar la información satelital disponible y la escasa información topográfica e hidrométrica existente, formando dos líneas de trabajo.

La primera, correspondió a un procesamiento de imágenes satelitales para establecer un análisis de frecuencias de ocupación de espacios de agua y para la generación de perfiles transversales “teóricos” que serán utilizados en la modelación matemática.

La segunda, consistió en una modelación matemática de las crecidas que ocurrieron en el bañado a partir del transporte de los desbordes del río Pilcomayo, utilizando el modelo HEC RAS (EEUU).

De los resultados obtenidos de la propagación de las crecidas y de los espacios de ocupación de agua, se desprendió la definición de los límites de inundación del bañado y su extensión.

En la primera fase, a partir de imágenes satelitales disponibles se realizó un preprocesamiento de cada imagen para someterlas a una corrección geográfica, radiométrica (conversión de los datos crudos del sensor en valores de radiancia) y a una corrección atmosférica (eliminación de los efectos de la atmósfera (reflectividad nula)). Luego se realizó una clasificación espectral donde se seleccionaron los atributos de clasificación de cada píxel que representará las áreas cubiertas por agua, por lo tanto el esquema de clases se reduce a un archivo que contiene para cada “PATH-ROW” y fecha analizada, una clasificación de “agua y no agua”, condicionada por la vegetación chaqueña acuática y palustre sobre los posibles “espejos de agua” del bañado.

Se formó un mapa de frecuencia a partir de las capturas disponibles y se procedió a guardar como imagen, cada clasificación donde consta de un esquema de dos clases, donde los píxeles detectados como pertenecientes a clase agua se les dio un color particular y la que no corresponde de otro color. El análisis se redujo a una sola dimensión, con una matriz binaria para cada fecha, obteniendo el cociente de la sumatoria de las matrices binarias y el número de las mismas, y se obtuvo la frecuencia observada de pertenencia a clase agua, Figura N° 2.

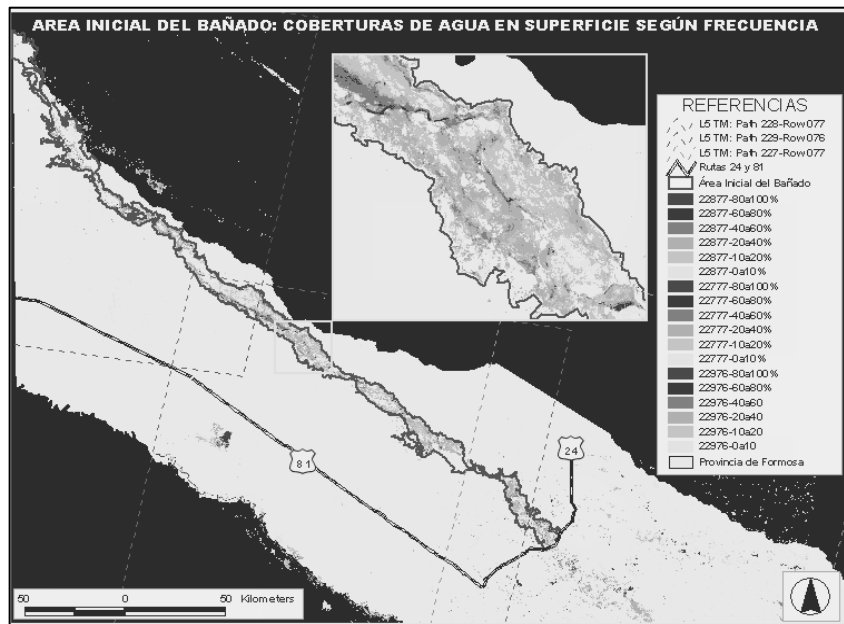


Figura 2.- Mapa de Frecuencias

En un análisis posterior se realiza una limpieza aplicando el método de un “Filtro de Mayoría/Minoría”, donde la clase correspondiente de cada píxel central, en la ventana móvil será determinado por mayoría, mientras que la “minoría” pertenecerá al “ruido” que se quiere eliminar.

Modelo Digital de Elevación

Se utilizó el modelo digital de elevación SRTM 2000 para analizar el relieve, las diferencias planialtimétricas relativas, las pendientes límites y los perfiles longitudinal y transversales del humedal. Se realizó su exportación al formato GRID (raster) para su análisis bidimensional y generar imágenes altimétricas de relieve, Figura N° 3.

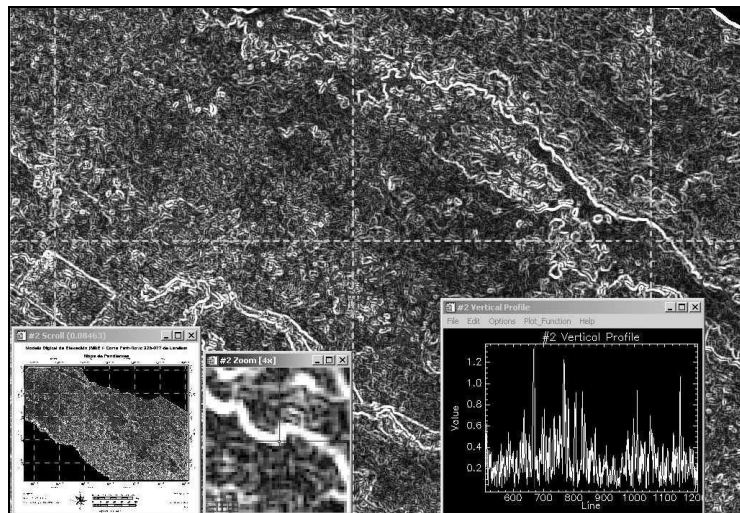


Figura 3.- Modelo digital de elevación y constitución de un perfil transversal

A partir del Mapa de Frecuencia del Agua en Superficie, se trazó una línea límite que constituye el Área Inicial del Humedal y una línea media que representa la dirección preponderante de escurrimiento, denominada “Línea Media Longitudinal” (LML) de aproximadamente 415Km. A partir de esta LML se trazaron líneas perpendiculares a la misma, de 50Km de longitud promedio, equidistante 10Km, trazándose un total de 42 transectas. Los perfiles fueron de utilidad para la delimitación más precisa del límite del bañado, al evaluar los saltos de pendiente topográfica que lo enmarcan, y por el otro, para la modelación hidrodinámica de los caudales que se desbordan del río Pilcomayo y que escurren por el Humedal, Figura N° 4.

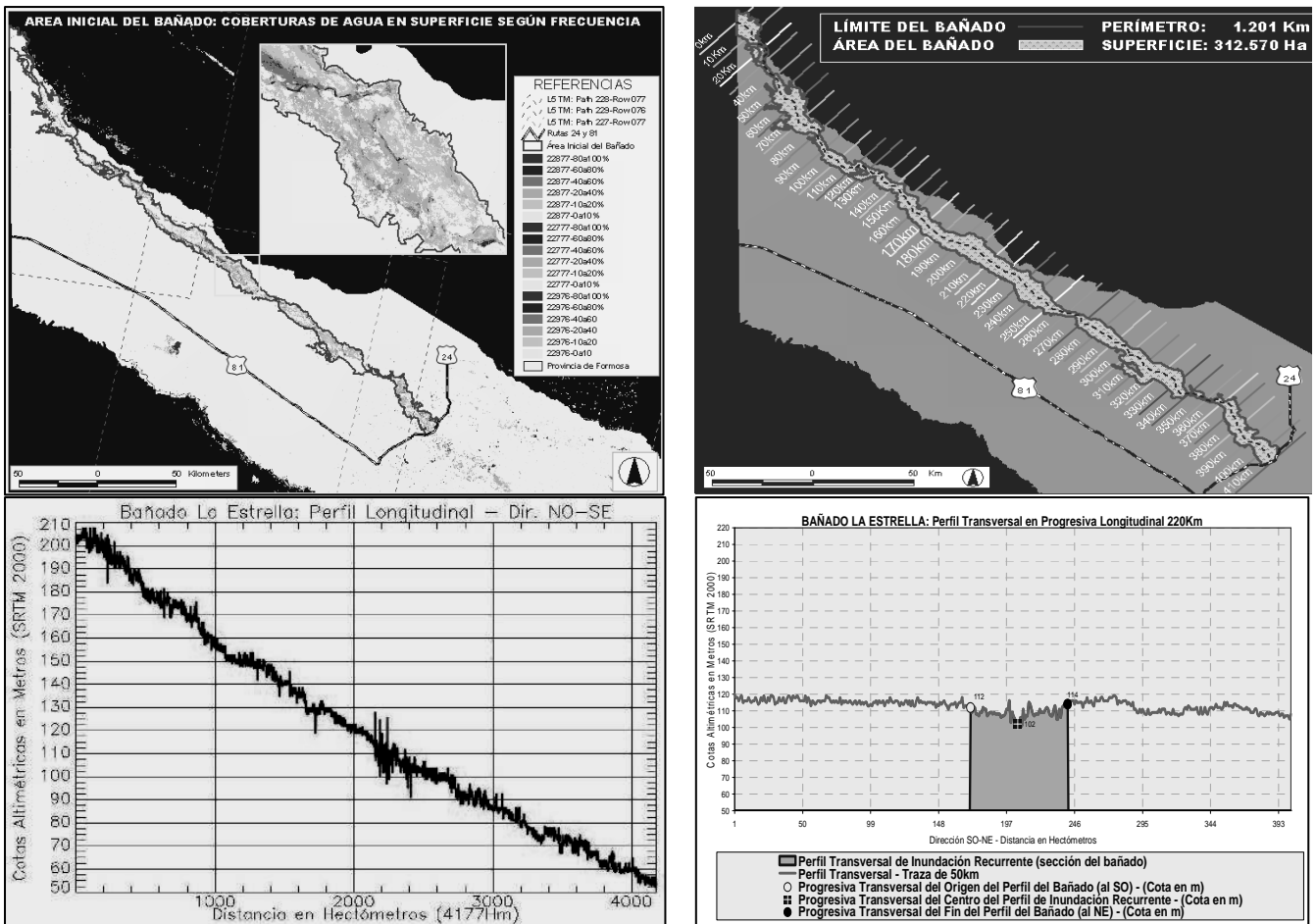


Figura 4.- Área Inicial del Humedal, Perfil Transversal y Perfil Longitudinal

La segunda fase consistió en la aplicación de un modelo matemático para representar las crecidas que transitan por el mismo. La forma del humedal se representó en forma unidimensional con los perfiles transversales de aproximadamente 50Km de ancho obtenidos del modelo digital de terreno. Se representó la zona principal de conducción, coincidente con las líneas de inundación frecuente. Cada perfil transversal tiene puntos acotados cada 100m, Figura N° 5. El coeficiente de rugosidad de Manning estimado fue de 0.25 en el cauce y 0.35 en la zona de valle.

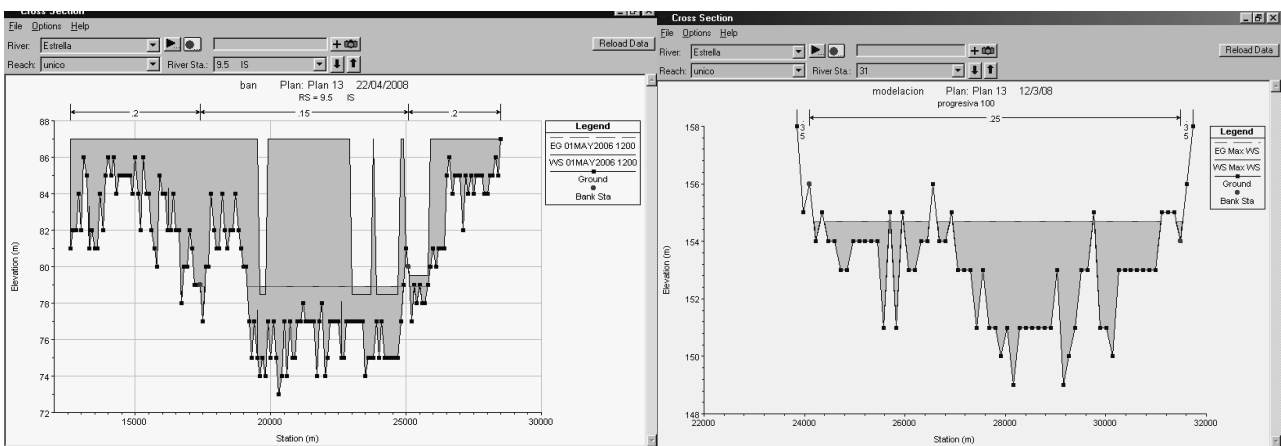


Figura 5.- Perfiles transversales reconstituidos por el modelo digital de elevación

Se modeló las crecidas de los años 2006, 2007 y 2008, ingresando aguas arriba los hidrogramas observados en la estación Misión La Paz, Figura N° 6 y aguas abajo, los niveles medidos en la ruta provincial N° 28 como configuración de la forma de la crecida, trasladados a aguas abajo de la ruta provincial N° 24. Cada uno de los años mencionados presentó dos

hidrogramas de importancia, donde se determinó los anchos inundados en cada caso. Durante el tránsito de las crecidas se producen los períodos de precipitación que incrementa el volumen de aporte directo al escurrimiento. Se ha agregado a cada una de las crecidas, el volumen en exceso obtenido a partir de un balance hídrico de Thornthwaite.

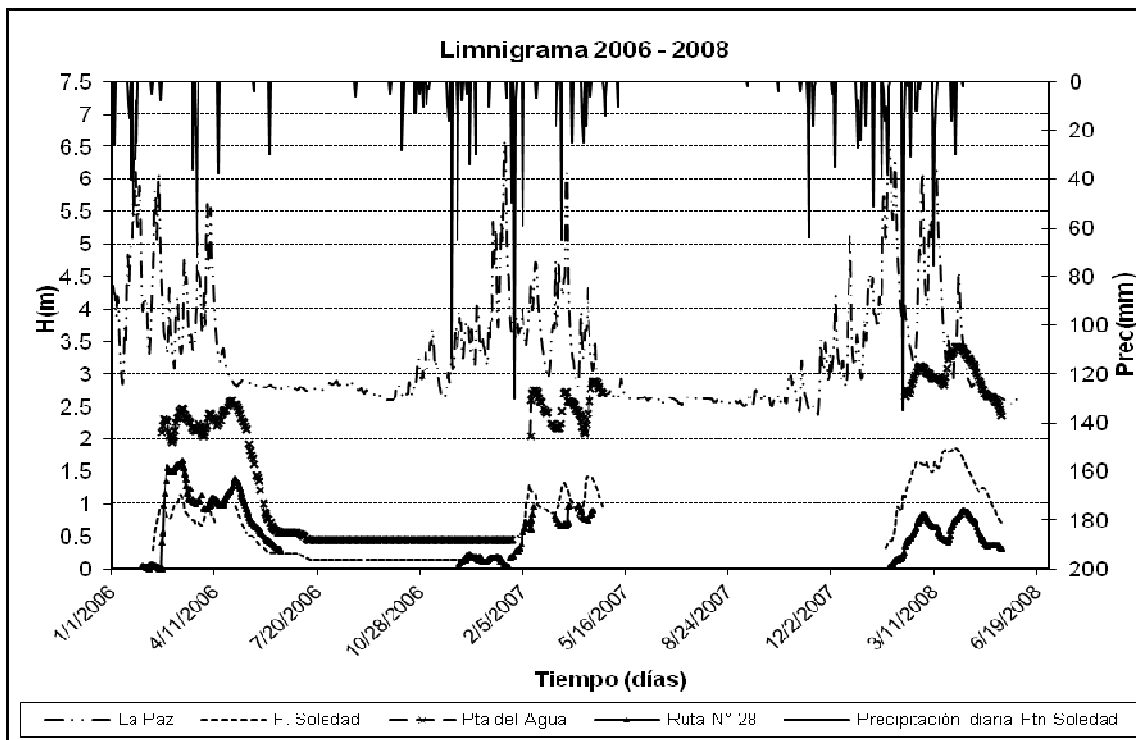
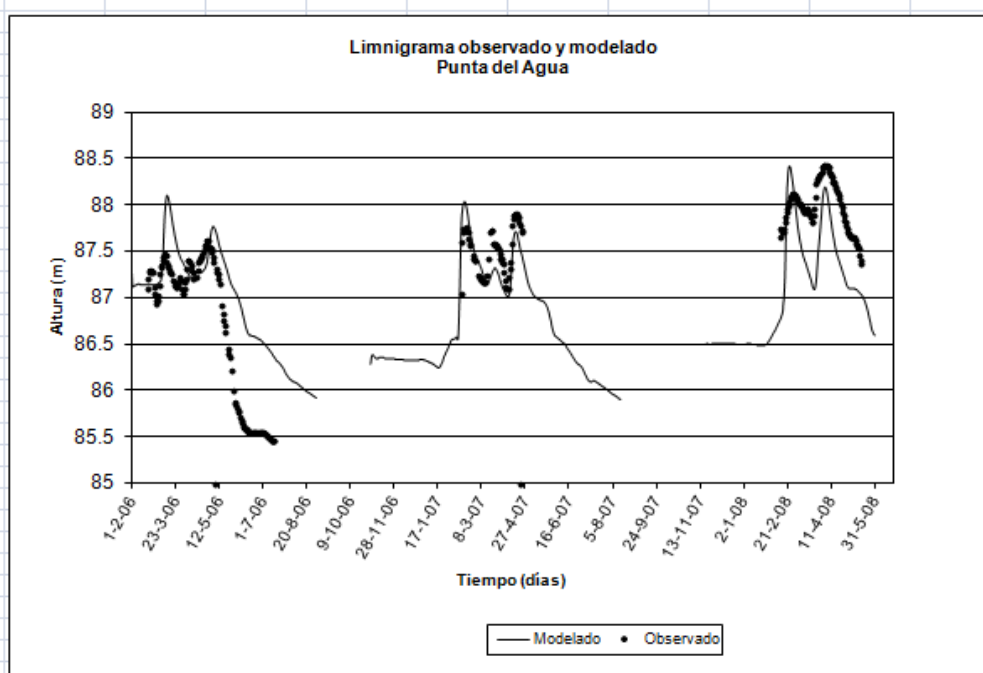


Figura 6.- Limnigramas de las crecidas 2008-2008

AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

El ajuste del modelo se realizó teniendo en cuenta los tiempos de traslados entre las diferentes secciones hidrométricas, Tabla N° 1 y las formas de los limnigramas e hidrograma, Figura N° 7.



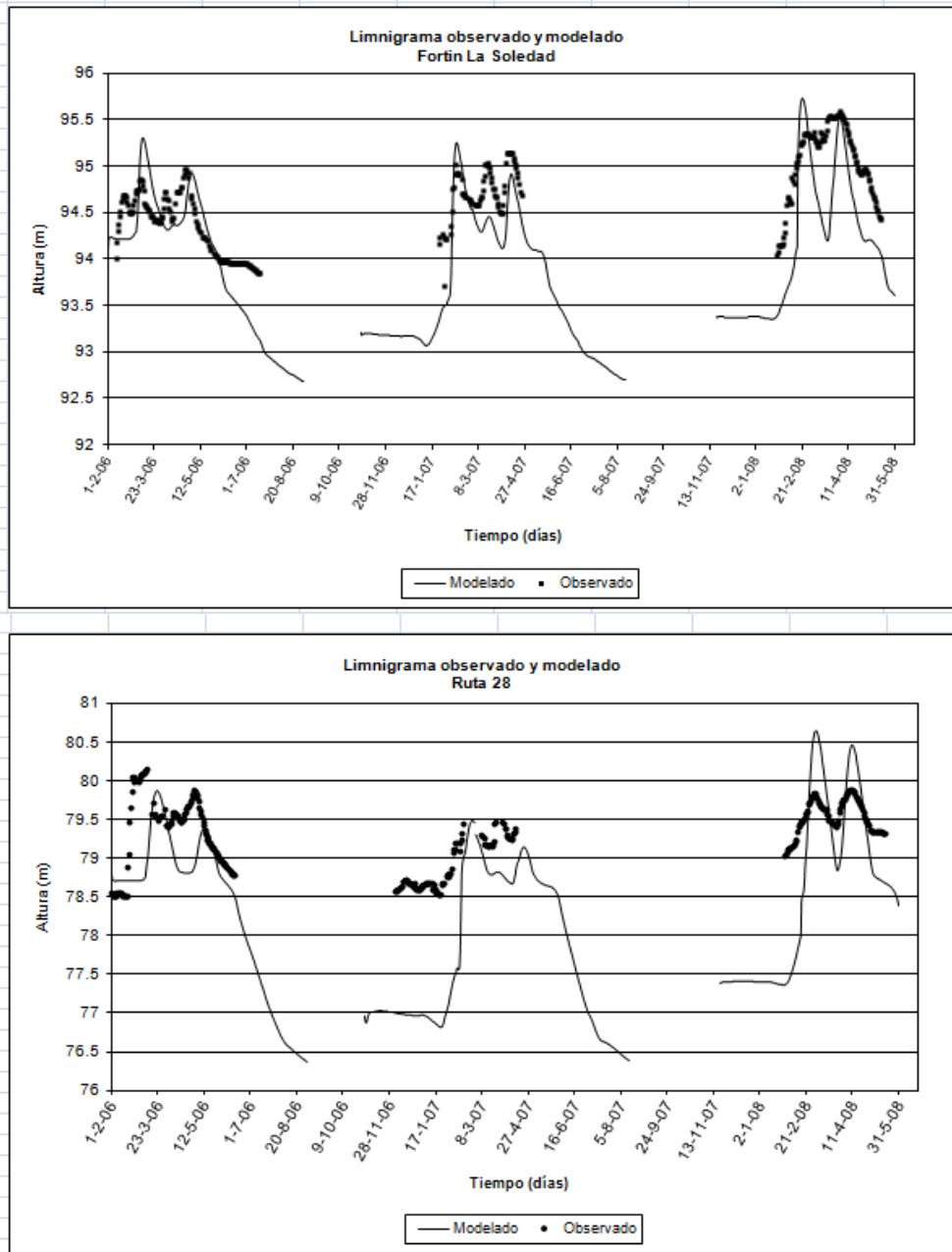


Figura 7.- Ajuste de las formas de los limnigramas

Los tiempos de traslados corresponden a:

Tabla 1.- Tiempos de traslados

Tiempos de traslados (días)	2006		2007		2008	
	1° C ¹	2° C ²	1° C ¹	2° C ²	1° C ¹	2° C ²
La Paz- Fortín Soledad	25	20	25	24	27	20
La Paz- Punta del Agua	30	22	30	29	31	22
La Paz- Ruta Prov. N° 28	34	26			34	26

- 1- Primera crecida del año calendario
- 2- Segunda crecida del año calendario

Puede observarse claramente una disminución de los tiempos de traslados entre la primera y segunda crecida en las secciones de control, a partir de una disminución de la rugosidad.

RESULTADO. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE FINAL DEL HUMEDAL

La línea perimetral del Área Final obtenida constituye el límite buscado, que denominamos “Límite del Bañado La Estrella” (LBLE), obtenido por el espacio ocupado por el agua en cada perfil obtenido de la modelación matemática consensuado con el límite definido por el análisis de frecuencias de ocupación del agua. En el siguiente esquema se observa el recorrido realizado hasta llegar a la definición del límite, Figura N° 8.

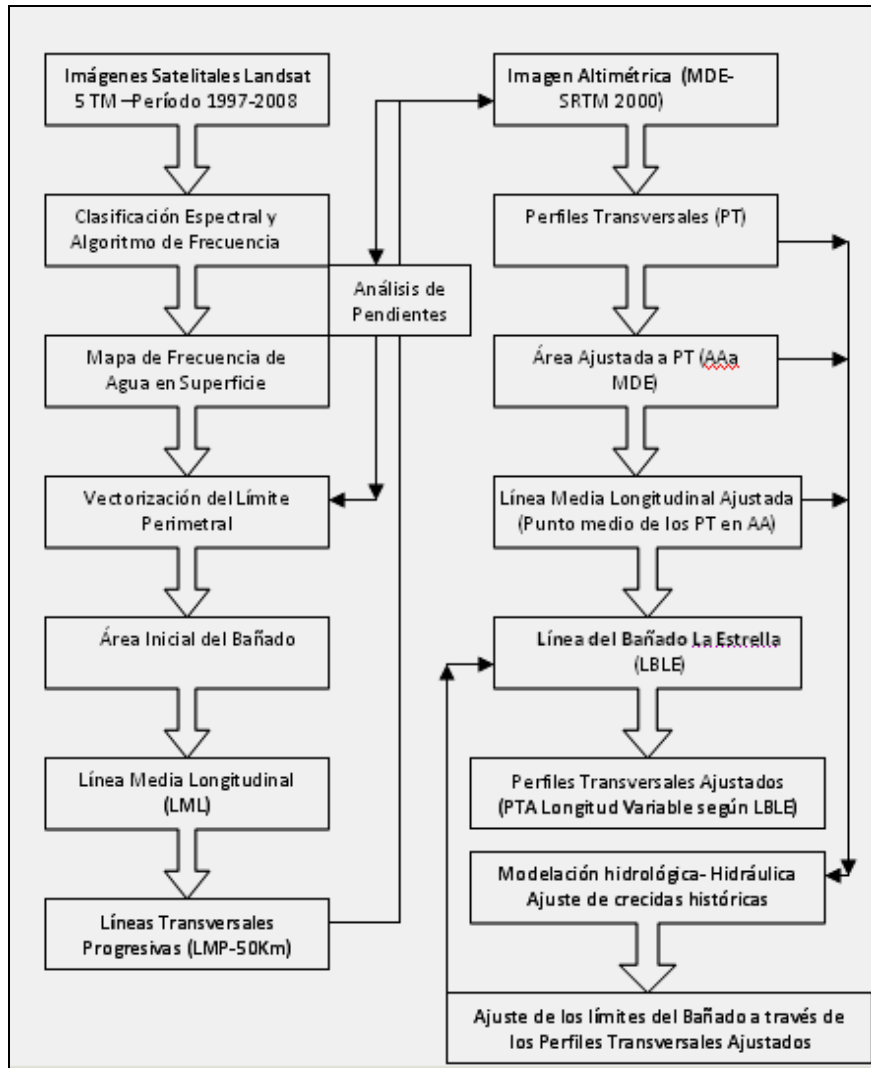


Figura 8.- Esquemas de pasos seguidos para la definición del límite del Bañado La Estrella

Finalmente, se marcaron dos curvas que representan una el Límite del Bañado La Estrella donde se produce principalmente la conducción de las crecidas originadas por el desborde del río Pilcomayo y otra, un Límite Asociado de Inundación que engloba la zona mencionada, mas la inclusión de zonas que presentan anegamientos frecuentes producidos por precipitaciones o por desbordes del cauce principal. En la Figura N° 9 se observa una de las cartografías realizadas de una porción del humedal.

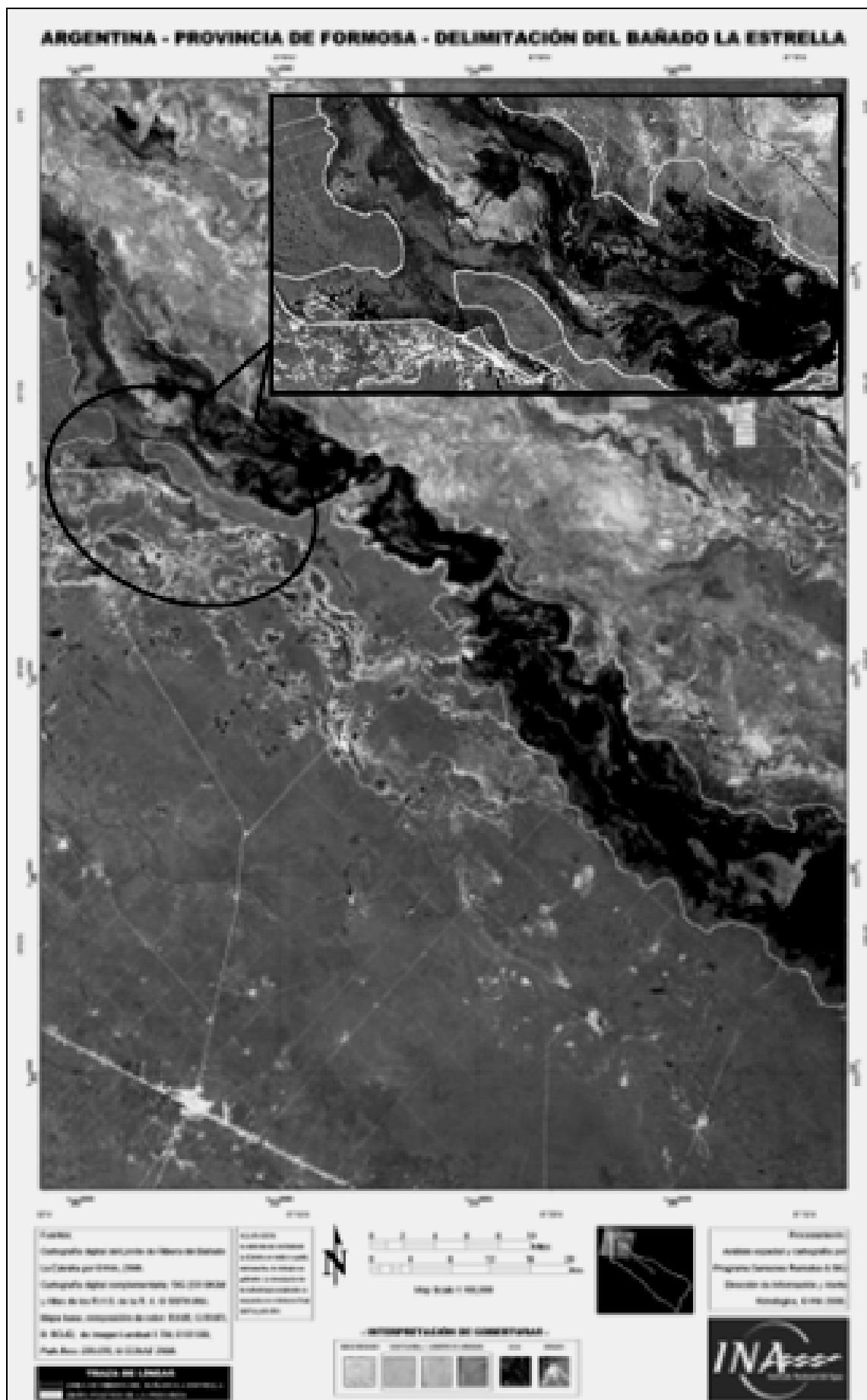


Figura 9.- Cartografía del Bañado La Estrella (Humedal)

CONCLUSIONES

- La clasificación de agua en superficie se realizó en base a una técnica de procesamiento denominada “híbrida” que se mejoró mediante la utilización de una imagen auxiliar, denominada “NDXI”, compuesta por índices espectrales.
- El modelo digital de elevación, SRTM, presenta errores en el posicionamiento tanto en el plano horizontal como en el vertical (NASA).
- La incertidumbre en su determinación rigurosa radica en ser un paisaje que presenta modificaciones del relieve producto de procesos de erosión y de sedimentación dinámicos, a una vasta cobertura vegetal y a un micro-relieve de muy difícil representación.
- El mapa de Frecuencia de Agua en Superficie elaborado para una serie histórica de datos satelitales, temporalmente densa y espacialmente extensa, pone en evidencia la presencia de un área anegada correspondiente a una situación hidrológica “normal” del bañado que fue registrada en el periodo analizado.
- Se puede apreciar la existencia de un límite generado por el traslado de la crecida proveniente del desborde del río Pilcomayo obtenida a partir de la modelación matemática y de un límite del bañado que involucra no solo la crecida mencionada sino también las áreas anegadas por precipitaciones en la zona, antes o durante el paso de la crecida, que es captada por la imagen satelital como zona con anegamientos frecuentes.
- Los coeficientes de rugosidad y los tiempos de traslados entre secciones variarán de acuerdo a la duración de la crecida y al tiempo que antecedió la crecida previa. Los coeficientes de rugosidad del bañado se relacionan con valores altos del coeficiente de Manning y con pequeños desvíos en función del tipo de vegetación. Debido a la micro-topografía y vegetación, la resistencia al flujo variará con la altura y la velocidad de la corriente.
- No puede considerarse los resultados altimétricos de la modelación hidrodinámica en forma absoluta, sino se refiere a resultados relacionados con los perfiles transversales obtenidos del modelo digital de elevación con alturas relativas
- El límite final del Bañado se obtuvo a partir de la interrelación entre los tres análisis realizados: el de frecuencia de áreas con cubrimiento de agua superficial obtenida de imágenes seriadas, el altimétrico a partir del Modelo Digital del Terreno y el de la modelación hidrológica-hidráulica.

BIBLIOGRAFIA

Collins, Jorge et alli, 2008. *Delimitación del Bañado La Estrella (Prov. de Formosa). Informe Final. Convenio UPCA –INA.*

J. K. Lee, 2000. “*Proyecto Sofía*”. US Geological Survey.

US Army Corps of Engineers, 2006. *Hec-Ras River Analysis System. Versión 4.0 Beta. Davis.*