



PROGRAMA PARAGUAYO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA



Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

**Fomento a la Investigación Científica
Fondos Concursables de Proyectos de I+D**

INFORME DE AVANCE

**DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE
PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY
”**

14-INV-280

De 1/10/2016 a 30/03/2017

INFORME DE AVANCE TÉCNICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

A DATOS GENERALES

A.1 Institución proponente			
a) Datos de la Institución (universidad, centro académico, instituto o centro de investigación, organismo gubernamental o no gubernamental, público o privado)			
Nombre de la Institución:	Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción –www.uc.edu.py		
Facultad/departamento	Centro de Tecnología Apropiada (CTA) – Facultad de Ciencias y Tecnología		
Institución pública		Institución privada	x
Dirección:	Cantaluppi y G. Molinas – Campus Santa Librada	Ciudad:	Asunción
Teléfono:	021 311820 – 021 334650	E-mail:	Roger.monte-domecq@uc.edu.py
b) Proyecto de Investigación			
Modalidad:	Proyecto de Investigación Institucional		
Título del Proyecto:	Desarrollo de un sistema de pronósticos de niveles y caudales del río Paraguay		
Código del Proyecto:	14-INV-280		
Área de la Ciencia:	Ingeniería y tecnologías		
Meta Mínima:	Pronostico de Niveles y Caudales del río Paraguay hasta 60 90 días		
Responsable Técnico	Ing. Civil Roger Monte Domecq Serrati		

B. DATOS DE DESARROLLO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

B1. Objetivos, indicadores y medios de verificación

Objetivos General y específicos	Indicador verificable de cumplimiento ¹	Medio de Verificación ²	Observaciones
<p><u>Principal</u> Desarrollar e implementar un sistema de pronóstico operativo del río Paraguay.</p> <p><u>Específicos</u> P1 - Revisión de metodologías existentes</p> <p>P2 - Sistematización de datos para el sistema de pronóstico hidrológico</p> <p>P3. Trabajo de campo: automatización de 2 estaciones hidrométricas existentes y realización de mediciones de caudal río Paraguay en Asunción</p> <p>P4 Desarrollo del sistema de pronósticos hidrológicos</p> <p>P.5 Programa de difusión en el portal web y su utilización</p> <p>P6 Gestión del proyecto</p>	<p><i>Sistema de pronóstico de niveles y caudales implementado</i></p> <p>Documento de revisión de metodologías existentes</p> <p>Base de datos hidrométrica publicada en la web</p> <p>Informe de resultados, medible en % de cumplimiento</p> <p>Sistema de pronóstico calibrado y validado</p> <p>Información accesible en la web, demostrable</p> <p>Informes y reportes entregados a conacyt</p>	<p><i>Sistema de pronóstico implementado y calibrado</i></p> <p>Informe</p> <p>Base de datos de las 10 estaciones hidrométricas (archivos) Reporte sistematizado de las 10 estaciones hidrométricas</p> <p>Informe documentado de estaciones hidrométricas adecuadas, con datos de los equipos instalados. Reporte los trabajos de medición de caudales medidos en el río Paraguay. Memoria de las estaciones e Inspección técnica de equipos instalados</p> <p>informe técnico con resultado de los pronósticos hidrológicos</p> <p>Proyecto difundido en el portal web.</p> <p>Informes generados en las distintas etapas del proyecto. Contratos de investigadores Reportes de avances de los resultados</p>	

¹ Indicador verificable de cumplimiento: Es la expresión cuantitativa que permite predecir o evaluar el grado de cumplimiento de objetivos y/o logro de resultados. Se puede medir en cantidades o porcentajes para permitir comparaciones.

² Medio de Verificación: Es la fuente de información a través de la cual se acredita el cumplimiento de objetivos y/o logro de resultados. Incluye material publicado, inspección visual, encuestas, registros de información, reportes estadísticos, entre otros.

B.2. Resultados esperados

Describir los resultados que se esperan obtener con el desarrollo del Proyecto de Investigación, especificando indicadores para evaluación de éxito y objetivo específico que se ha cumplido en el semestre, con cada uno de los resultados. Los resultados deben estar claramente relacionados con los productos esperados indicados en el plan General de Trabajo.

Resultados esperados	Observaciones
1) Sistema de pronóstico de niveles y caudales del río Paraguay a 60 - 90 días implementado.	Meta mínima es a 15 días
2) Publicación sobre la Caracterización de las inundaciones y estiajes del río Paraguay	En el segundo semestre se iniciara esta actividad, actualmente en fase de recopilación, con los investigadores del proyecto e invitados
3) Base de datos hidrológico del río Paraguay implementado	En construcción, será disponibilizado en la universidad en una computadora y parte de los datos via portalweb
4) Portalweb del Sistema de Pronósticos del río Paraguay	Existe un portal que será adecuado para el proyecto en el tercer semestre
5) Dos estudiantes de la FCyT capacitados para operar el sistema de pronostico	Ya cuenta en el equipo con un ing. Junior recién recibido y una estudiante desarrollando su tesis de grado de ing. Ambiental con el proyecto, ambos contratados.

C. MARCO CONCEPTUAL Y METODOLÓGICO³

Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
1	Contratación de Recursos Humanos	Contratos firmados	Facturas mensuales. Los contratados entregaran informes de forma bi-mensual al responsable técnico del proyecto. Estos informes serán adjuntados como anexos a las presentaciones hechas al CONACyT.	No conseguir técnicos capacitados para cubrir puestos que requiera el proyecto	100%	Contratación del Investigador principal:- Roger Monte Domecq. Contración de dos co-investigadores:- Julián Báez y José Luis Ávila Contratación de un Ing. Asesor del Proyecto (octubre)-Roberto Takahashi. Contratación de un Ing. Como Investigador Junior (octubre):-Alberto Grisetti Contratación de una pasante en el mes de febrero:-Rosa Aseretto
2	Compra de computadoras tipo "laptop" y de escritorio para almacenar y procesar datos hidrométricos y de precipitaciones	Comprobante de venta	Comprobante de venta a nombre de la UCA	No conseguir una computadora al precio establecido	100%	Compra realizada en el mes de febrero. Se adquirió dos equipos informáticos. Una laptop y una computadora de escritorio

Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
P1	Revisión de metodologías existentes	revisión de 3 (tres) Métodos de pronósticos hidrológicos	Documento de cada uno de los métodos/modelos revisados que son: a) modelos de propagación que simulan el río y se utilizan los niveles y los caudales. b) modelos de transformación lluvia a caudal, que se simula a partir de la precipitación c) los modelos precipitación caudal con propagación en ríos, que simulan el río y las sub cuencas de aporte.	no-disponibilidad en tiempo de la información. recursos humanos necesarios	100%	Revisión de literatura
P2	Sistematización de datos para el sistema de pronóstico hidrológico	Datos hidrométricos sistematizados de 9 (nueve) estaciones hidrométricas del río Paraguay	Base de datos de las 9 estaciones hidrométricas (archivos) Reporte sistematizado de las 9 estaciones hidrométricas	Ausencia de los datos en las estaciones referenciales	50%	Análisis de consistencia de datos en proceso para varias estaciones

D. TRABAJO DE CAMPO⁵

Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
P3.1	Automatización de datos	Automatización de 2 de 3 estaciones hidrométricas existentes	Informe documentado de estaciones hidrométricas adecuadas, con datos de los equipos instalados. Reporte los trabajos de medición de caudales medidos en el río Paraguay Memoria fotográfica de las estaciones automatizadas. Inspección técnica por parte de los evaluadores (CONACYT) de los equipos instalados.	Debilidad en la comunicación (acuerdos) con las instituciones propietarias de los sitios donde se ubican las estaciones	0%	En preparación, para ejecutarse en segundo semestre 2017

P3.2	Medición de caudales	Mediciones de caudal en Asunción.	Informe documentado de estaciones hidrométricas adecuadas, con datos de los equipos instalados. Reporte los trabajos de medición de caudales medidos en el río Paraguay Memoria fotográfica de las estaciones automatizadas. Inspección técnica por parte de los evaluadores (CONACYT) de los equipos instalados.	Debilidad en la comunicación (acuerdos) con las instituciones propietarias de los sitios donde se ubican las estaciones	0%	En preparación, para ejecutarse en segundo semestre 2017
------	----------------------	-----------------------------------	---	---	----	--

³ Fase de planificación para la puesta en marcha del proyecto.

⁴ Nivel de actividad acorde a lo presentado en el Plan General de Trabajo del SPI.

⁵ Fase de elaboración y utilización de instrumentos para el relevamiento de datos.

Nivel de productividad de los investigadores desde el inicio del proyecto de investigación

Nombre y apellido del investigador	Producción (libro, capítulo de libro, artículo, producción técnica/tecnológica, etc.) relacionado al proyecto	Año
N/A	N/A	N/A

E. ANÁLISIS DE RESULTADOS⁴

Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
	Servicio de mediciones de caudales río Paraguay en asunción con capacitación	Tres mediciones de caudales. Tres técnicos capacitados en la medición de caudales (investigadores Juniors e instituciones con quienes se vinculara al proyecto)	Reporte de las mediciones de caudal Material didáctico de capacitación para medición de caudales Reporte de la capacitación Memoria fotográfica	Débil compromiso de las personas capacitadas.	0%	Previsto a realizarse en el segundo semestre de 2017
	Automatización para visualización de datos de estaciones hidrométricas existentes	Visualización de los datos medidos en el portal web del CTA/UCA, en tiempo real.	Diseño de la estación hidrométrica en el portal del CTA/UCA (http://cta.uca.edu.py) Estación instalada y en funcionamiento en el portal web del CTA/UCA Sección web de datos en la plataforma virtual del CTA/UCA en funcionamiento.	Inaccesibilidad de datos monitoreados por internet.	20%	En trámite de adquisición. Se cuenta con especificaciones técnicas. (Anexo 3)

P4	Desarrollo del sistema de pronósticos hidrológicos	sistema de pronóstico hidrológico implementado y calibrado	informe técnico con resultado de los pronósticos hidrológicos	calibración no refleja resultados aceptables	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017
P4.1	Implementación de los modelos hidrológicos seleccionados	1 modelo estocástico y 1 modelo dinámico implementado	Documento de resultado del modelo estocástico implementado Documento de resultado del modelo dinámico implementado Resumen de ambos modelos implementados, sus resultados y sus aplicaciones.	Los datos utilizados no reflejan la realidad.	20%	Modelo en construcción. Procesamiento de los datos de entrada y caracterización mediofísica de las cuencas. (Anexo 4)
P4.2	Calibración y Validación del sistema de pronóstico	Sistema de pronóstico hidrológico calibrado y validado	Reporte comparativo entre los datos reales y los generados con el sistema de pronóstico.	La calibración del sistema de pronóstico no refleja el 70% de los valores medidos en un rango +-25 cm.	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017

P5	Programa de difusión en el portal web y su utilización	Estrategia de comunicación para difusión del programa (dar a conocer) para ser vehiculado en el portal web, dentro y fuera de la Universidad. Instalación del proyecto en el portal web del CTA/UCA.	Proyecto difundido en el portal web. Portal web publicado en la web del CTA/UCA. Documentación Fotográfica y visibilidad del proyecto en la web del CTA/UCA.	No existen factores de riesgos para esta actividad	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017
P5.1	talleres de modelos hidrológicos utilizados	2 Talleres / reuniones técnicas de capacitación de desarrollo de modelos hidrológicos 1 taller final de difusión de resultados del proyecto.	Plan de capacitación para desarrollo de modelos hidrológicos Planilla de asistencia de participantes en los cursos Memoria fotográfica Reporte de capacitación Grilla de instituciones participantes en el taller final Sistematización del Taller Memoria fotográfica.	Débil interés de los actores/instituciones para participar de estos eventos	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017

P.52	Adecuación del portal web http://capwem.uca.edu.py/ , para el proyecto	Portal web implementado y operativo, vinculado al CTA/UCA.	Instalar una nueva sección dentro del portal web del CTA/UCA con referencia al proyecto/datos de los niveles de agua/pronósticos y avances y resultados del proyecto. Implementación y funcionamiento del portal web Dirección de la plataforma web.	El riesgo podría ser que la plataforma no esté funcionando dinámicamente.	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017
------	--	--	---	---	----	---

⁴ El **análisis de datos y resultados** es un proceso de inspeccionar, limpiar y transformar datos con el objetivo de resaltar información útil, lo que sugiere conclusiones, y apoyo a la toma de decisiones

F. GESTIÓN DE PROYECTO*						
Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
P6	Gestión del proyecto	Monitoreo y seguimiento de la correcta ejecución del proyecto, tanto en las tareas ejecutadas como los plazos de ejecución.	Diversos Informes generados en las distintas etapas del proyecto. Contratos de investigadores Reportes de avances de los resultados (productos esperados).	Dilación de plazos de adquisición, firmas de contratos de ejecución, firmas de convenios, etc.		

(*)Solo para aquellos casos que aplique

G. PRESENTACIÓN Y DIFUSIÓN DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Nivel PGT	Descripción de actividades	Indicadores	Medios de verificación	Riesgos	Grado de avance (en porcentaje)	Comentarios
1	Adecuación del portal web http://capwem.uca.edu.py/ , para el proyecto	Portal web implementado y operativo, vinculado al CTA/UCA.	<p>Instalar una nueva sección dentro del portal web del CTA/UCA con referencia al proyecto/datos de los niveles de agua/pronósticos y avances y resultados del proyecto.</p> <p>Implementación y funcionamiento del portal web Dirección de la plataforma web.</p>	El riesgo podría ser que la plataforma no esté funcionando dinámicamente.	0%	A iniciarse en el segundo semestre 2017

Nómina de espacios de divulgación organizados por la institución (anexar documentos, informes institucionales, publicaciones en prensa y registro on line de respaldo)	Fecha
N/A	N/A

Espacios de divulgación del conocimiento científico

Nómina de espacios de divulgación (jornadas, seminarios, eventos, otros) a los que asistieron los/as investigadores (anexar informes institucionales y afiches)	Institución organizadora	Fecha	Modalidad de participación de los investigadores: ponente, participante (adjuntar certificados si tienen)
N/A	N/A	N/A	N/A

Anexos: se pueden adjuntar anexos como respaldo de actividades realizadas: (Convenios y contratos - que no sean proveedores-, certificaciones, resoluciones de Instituciones involucradas en el proyecto de investigación, fotos, producción científica o proyección de la misma, actas de reuniones, materiales, etc.)

- **Anexo 1: Revisión de metodologías existentes**
 -
- **Anexo 2: Selección de un modelo estocástico y uno dinámico**
 -
- **Anexo 3: Sistematización de datos (reporte de avance)**
 -
- **Anexo 4: Datos de entrada al modelo, incluido suelos**
 -
- **Anexo 5: Informes de consultores**

Anexo 1: Revisión de metodologías existentes

1.1 Introducción

A fin de establecer y seleccionar la metodología adecuada para efectuar el sistema de pronóstico para determinar el comportamiento de las alturas hidrométricas y caudales en un punto determinado del río Paraguay es necesario identificar las herramientas disponibles para simular las condiciones del río y su cuenca hidrográfica con los datos disponibles aguas arriba del cauce.

A ese efecto se utilizan modelos matemáticos, a fin de representar el sistema hídrico en un lenguaje de fácil acceso y buscar respuestas para diferentes entradas, en este caso en un sistema natural.

El modelo por sí solo no es un objetivo, pero sí una herramienta para alcanzar el objetivo que es la previsión de una crecida o un estiaje a partir del comportamiento del clima y la respuesta de la cuenca ante entradas como la precipitación aguas arriba del punto estudiado. Evidentemente la limitación de un modelo se refiere a los datos de entrada al sistema en sus aspectos cuantitativos y cualitativos.

La utilización de modelos matemáticos para pronósticos hidrológicos fue ampliamente desarrollada en las últimas décadas gracias al desarrollo de los paquetes informáticos con fácil acceso, muchos de ellos en versión libre.

Los modelos se clasifican usualmente en físicos, analógicos y matemáticos. El modelo físico consiste en una representación de un sistema por un prototipo de escala menor (usualmente utilizados en centrales hidroeléctricas), los analógicos utilizan la analogía que rigen fenómenos físicos como los hidráulicos con circuitos eléctricos y los modelos matemáticos, llamados también digitales representan la naturaleza de un sistema a través de ecuaciones matemáticas.

Según Tucci (1998), en la Simulación, que es el proceso de utilización de un modelo, existen tres fases: (i) estimación o ajuste de parámetros, (ii) verificación, que es la simulación del modelo con los parámetros estimados y (iii) la previsión que es la simulación con los parámetros ajustados.

Los elementos claves para la estimación de los parámetros es función de la disponibilidad de datos históricos, mediciones de datos hidrológicos y características físicas del sistema.

En la fase de verificación, con el modelo calibrado inicialmente, es verificado con otros datos.

La previsión es entendida como la fase de la simulación donde el modelo, después de ajustado es verificado y es utilizado para representar la salida del sistema para situaciones desconocidas.

1.1.1 Clasificaciones de modelos de un sistema

Continuo y discreto: continuo cuando los fenómenos son continuos en el tiempo como la mayoría de los fenómenos hidrológicos y discretos cuando ocurren los cambios en intervalos discretos (que son las observaciones del fenómeno en tiempos específicos)

Concentrado y distribuido: es concentrado cuando no tiene en cuenta la variable espacial, como la precipitación media de una cuenca y distribuido cuando las variables dependen del espacio y o tiempo. En la práctica no existen modelos puramente distribuidos.

Estocástico y determinístico: si la probabilidad de ocurrencia se introduce en la formulación del modelo, este se define como estocástico, en cambio si no se considera la ley de probabilidades, el modelo se define como determinístico.

Conceptual y empírico: Un modelo se considera conceptual, cuando se toma en consideración los procesos físicos. Sin embargo cuando se toma en consideración solo los datos observados, se denominan empíricos, llamados usualmente cajas negras.

1.1.2 Ejemplos:

Los modelos de transformación de lluvia a caudal pueden ser determinísticos, empíricos y conceptuales. Los modelos hidrodinámicos en ríos son determinísticos. La generación de caudales utilizando la estadística hidrológica es estocásticos.

1.1.3 Modelos aplicados en monitoreo cuantitativo de ríos y cuencas hídricas

Se busca pronosticar la respuesta en un tramo de un río buscando reproducir el hidrograma en un sitio a partir de diferentes hidrogramas aguas arriba del mismo y las condiciones del cauce hídrico y la cuenca de aporte. Estos modelos son hidrodinámicos, basados en funciones empíricas y las ecuaciones de continuidad, a fin de representar el ciclo hidrológico. La principal dificultad hasta la fecha es la gran variabilidad espacial de la precipitación. Estos modelos se definen como semi-conceptuales ya que consideran aspectos conceptuales y ecuaciones empíricas.

1.2 Modelos Estocásticos

Un modelo de cuenca hídrica es un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico, con el objetivo de simular la conversión de la precipitación en escurrimiento. En principio, las técnicas de modelación de cuencas son aplicables a cuencas de cualquier tamaño, ya sean pequeñas (pocas hectáreas), de tamaño medio (cientos de kilómetros cuadrados) o grandes (miles de kilómetros cuadrados). En la práctica, sin embargo, las aplicaciones de la modelación son generalmente confinadas al análisis de cuencas para el cuales la descripción de variaciones espaciales temporales y/o variaciones espaciales de precipitación está garantizada.

Se reconocen distintos tipos generales de modelos matemáticos:

Determinísticos: son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descriptos por ecuaciones diferenciales. Es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos.

Probabilísticos: Un sistema se puede llamar probabilístico cuando, a igualdad de estado inicial, la respuesta ante una misma entrada es aleatorio; por lo tanto, para una misma entrada pueden obtenerse salidas diferentes, siguiendo una determinada distribución de probabilidades. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (a) estadísticos, y (b) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales, por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requiere invariablemente el uso de datos; los modelos

estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos. Se clasifican en independientes del espacio y correlacionados en él, de acuerdo con la influencia que las variables aleatorias tengan entre ellas en diferentes puntos del espacio. Un modelo independiente del tiempo representa una secuencia de eventos hidrológicos que no influyen entre sí, mientras que un modelo correlacionado en el tiempo representa una secuencia en la cual el evento siguiente está parcialmente influenciado por el evento anterior y posiblemente con otros.

Durante las últimas tres décadas, la teoría de la estadística, probabilidades y procesos estocásticos se ha utilizado con el objeto de tener una representación más adecuada de la variabilidad de los datos hidrológicos. Esta representación generalmente se hace mediante un modelo estocástico que describa todas las características de la serie histórica. La relevancia del uso de modelos estocásticos de series hidrológicas en el análisis de las obras hidráulicas que se proyectan, diseñan u operan, está en el hecho de poder estudiar las diferencias estructurales bajo diversas posibles condiciones hidrológicas que puedan presentarse durante el período de vida de las obras.

La figura 1 presenta la sección de un canal que se usa para representar un modelo determinístico y otro estocástico y las diferencias entre ellos. A la derecha de la figura se encuentra el dominio espacio-tiempo en el cual el espacio o distancia a lo largo del canal se representa en el eje horizontal y el tiempo en el eje vertical, para cada uno de los casos mostrados.

El caso a) es un modelo determinístico agregado de flujo permanente. Los flujos de entrada y salida son iguales y constantes en el tiempo, tal como lo muestran los puntos de igual tamaño en las líneas $x=0$ y $x=L$. El siguiente caso b) incluye la aleatoriedad. La salida del sistema no se muestra como un punto de valor único, sino como una distribución que asigna una probabilidad de ocurrencia a cada uno de los valores posibles de la variable. Este es un modelo estocástico independiente del espacio y del tiempo donde la distribución de probabilidad es la misma en cualquier punto del plano espacio-tiempo y los valores en un punto no influyen en los valores obtenidos en cualquier otro lugar.

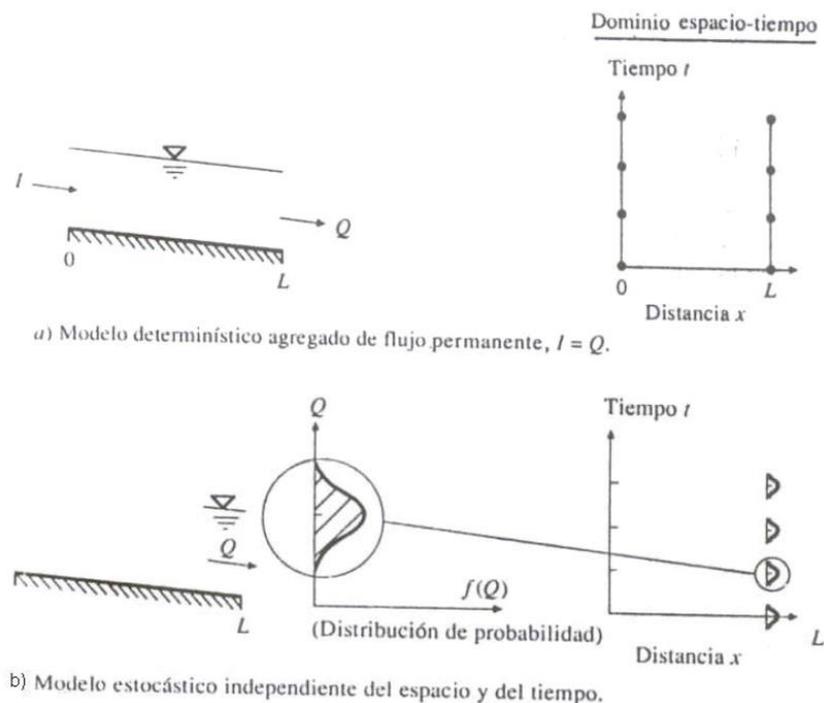


Figura 1: Representación gráfica de un modelo determinístico y un modelo estocástico.

Modelos Conceptuales de propagación de flujo: al desarrollar modelos de sistemas hidrológicos no pueden reproducirse exactamente todos los procesos que ocurren en la naturaleza. Si tal representación fuera posible, los modelos resultantes serían imposibles de resolver. En consecuencia, es necesario hacer simplificaciones para reducir el sistema complejo al conjunto de aquellos procesos críticos para el funcionamiento del sistema. Con esto el sistema hidrológico se reduce a un modelo conceptual, entendido como un volumen delimitado en el espacio, que acepta entradas de agua, las opera internamente y produce salidas de caudal (Chow et al., 1994).

1.3 Tipos de Modelos Estocásticos

La simulación estocástica se usa fundamentalmente para predicciones con intervalos largos de tiempo, donde lo que interesa no es la respuesta instantánea del sistema sino los valores característicos. Como los modelos estocásticos trabajan con información estadística, es muy difícil modelar con ellos fenómenos instantáneos o de intervalos cortos de tiempo, por eso, la simulación estocástica es usada principalmente para propósitos de planeamiento, para generar series "igualmente probables" de caudales medios mensuales, por ejemplo.

Existen distintos tipos de modelos estocásticos aplicados a la hidrología. Se pueden citar algunos:

- i) Los modelos de correlación y regresión
- ii) Los modelos de distribución de probabilidad
- iii) El modelo de Monte Carlo para la generación de series sintéticas
- iv) El modelo de Markov

1.4 Modelos Estocásticos utilizados para predecir niveles hidrométricos del río Paraguay

Desde la década de los años ochenta, se utilizaban métodos de correlación lineal para estimar el comportamiento futuro del nivel del río Paraguay basado en un punto de control aguas arriba. Estos métodos solo permiten tener una idea de translación lineal de la onda de crecida, por lo que, si se generan lluvias importantes en las cuencas intermedias, las mismas no son contempladas en la ecuación de regresión lineal y, por tanto, los resultados son alterados sustancialmente.

1.4.1 Estudio de Crecidas del Río Paraguay³

De Egea y Cazó (1998), realizaron una revisión de las series de datos hidrométricos del río Paraguay en los puertos de Bahía Negra, Fuerte Olimpo, La Victoria, Concepción, Pto. Antequera, Pto. Rosario, Asunción, Formosa (Argentina) y Pilar. Con ello plantearon un sistema de predicción basados en correlaciones lineales.

La correlación se realiza entre las alturas máximas anuales H , los correspondientes tiempos de traslados t , y los términos independientes m y b de las ecuaciones de base

³ Tesis de grado Fiuna: Juan Manuel de Egea y Zoilo Cazó

siendo H el factor común en este proceso. Estas alturas máximas son determinadas mediante métodos estadísticos de eventos extremos

En la figura 2 se pueden observar algunos resultados de este proceso.

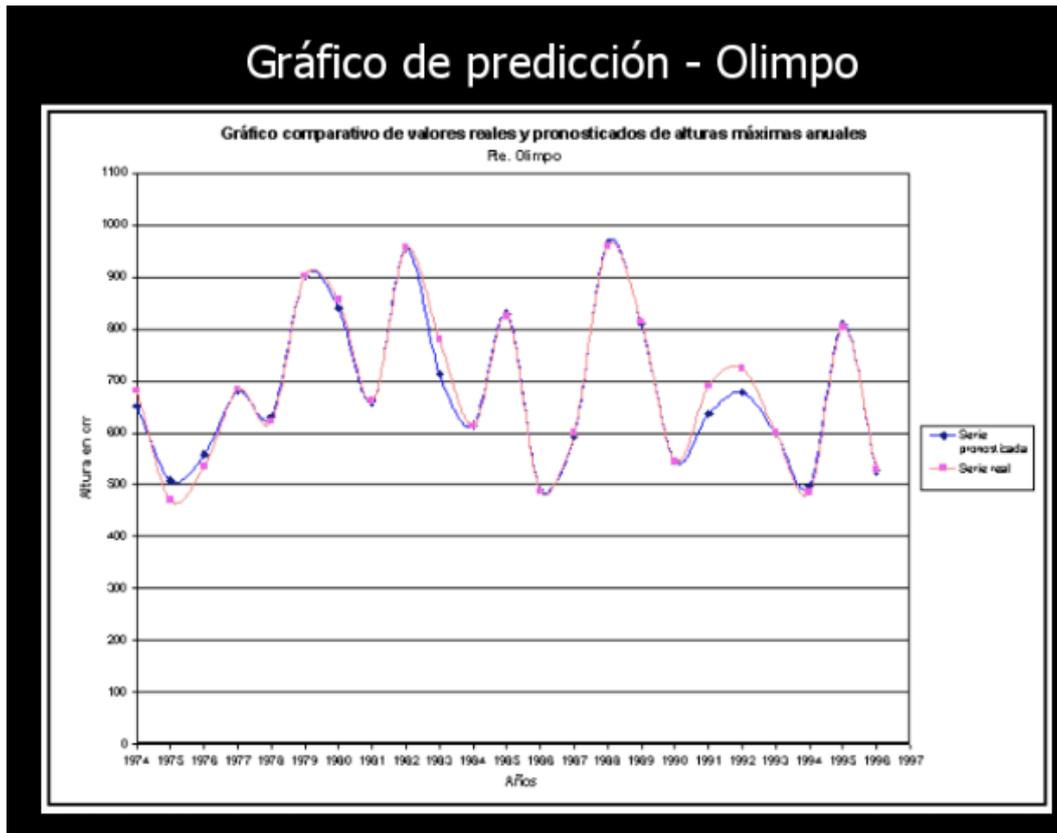


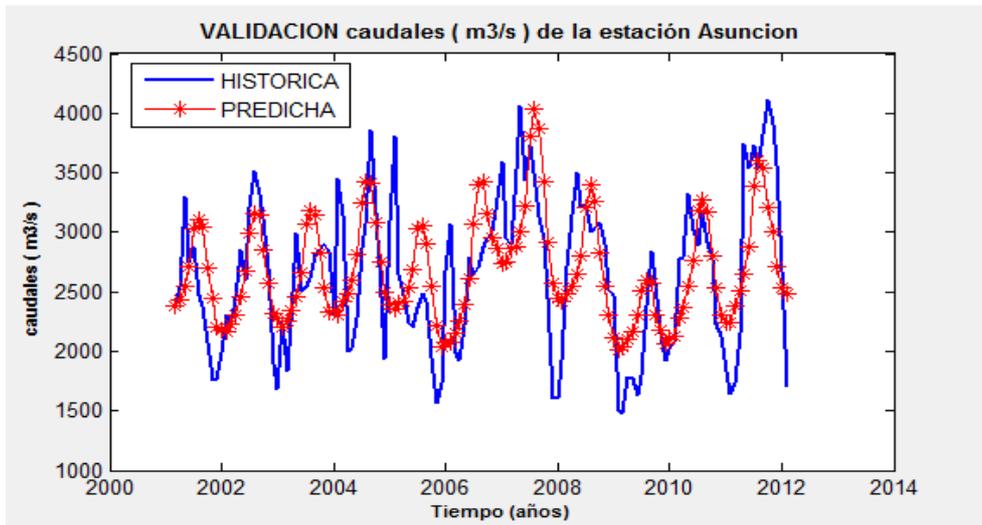
Figura 2: Ejemplo de resultado obtenido para predicciones estocásticas

1.4.2 Pronóstico preliminar del Rio Paraguay-D. Rojo-Univ. Nacional de Colombia

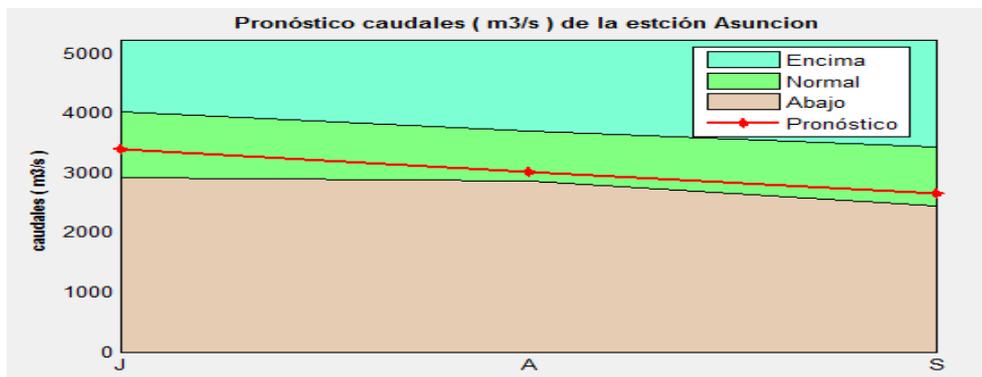
Recientemente, se ha implementado en la Dirección de Meteorología e Hidrología el método planteado por Rojo (2011) que utiliza métodos no lineales para predicción de caudales en dos puntos de control, Concepción y Asunción. Este modelo utiliza métodos espectrales y de regresión, produciendo un pronóstico de 1, 3, 6 y 12 meses. Se generan caudales mensuales medios para los horizontes de tiempo antes mencionados. Efectúa un análisis de correlación entre las anomalías de temperaturas superficiales del mar (TSM) y los caudales medios mensuales estandarizados del río Paraguay

En la Fig. 3 (a y b) se muestran dos ejemplos de salida del método de Rojo (2011) de caudales medidos y estimados a nivel medio mensual.

Este método será estudiado con mayor detalle para evaluar su utilización en forma operacional. La razón es que incorpora variables climáticas e hidrológicas.



(a)



(b)

Figura 3: Pronóstico de caudales hidrométricos a nivel mensual usando el método de Rojo (2011)

1.4.3 Pronósticos Rio Paraguay del Centro Meteorológico Nacional (DMH-DINAC)

La Dirección de Meteorología cuenta con un área de hidrología operativa donde se recibe y sistematiza datos hidrométricos del rio Paraguay. Con esta información produce pronósticos en base a la información disponible del rio Paraguay, datos generados por modelos hidroclimaticos y se disponibiliza en la web:

<http://meteorologia.gov.py/dnoticias.php?noticia=40>

En la figura 4 se visualiza los resultados de pronósticos a una semana:

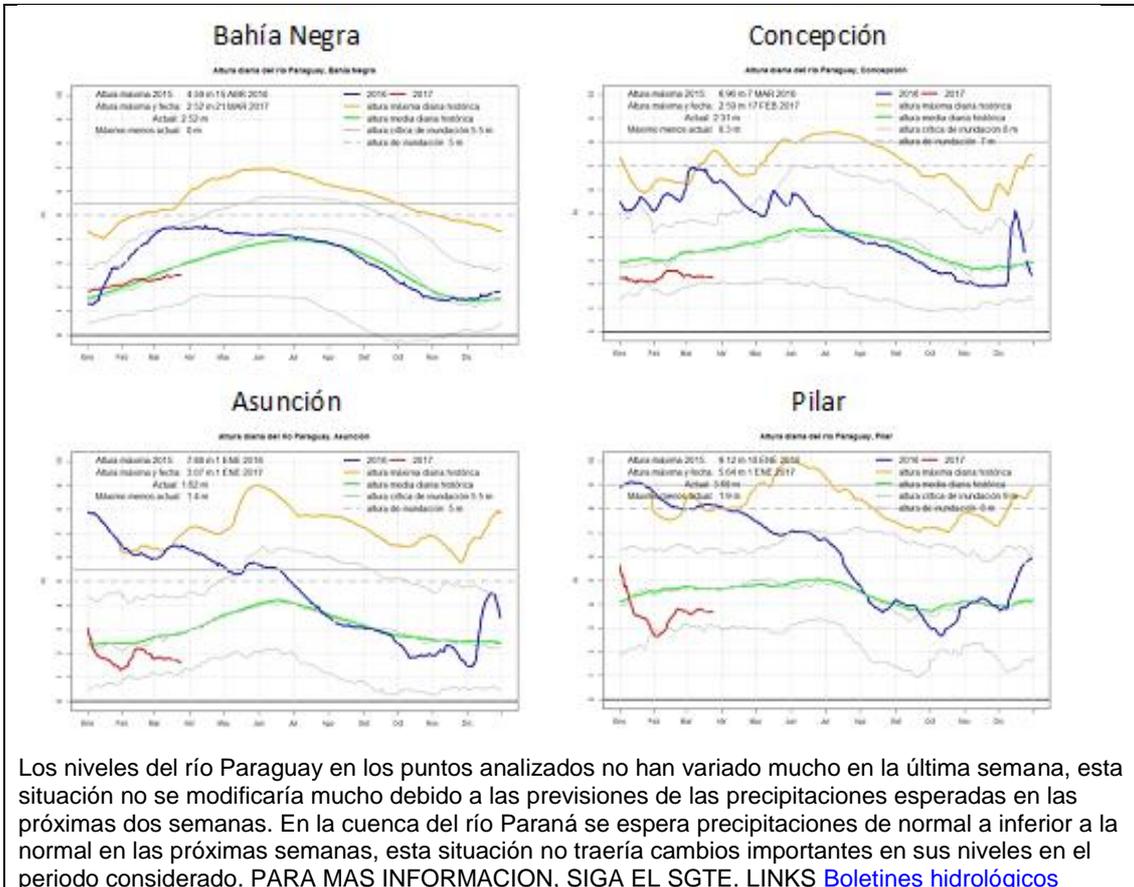


Figura 4: Ejemplos de pronósticos operativos de la DMH-DINAC

1.4.4 Estudio estadístico para ajuste de alturas hidrométricas del río Paraguay⁴. Ing. Jose Luis Benza -1998

Se procedió a efectuar un ajuste automático de distribuciones estadísticas para determinación de alturas hidrométricas para diferentes periodos de recurrencia en el río Paraguay:

- Ajuste de las posibles curvas de distribución a los datos observados de máximos anuales en varias estaciones
- Determinación del modelo que mejor se ajusta a los datos observados en cada estación
- Determinación de las alturas que corresponden a cada TR en cada estación, utilizando el modelo mejor ajustado
- Estudio de la posibilidad de estimar alturas faltantes de algunas estaciones utilizando la relación existente entre las alturas de estaciones vecinas.

En la figura 5 se presenta uno de los resultados del estudio

⁴ Estudio elaborado para el proyecto Zonificación de Areas Inundables del río Paraguay-Sen-Fiuna-Fonplata 2004

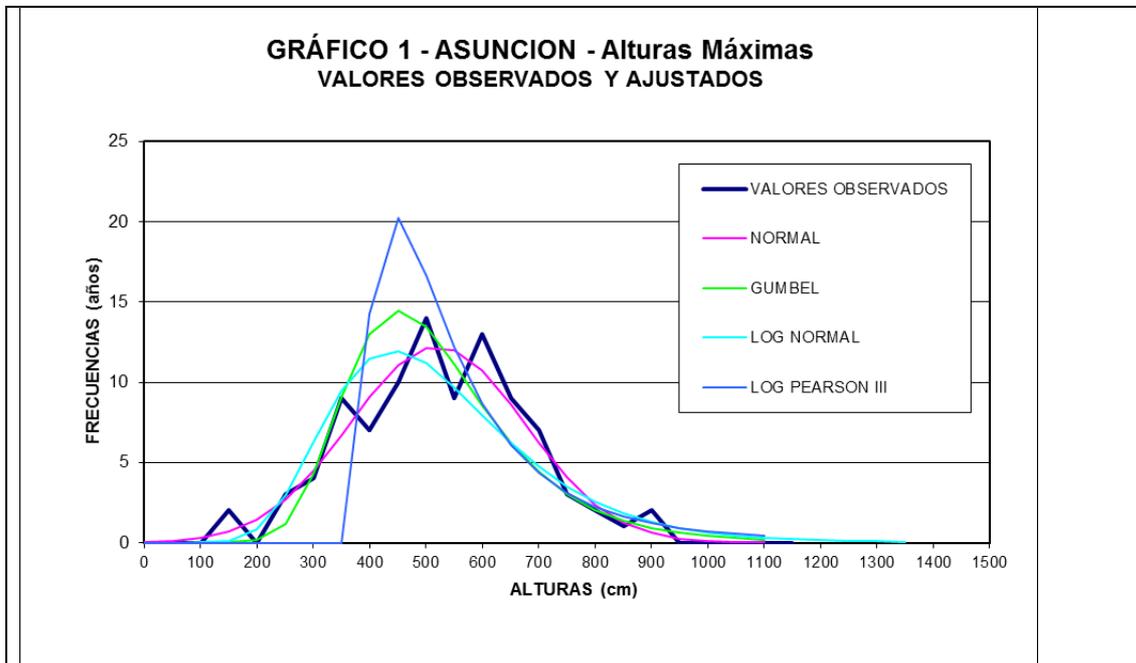


Figura 5: Ajuste de distribuciones estadísticas a datos del río Paraguay en Asunción

1.3 Modelos Hidrológicos e Hidrodinámicos

Los modelos permiten simular el comportamiento de un sistema real (prototipo) y obtener mediante la operación del mismo, las respuestas o salidas a un determinado impulso o entrada al sistema (Fattorelli & Fernández, 2011).

La modelación hidrológica se define como la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación (Viessman, Lewis, & Knapp, 1989).

Con respecto a esta definición, es oportuno aclarar que los “eventos” pueden tratarse de uno aislado o de un conjunto de estos a lo largo del tiempo. Para el primero de los casos, se trata de un modelo de evento, mientras que, para el segundo, se trata de un modelo continuo.

Un modelo de evento simula una sola tormenta, por lo tanto, la duración varía de unas cuantas horas a unos días. Por otra parte, un modelo continuo simula un periodo largo, prediciendo la respuesta de una cuenca durante y entre eventos de precipitación (Ford & Hamilton, 1996).

Otra gran clasificación de los modelos hidrológicos se da en cómo considera las variaciones espaciales de la cuenca. Un modelo distribuido considera explícitamente las variaciones espaciales (geográficas) de las características y procesos, mientras que, en un modelo agregado, estas variaciones espaciales son promediadas o simplemente ignoradas (Ford & Hamilton, 1996). Es importante mencionar que existen modelos semidistribuidos, que reciben este nombre porque consideran en parte las variaciones espaciales, dividiendo la cuenca en unidades más pequeñas (subcuenas) y asignando características particulares a cada una de ellas.

La selección de un modelo determinado dependerá del objetivo del trabajo, y de la practicidad que brinde su uso con respecto a los datos disponibles.

1.3.1 PAQUETE HEC

Incluye 2 modelos, uno hidrológico, el HMS y otro Hidrodinámico, HEC RAS, que pueden acoplarse en una plataforma de modelación

1.3.1.1 Modelo hidrológico HMS –Hydrologic Model System

El HEC-HMS es un software gratuito de modelación hidrológica desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, en el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC).

Está diseñado para simular el proceso de precipitación y escurrimiento en cuencas y puede ser aplicado a un amplio rango de regiones geográficas y situaciones, tales como pequeñas cuencas urbanas, o en grandes cuencas sin intervención. Además, los resultados pueden ser aplicados para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, observación de flujo, impacto de intervención en cuencas, reducción de daños por inundaciones, operación de sistemas, entre otros.

La aplicación del modelo en este trabajo, estará enfocada a obtener hidrogramas de salida de cuencas hidrográficas a partir de datos de precipitación en un periodo de tiempo, como simulación continua.

Etapas de simulación del ciclo hidrológico en el modelo

El modelo HEC-HMS simula 4 (cuatro) componentes del ciclo hidrológico, brindando una gran variedad de métodos que pueden ser utilizados para cada componente. La selección de uno u otro método dependerá del tipo de modelo que se quiera crear (de evento o continuo), así como de la calidad y cantidad de datos disponibles.

Estos componentes son los siguientes (Sánchez, 2012)⁵:

a) Vegetación, superficie, pérdidas: esta primera etapa calcula qué parte de la precipitación caída va a generar escorrentía directa (Precipitación Neta).

a.1 Vegetación: si existe vegetación, parte de la precipitación será retenida en las hojas para luego evaporarse. Esto constituye una pérdida total del sistema.

a.2 Almacenamiento en superficie: hace referencia a aquella parte de la precipitación que puede quedar retenida en pequeñas retenciones superficiales, para infiltrarse o evaporarse después.

a.3 Pérdidas: hace referencia a aquella parte de la precipitación que se infiltra.

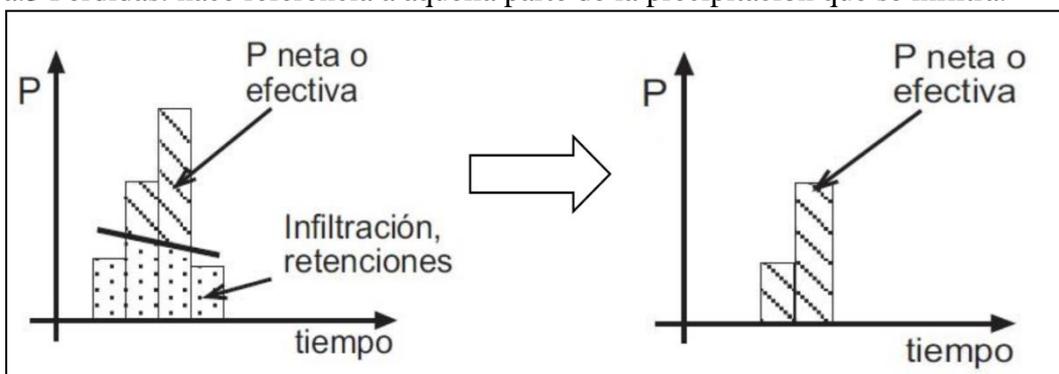


Figura 6: Separación de la precipitación efectiva.

De todos los métodos que ofrece el programa para este componente de pérdidas, solo uno es aplicable para simulaciones continuas, el Soil Moisture Accounting (SMA).

b) Transformación: el programa calcula la escorrentía directa producida por la precipitación neta.

⁵ Sánchez, F.J. (2012). Manual Elemental (HEC-HMS). Departamento de Geología – Universidad de Salamanca, España.

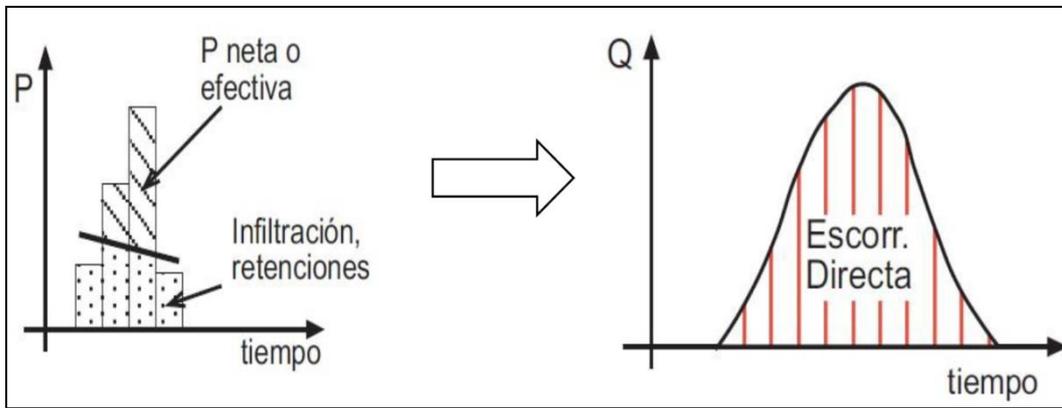


Figura 7: Transformación de la Precipitación Efectiva en Escorrentía Directa.

Para esta etapa, existen diversos métodos que pueden utilizarse, entre ellos: HU Clark, HU Snyder, HU SCS, Onda Cinemática, Clark Modificado. Además, el programa da la opción al usuario de especificar una Curva S o un Hidrograma Unitario (HU). Con respecto a estos métodos, algunos podrían no ser aplicables por falta de datos o por el tipo de modelo que se pretende desarrollar. Una de las opciones más prácticas para cuencas con pocos datos medidos, y considerando que el presente trabajo consiste en una simulación continua, es el Hidrograma Unitario de Clark. La estimación de los parámetros de este modelo no es una tarea complicada, por el hecho de que existe una gran variedad de estudios que contienen ecuaciones empíricas para el efecto, aplicadas a cuencas de diversas regiones.

c) Caudal Base: en esta etapa el programa suma la escorrentía directa a la escorrentía básica (si existía previamente). Calcula la evolución de la escorrentía básica a lo largo del tiempo.

Existe una gran variedad de métodos, pero solo uno trabaja en conjunto con el modelo de pérdidas SMA para simulaciones continuas, el Linear Reservoir.

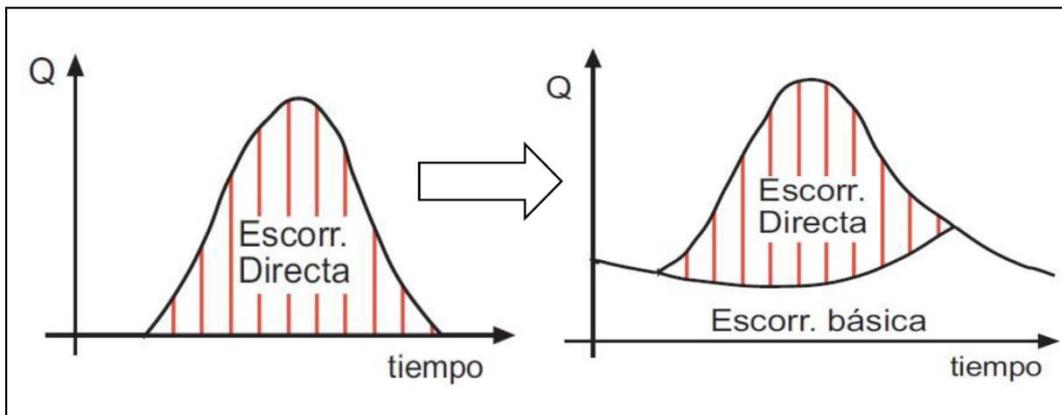


Figura 8: Suma del Caudal Base a la Escorrentía Directa.

d) Tránsito de Avenidas: el programa calcula cómo evoluciona un hidrograma a medida que discurre a lo largo de un cauce, o a través de un depósito o embalse.

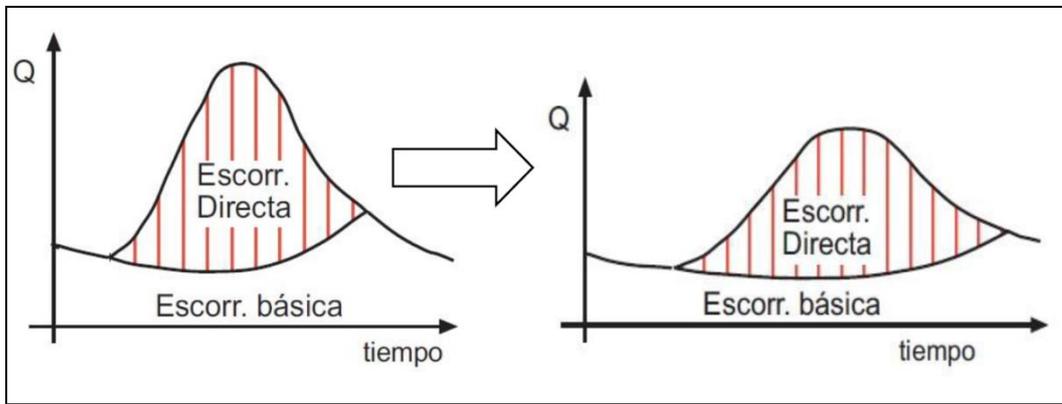


Figura 9: Tránsito de Hidrograma.

Entre los métodos que ofrece el programa se mencionan los siguientes: Onda Cinemática, Lag, Modified Puls, Muskingum, Muskingum-Cunge, Straddle Stagger. La elección de uno de estos métodos está estrictamente sujeta a la practicidad de estimación de los parámetros de entrada. Algunos de estos métodos requieren información muy específica que solo pueden ser obtenidas con mediciones directas. El método de Muskingum-Cunge permite establecer un cauce a partir de una sección transversal y otros parámetros de fácil obtención como longitud, pendiente media, entre otros.

Resumiendo, el trabajo del HEC-HMS, este realiza los cálculos de las tres primeras fases (pérdidas, transformación y caudal base) para cada subcuenca. Para la última fase, el programa calcula el tránsito a lo largo de un cauce, es decir, la evolución del hidrograma que fue generado en una subcuenca y que luego circula por otra distinta. Al final, se suman todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido, proporcionando el hidrograma de salida de la cuenca.

Estructura de un proyecto en el HEC-HMS

El programa tiene 3 (tres) componentes estructurales (Sánchez, 2012)⁶:

- 1) Modelo de Cuenca: se brinda la información al programa acerca de las distintas subcuencas y sus características. Estas características son los parámetros asociados a los modelos de pérdidas, transformación, caudal base y tránsito de avenidas.
- 2) Modelo Meteorológico: en este componente se asignan los pluviómetros. Los datos de cada pluviómetro son introducidos previamente en el Administrador de las Series de Tiempo.
- 3) Especificaciones de Control: en este componente se le indica al programa cuando debe empezar y terminar la simulación, así como el intervalo de tiempo.

Descripción de los métodos utilizados para componentes del ciclo hidrológico en el HEC-HMS

(a) Modelo de Pérdidas: Soil Moisture Accounting (USACE, 2013)

Como se mencionó anteriormente, el método que ofrece el HEC-HMS para simulaciones continuas es el Soil Moisture Accounting Model (Modelo de la Contabilidad de la humedad del Suelo). Este modelo, simula el movimiento y almacenamiento del agua a través de la vegetación, la superficie del suelo, el perfil del suelo y las distintas capas del agua subterránea.

El siguiente esquema es una representación de las distintas capas que modela el Método SMA:

⁶ Sánchez, F.J. (2012). Manual Elemental (HEC-HMS). Departamento de Geología – Universidad de Salamanca, España.

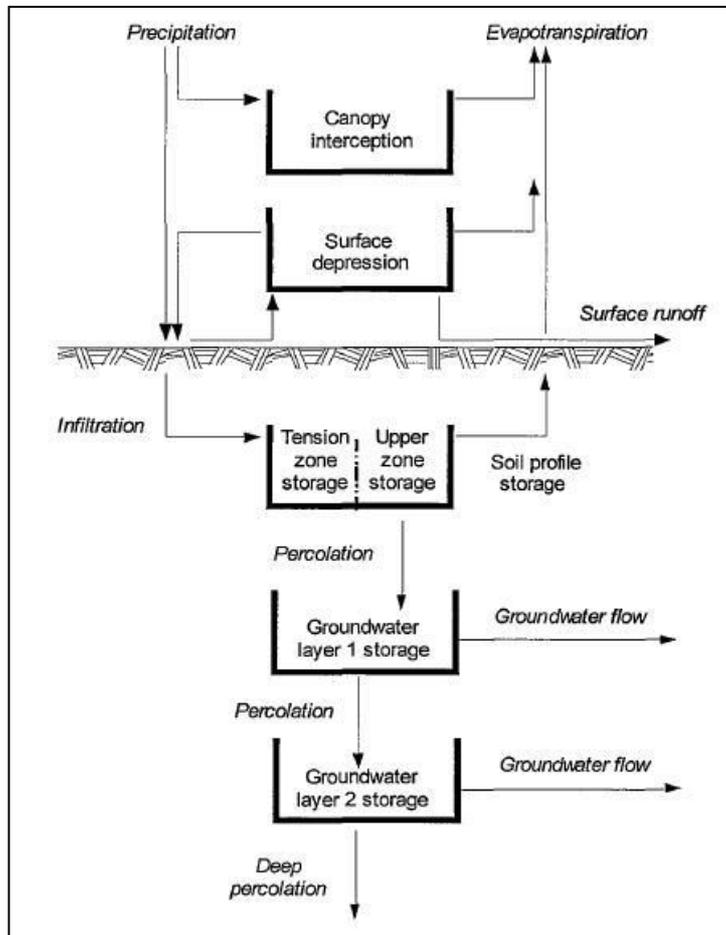


Figura 10: Esquema del Modelo Soil Moisture Accounting
(Fuente: Manual de Referencias Técnicas del HMS).

Una de las particularidades de este modelo es la gran cantidad de parámetros que solicita, en donde prácticamente todos están sujetos a calibración. A continuación, se presentan las capas de almacenamiento del SMA y se mencionan sus parámetros asociados a cada caso:

- **Intercepción y almacenamiento por la vegetación (Canopy Interception):** representa aquella parte de la precipitación que es capturada en árboles, arbustos y pastos, y no alcanza la superficie del suelo. Parámetros solicitados:

- Condición Inicial (%): corresponde al porcentaje de la capacidad de retención por vegetación que se encuentra llena de agua al inicio de la simulación.
- Máxima Retención por Vegetación (mm): es la capacidad máxima de retención de agua por la vegetación existente en la cuenca.

- **Intercepción y almacenamiento en la superficie del suelo (Surface Depression):** representa aquella parte de la precipitación retenida en depresiones poco profundas de la superficie del suelo. Parámetros solicitados:

- Condición Inicial (%): corresponde al porcentaje de la capacidad de retención en superficie que se encuentra llena de agua al inicio de la simulación.

- Máxima Retención Superficial (mm): es la capacidad máxima de retención de agua en relieves superficiales en la cuenca.
- Área Impermeable (%): corresponde al porcentaje de la cuenca que posee un área impermeable, en donde toda el agua precipitada se convertirá en escorrentía directa.

- **Almacenamiento en el perfil del suelo (Soil-Profile Storage)**: representa aquella parte de la precipitación que queda almacenada en la capa más alta del suelo. La zona del perfil de suelo se subdivide en dos regiones:

*Zona de tensión: es la porción del perfil del suelo que pierde agua solo por evapotranspiración.

*Zona alta: es la porción del perfil del suelo que pierde agua por evapotranspiración y/o percolación.

Parámetros solicitados:

- Condición Inicial (%): corresponde al porcentaje de la capacidad de almacenamiento del suelo que está llena de agua al inicio de la simulación.
- Máxima Tasa de Infiltración (mm/hr).

Para cada intervalo de tiempo el modelo SMA calcula la infiltración potencial:

$$\text{Infiltración Potencial} = \text{Máx. Inf} - \frac{\text{Vol. Alm. Suelo}}{\text{Máx. Alm. Suelo}} \text{Máx. Inf}$$

Donde:

Máx. Inf = máxima tasa de infiltración en el suelo.

Vol. Alm. Suelo = volumen de agua almacenado en el suelo al inicio del intervalo.

Máx. Alm. Suelo = capacidad máxima de almacenamiento en el suelo.

- Máxima Capacidad de Almacenamiento en el Suelo (mm).
- Máxima Capacidad de Almacenamiento en la Zona de Tensión (mm).
- Máxima Tasa de Percolación (mm/hr).

Para cada intervalo de tiempo el modelo SMA calcula la percolación potencial:

$$\begin{aligned} \text{Percolación Potencial} \\ = \text{Máx. Perc.} \left(\frac{\text{Vol. Alm. Suelo}}{\text{Máx. Alm. Suelo}} \right) \left(1 - \frac{\text{Vol. Alm. GW1}}{\text{Máx. Alm. GW1}} \right) \end{aligned}$$

Donde:

Máx. Perc = máxima tasa de percolación.

Vol. Alm. Suelo = volumen de agua almacenado en el suelo al inicio del intervalo.

Máx. Alm. Suelo = capacidad máxima de almacenamiento en el suelo.

Vol. Alm. GW1 = volumen de agua almacenado en el acuífero 1 al inicio del intervalo.

Máx. Alm. GW1 = capacidad máxima de almacenamiento en el acuífero 1.

- **Almacenamiento en las capas de agua subterránea** (Groundwater Storage): representan el proceso de flujo subterráneo y percolación del agua en las capas subterráneas 1 y 2. El agua que va desde la capa 2 a una percolación profunda es considerada como una pérdida del sistema. Parámetros solicitados:

- Condición Inicial del Acuífero 1 (%): corresponde al porcentaje de la capacidad de almacenamiento del primer acuífero que se encuentra llena al inicio de la simulación.
- Condición Inicial del Acuífero 2 (%): corresponde al porcentaje de la capacidad de almacenamiento del segundo acuífero que se encuentra llena al inicio de la simulación.
- Máxima Capacidad de Almacenamiento del Acuífero 1 (mm).
- Máxima Capacidad de Almacenamiento del Acuífero 2 (mm).
- Máxima Tasa de Percolación del Acuífero 1 (mm/hr): hace referencia a la tasa máxima de transferencia de agua desde el primer acuífero al segundo.

Para cada intervalo de tiempo el modelo SMA calcula la percolación potencial:

$$\text{Percolación Potencial} = \text{Máx. Perc. GW1} \left(\frac{\text{Vol. Alm. Suelo GW1}}{\text{Máx. Alm. Suelo GW1}} \right) \left(1 - \frac{\text{Vol. Alm. GW2}}{\text{Máx. Alm. GW2}} \right)$$

Donde:

Máx. Perc.GW1 = máxima tasa de percolación.

Vol.Alm.GW1 = volumen de agua almacenado en el acuífero 1 al inicio del intervalo.

Máx.Alm.GW1 = capacidad máxima de almacenamiento en el acuífero 1.

Vol.Alm.GW2 = volumen de agua almacenado en el acuífero 2 al inicio del intervalo.

Máx.Alm.GW2 = capacidad máxima de almacenamiento en el acuífero 2.

- **Máxima Tasa de Percolación del Acuífero 2 (mm/hr)**: hace referencia a la tasa máxima de transferencia del segundo acuífero a las capas más profundas. Este parámetro representa la tasa máxima de pérdida total de agua del sistema de simulación.

- **Coefficiente de Almacenamiento del Acuífero 1 (hr)**: es el tiempo de retraso en un reservorio lineal para transformar el agua almacenada del primer acuífero en caudal que ingresa lateralmente al cauce.

- **Coefficiente de Almacenamiento del Acuífero 2 (hr)**: es el tiempo de retraso en un reservorio lineal para transformar el agua almacenada del segundo acuífero en caudal que ingresa lateralmente al cauce. Generalmente, este valor es mayor al coeficiente del primer acuífero.

Orden de los cálculos realizados por el SMA:

- Si ocurre evento de precipitación, la evapotranspiración no es modelada.

La precipitación caída es retenida en primer lugar por la vegetación (si existe), y el exceso cae a la superficie del suelo, quedando disponible para la infiltración. Si el volumen caído es superior a la capacidad de almacenamiento del suelo, el exceso se convierte en escorrentía directa. El agua infiltrada al subsuelo rellena primeramente la zona de tensión. El agua que se encuentra en el perfil de suelo, pero no en la zona de tensión, percola a la primera capa de agua subterránea. El flujo subterráneo va a lo largo de la capa 1 y el agua restante percola a la capa 2. La percolación de la capa 2 al acuífero profundo es una pérdida total para el modelo.

- Si no ocurre precipitación, la evapotranspiración es modelada

(b) Modelo de Transformación: Hidrograma Unitario de Clark.

Se define el Hidrograma Unitario (HU) (Sherman, 1932) como la respuesta de una cuenca a la precipitación efectiva de lámina unitaria (1 pulgada ó 1 cm) uniformemente distribuida en toda la cuenca que cae en una duración especificada de tiempo, T (tiempo unitario).

La teoría del hidrograma unitario conforma un modelo conceptual que supone a la cuenca como un sistema lineal e invariable en el tiempo en el que la entrada es la lluvia y la salida el caudal de escorrentía directa (Dooge, 1973)⁷.

El método utilizado para el presente trabajo es el Hidrograma Unitario de Clark. Este modelo consiste en un hidrograma unitario sintético, es decir, el hidrograma es estimado de acuerdo con fórmulas que incluyen parámetros físicos de la cuenca de estudio como el área, longitud del cauce principal, pendiente media, etc. Para el caso del HU de Clark del HEC-HMS, el programa construye una curva de Tiempo vs. Área y la utiliza para desarrollar la translación del Hidrograma resultante de una precipitación.

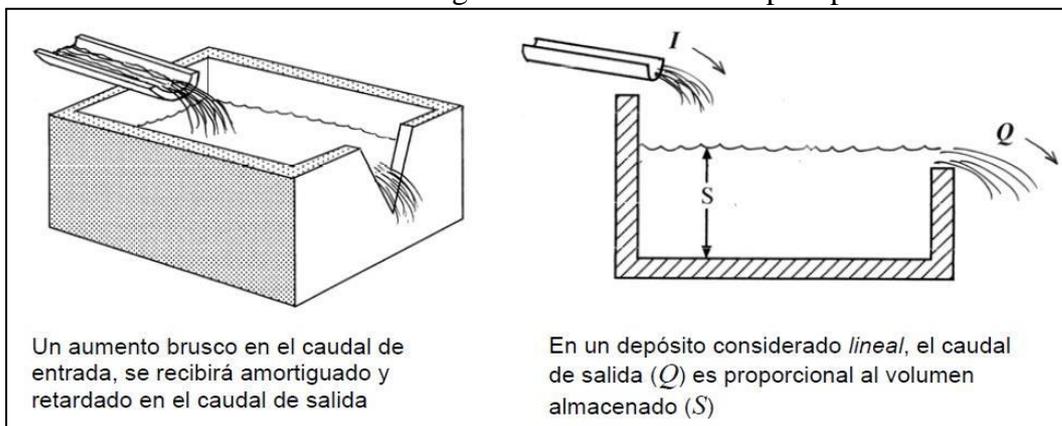


Figura 11: Depósito Lineal.

Parámetros solicitados:

- Tiempo de Concentración (hr): se define como el tiempo que tarda una partícula de agua en llegar desde el punto más alejado de la cuenca al punto de descarga (Fattorelli & Fernández, 2011). El tiempo de concentración define el tiempo máximo de viaje en cada subcuenca (USACE, 2013).
- Coefficiente de Almacenamiento (hr): parámetro que tiene en cuenta el efecto del almacenamiento en la red de cauces de la cuenca (Fattorelli & Fernández, 2011). El coeficiente de almacenamiento es utilizado en el reservorio lineal que mide los efectos del almacenamiento (USACE, 2013).

La ventaja de la utilización del HU de Clark con respecto a los otros métodos que ofrece el HMS, radica en que la estimación de estos parámetros no es una tarea de mucha dificultad. Las fórmulas empíricas desarrolladas por diversos autores para hallar el T_c , generalmente dependen de la longitud del cauce principal y de la pendiente media del mismo, valores que pueden ser obtenidos con operaciones simples en un sistema de información geográfica.

Para el presente estudio se optó por utilizar la fórmula de Kirpich (1940) para estimar el T_c . Esta fórmula fue desarrollada con información proporcionada por el Soil

⁷ Dooge, J. (1973). "Linear Theory of Hydrologic Systems".

Conservation Service (SCS) en siete cuencas de Tennessee (USA). Estas cuencas presentaban una superficie inferior a 50 ha, en canales de altas pendientes (3 a 10%). Su expresión original, en unidades métricas es la siguiente:

$$T_c = 0.06626 \frac{L^{0.77}}{J^{0.385}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del curso de agua principal, en km.

J: Pendiente del curso de agua principal.

La elección de esta fórmula se dio por el hecho de que existen opciones para su utilización en cuencas con características distintas, por ejemplo, en el libro “Water Resources Engineering” del autor D.A Chin, se incluyen algunos coeficientes correctores según ciertas características:

Tabla 1: Coeficientes correctores de la fórmula de Kirpich (Tc).

Aplicación	Coefficiente Corrector
Superficies pavimentadas	0,4
Canales de hormigón	0,2
Cuencas naturales	2

Con respecto a la estimación del Coeficiente de Almacenamiento, existen diversas investigaciones para hallar una ecuación práctica de este parámetro. Por ejemplo, como resultado de diversos estudios del Cuerpo de Ingenieros (HEC, 1982) realizados en cuencas aforadas se obtuvo una ecuación general:

$$\frac{R}{T_c + R} = K \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración, en horas.

R: coeficiente de almacenamiento, en horas.

K: coeficiente que varía dependiendo de las características de la cuenca de estudio.

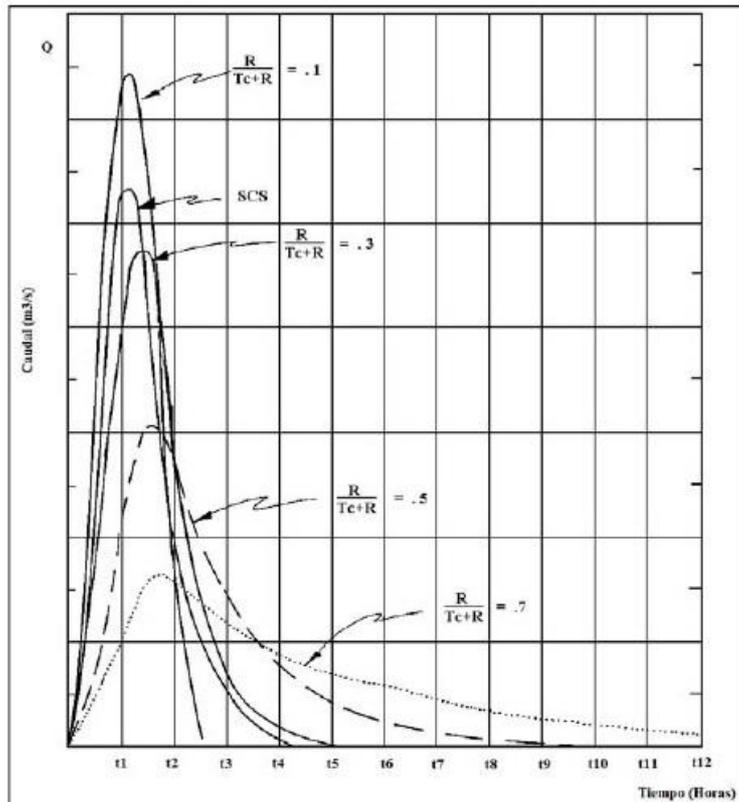


Figura 12: HU Clark para distintos valores de K (USACE, 1994).

Con respecto al rango de variación de K, un estudio de Recursos Hídricos realizado por el Gobierno de Cantabria (España, 2004), sugiere que el valor de K se sitúa en un rango de variación entre 0,1 y 0,9, correspondiendo este último valor a zonas con poca pendiente y uso agrícola.

(c) Cálculo del Caudal Base (USACE, 2013)

El método seleccionado es el Reservorio Lineal, que se utiliza en conjunto con el Soil Moisture Accounting. Este modelo simula el almacenamiento y el movimiento del flujo subsuperficial como el almacenamiento y movimiento del agua entre reservorios. Matemáticamente, este modelo se comporta de igual manera al Modelo del Hidrograma Unitario de Clark que representa la escorrentía de una cuenca.

El flujo saliente de la Capa de Agua Subterránea 1 del SMA es el flujo entrante de la Capa de Agua Subterránea 2. El flujo saliente de la Capa de Agua Subterránea 2 es el flujo entrante de otra capa. El flujo saliente de los dos reservorios lineales es combinado para computar el Flujo Base Total de la Cuenca.

(d) Cálculo del tránsito de Hidrograma (USACE, 2013).

El modelo a ser utilizado es el Muskingum. Este modelo incluye parámetros que no derivan de una base física y por lo tanto, no son difíciles de estimar.

El tránsito en un tramo de un cauce (figura siguiente) responde a la misma idea básica que un estanque o depósito. Posiblemente el método más utilizado en cálculos manuales por su sencillez sea el de Muskingum.

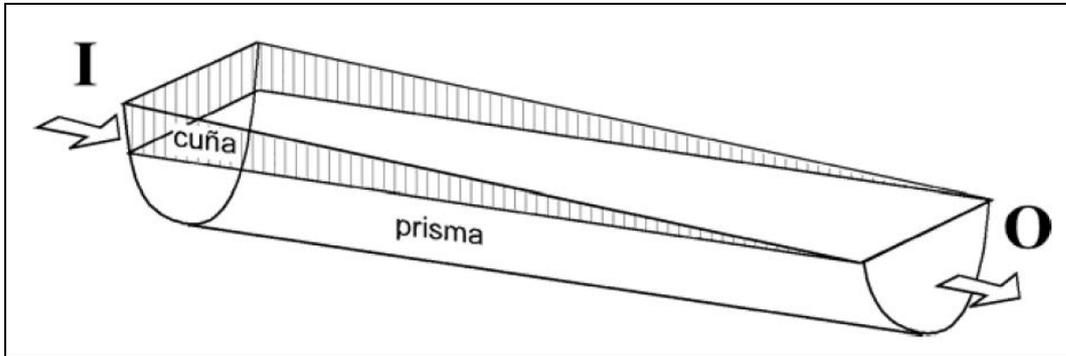


Figura 13: Almacenamiento de un cauce según método Muskingum.

El almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos parte: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O) y el almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida ($I-O$), ya que cuanto mayor sea esa diferencial, más pronunciada será la cuña.

$$\begin{aligned} S_{\text{prisma}} &= K \cdot O \\ S_{\text{cuña}} &= b \cdot (I - O) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde: S = almacenamiento en el tramo considerado de un cauce
 I = caudal de entrada en ese tramo
 O = caudal de salida en ese tramo
 K = constante para el tramo de cauce referente al almacenamiento en prisma
 b = constante para el tramo de cauce referente al almacenamiento en cuña

1.3.1.2 Modelo hidráulico HEC RAS

HEC- RAS⁸ (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*) es un programa informático que modela la hidráulica del flujo de agua que transita a través de los ríos naturales y otros canales. Antes de la reciente actualización de la Versión 5.0, el programa era unidimensional, lo que significa que no hay un modelado directo del efecto hidráulico de los cambios de forma de la sección transversal, curvas y otros aspectos bidimensionales y tridimensionales del flujo. El lanzamiento de la versión 5.0 introdujo el modelado bidimensional del flujo, así como las capacidades de modelado de transferencia de sedimentos.

El programa fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército, Departamento de Defensa de los Estados Unidos con el fin de gestionar los ríos, puertos y otras obras públicas bajo su jurisdicción; se ha encontrado una amplia aceptación por parte de muchos otros desde su lanzamiento público en el año 1995.

El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) en Davis, California, desarrolló el Sistema de Análisis de Río para ayudar a los ingenieros hidráulicos en el análisis de flujo de canal y determinación de la llanura de inundación. Incluye numerosas capacidades de datos de entrada, componentes hidráulicos, análisis de las capacidades de almacenamiento, gestión de datos y de gráficos y generación de informes.

⁸ Fuente: <http://www.hec.usace.army.mil/>

El procedimiento de cálculo básico de HEC- RAS para flujo constante se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía se evalúan por la fricción y la contracción-expansión. La ecuación de momento se utiliza en situaciones donde el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado. Estas situaciones incluyen saltos hidráulicos, sistema hidráulico de puentes y perfiles que evalúan en las confluencias de los ríos.

Para el flujo no permanente, HEC- RAS resuelve completamente la ecuación dinámica unidimensional de Saint Venant, utilizando un método implícito de diferencia finita. La resolución de ecuaciones de flujo no permanente es una adaptación de paquete UNET del Dr. Robert L. Barkau.

HEC- RAS está equipado para modelar una red de canales, un sistema dendrítico o un solo tramo de río. Algunas simplificaciones deben realizarse con el fin de modelar algunas situaciones complejas de flujo utilizando el enfoque unidimensional HEC- RAS. Es capaz de modelar un flujo en régimen subcrítico, supercrítico y mixto, junto con los efectos de puentes, alcantarillas, vertederos, y estructuras

(a) Usos y Ventajas

HEC-RAS es un programa informático para modelar el agua que fluye a través de sistemas de canales abiertos y calcular perfiles de superficie de agua. HEC-RAS encuentra una aplicación comercial particular en el manejo de inundaciones y estudios para empresas de seguros para evaluar inundaciones. Algunos de los usos adicionales son: diseño y análisis de puentes y alcantarillas, estudios de diques y estudios de modificación de canales. Se puede utilizar para el análisis de rotura de presa, aunque otros métodos de modelado son actualmente mejor aceptados para este propósito.

HEC-RAS tiene méritos, especialmente su apoyo por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU., las futuras mejoras en curso, y su aceptación por muchas agencias gubernamentales y empresas privadas. Es de dominio público y revisado por pares, y está disponible para descargar de forma gratuita desde el sitio web de HEC. Varias empresas privadas están registradas como "vendedores" oficiales y ofrecen servicios de consultoría y adición de software. Algunos también distribuyen el software en países que no están autorizados a acceder a los sitios web del Ejército de los Estados Unidos. Sin embargo, la descarga directa de HEC incluye una extensa documentación, de manera que ingenieros y científicos en análisis hidráulico deberían tener poca dificultad en utilizar el software.

(b) Principio de energía

La ecuación de Bernoulli, es aplicada al flujo en canales abiertos. No existe dificultad en el término $\frac{V^2}{2g}$ ya que se asume que la velocidad es constante en toda la sección transversal.

$$\frac{P}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 4}$$

Los demás términos varían de un punto a otro sobre la sección transversal; si consideramos un caso donde las pendientes longitudinales tanto del lecho como de la superficie del agua son pequeñas, entonces en cualquier punto (A) la altura de presión $\frac{P}{\gamma}$ simplemente iguala la profundidad de (A) por debajo de la superficie.

Entre una sección y otra, se resuelve la ecuación de energía para obtener las alturas de escurrimiento:

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde y_1, y_2 representa la altura del agua en las secciones transversales 1 y 2; z_1, z_2 es la cota de terreno las secciones transversales 1 y 2; V_1, V_2 es la velocidad promedio de la

sección; α_1, α_2 son los coeficientes de ajuste de velocidades, g la aceleración de la gravedad y h_e la pérdida de carga entre las secciones 1 y 2.

En la Figura , a continuación, se muestra un diagrama que representa los términos de la Ecuación 5.

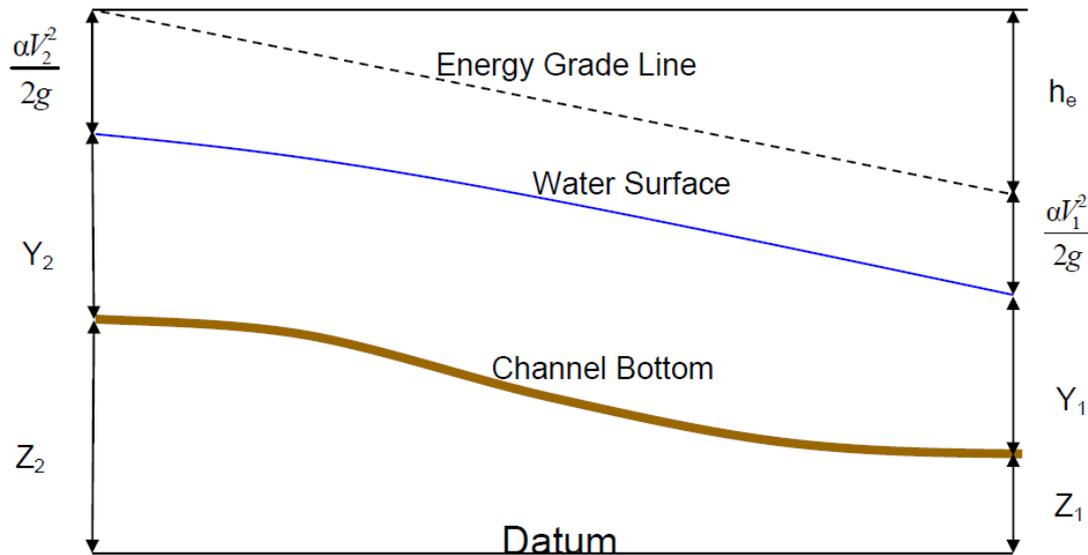


Figura 14: Representación de los términos en la ecuación de energía
Fuente: HEC RAS Hydraulic Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 2010.

La pérdida de carga (h_e) es considerada como la suma de la pérdida por fricción (rugosidad) entre dos secciones y la diferencia entre cargas de velocidad entre secciones ponderadas por un coeficiente de pérdida por contracción o expansión. Mostrada a continuación.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde L = largo representativo del tramo; S_f = pendiente por fricción representativa entre dos secciones; C = coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

L se calcula como la suma de las distancias entre las subsecciones (planicies laterales y canal principal) ponderadas por sus respectivos caudales promedios y dividido por el caudal promedio total.

(c) Conducción o Transporte

La determinación del transporte total de un canal y el coeficiente de velocidad para una sección transversal requieren que el caudal sea subdividido en unidades en las cuales la velocidad se encuentra uniformemente distribuida. Se define la capacidad de conducción de una subsección como el caudal dividido por la raíz de la pérdida de carga, esto se introduce en la ecuación de Manning (Ecuación 8).

$$K = \frac{Q}{\sqrt{S_f}} \quad (m^3/s) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde K = Capacidad de transporte de una subdivisión; n = Coeficiente de Manning de una subdivisión; A = Área de flujo de una subdivisión; R = Radio hidráulico de una subdivisión.

Por defecto HEC-RAS considera subsecciones en donde existe variación del coeficiente de rugosidad de Manning, sin embargo, puede modificarse la definición de subsecciones

en cada nodo del perfil. La conducción total de una sección será la suma de la conducción de todas las subsecciones (Figura 1).

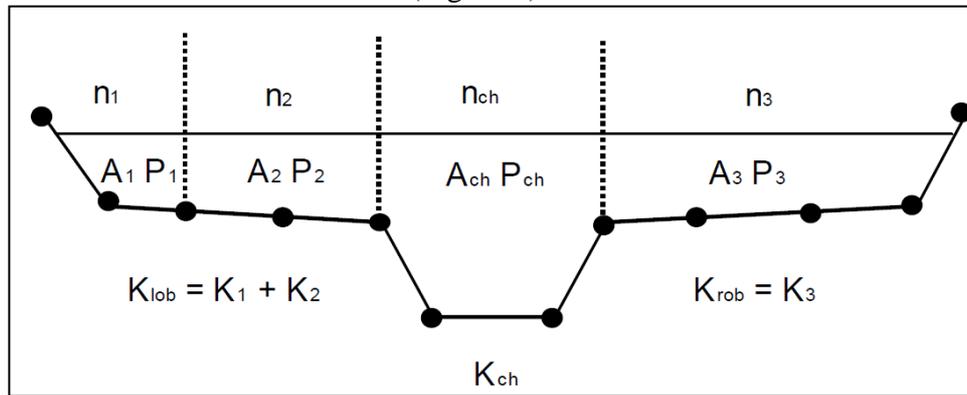


Figura 1: Método de conducción mediante subsecciones.

Fuente: HEC RAS Hydraulic Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 2010.

(d) Coefficiente alfa

Como HEC-RAS es un programa unidimensional de perfiles de superficie de agua, solo un nivel de agua y por lo tanto, solo una energía media son computadas en cada sección transversal. Para un nivel de agua, la energía media es obtenida computando la energía ponderada de las tres subsecciones de una sección transversal (planicie izquierda, canal principal, planicie derecha). Ver Figura 2.

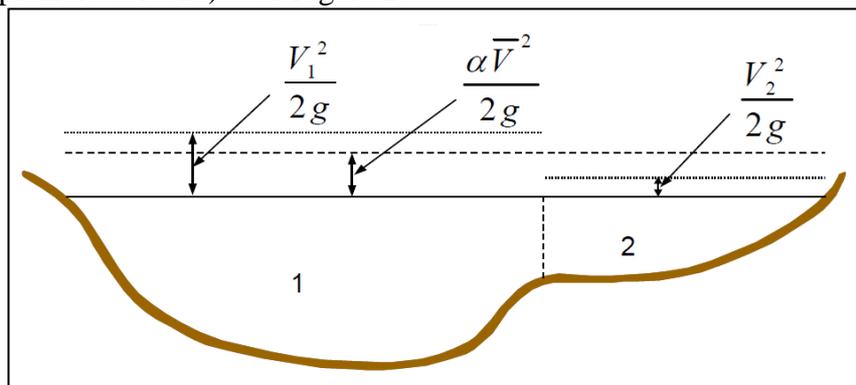


Figura 2: Determinación de la energía para una sección transversal no uniforme.

Fuente: HEC RAS Hydraulic Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 2010.

Dado que es necesario utilizar solo una altura de velocidad, este coeficiente compatibiliza las diferencias entre las alturas de velocidad de las distintas subsecciones. Se define en función de las áreas de flujo y la capacidad de conducción.

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[\frac{(K_{izq})^3}{(A_{izq})^2} + \frac{(K_{canal})^3}{(A_{canal})^2} + \frac{(K_{der})^3}{(A_{der})^2} \right]}{K_t^3} \quad \text{Ecuación 9}$$

(e) Pérdida por fricción

La pérdida por fricción se evalúa como la ponderación de la pendiente por fricción representativa entre dos secciones por la distancia representativa L entre ellas.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$P\acute{e}rdida\ por\ fricci\acute{o}n = L \cdot \bar{S}_f$$

Ecuaci3n 11

Para obtener la pendiente representativa HEC-RAS cuenta con cuatro m3todos, por defecto utiliza el cuadrado del caudal total sobre la conducci3n total.

(f) Altura cr3tica

La altura cr3tica de una secci3n se define como el punto en que la energ3a (H) es m3nima (Figura 3).

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g}$$

Ecuaci3n 12

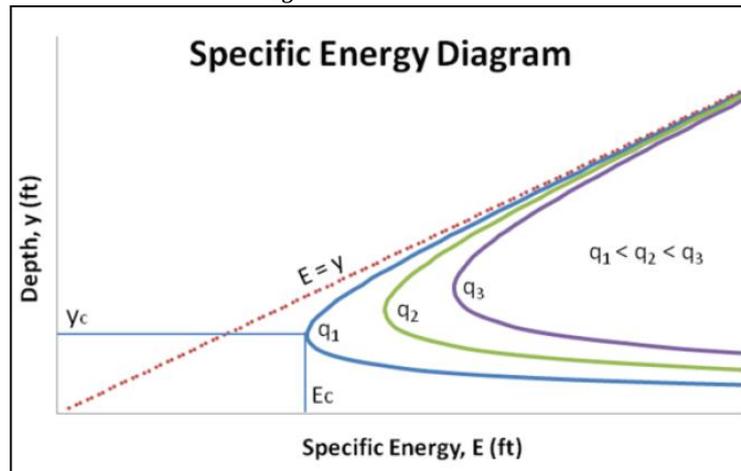


Figura 3: Gr3fico de energ3a espec3fica y altura cr3tica.

Se define la descarga unitaria (q) como el caudal dividido entre el ancho del canal. Tres diferentes valores de q se representan en el diagrama de energ3a espec3fica. La descarga unitaria aumenta de izquierda a derecha, lo que significa que $q_1 < q_2 < q_3$. Existe una relaci3n asint3tica distinta como la parte superior de la curva se aproxima a la l3nea $E = Y$ y la parte inferior de la curva tiende hacia el eje x .

Tambi3n se muestran la energ3a cr3tica o energ3a m3nima, E_c y el correspondiente valor de profundidad cr3tica, y_c .

Se entiende por altura cr3tica ($Fr=1$), en hidr3ulica, a la profundidad en la cual un determinado caudal transita por un canal con el m3nimo de energ3a espec3fica. Evidentemente, dado un caudal, la profundidad cr3tica, en el canal, tiene asociado en forma biun3voca una velocidad cr3tica, y una pendiente cr3tica.

Cuando la profundidad del flujo es mayor que la altura cr3tica, la velocidad ser3 menor que la velocidad cr3tica, y el flujo se denomina subcr3tico, o flujo lento. En un canal con flujo subcr3tico las condiciones del mismo son comandadas desde aguas abajo.

Cuando la profundidad del flujo es menor que la altura cr3tica, la velocidad ser3 mayor que la velocidad cr3tica, y el flujo se denomina supercr3tico, o flujo r3pido, o veloz. En un canal con flujo supercr3tico las condiciones del mismo son comandadas desde aguas arriba.

HEC-RAS utiliza dos m3todos iterativos para obtener dicha altura, el m3todo "parab3lico" (por defecto) y el de "secante".

(g) Ecuaci3n de Momento

Cuando el flujo deja de ser gradualmente variado, la ecuaci3n de energ3a ya no es v3lida. Las transiciones entre distintos r3g3menes (al pasar por crisis) no cumplen esta condici3n. El cambio de r3g3men puede ocurrir por diversos motivos (cambios bruscos de pendiente, secci3n, obst3culos, estructuras como puentes, alcantarillas, vertederos, etc.) HEC-RAS alterna entre la aplicaci3n de ecuaciones emp3ricas para estructuras especiales con un balance de fuerzas, o ecuaci3n de Momento, detallado a continuaci3n.

Aplicando la segunda ley de Newton a un cuerpo de agua encerrado entre dos secciones transversales entre la posición 1 y 2 (Figura 4), el momento en una unidad de tiempo puede ser escrito como sigue:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad \text{Ecuación 13}$$

En donde P_i es la presión hidrostática en la sección i ; W_x la componente del peso del agua en la dirección x ; F_f es la fuerza de fricción; Q el Caudal; ρ la densidad del agua; ΔV_x el cambio de velocidad de la sección 2 a la 1 en la dirección x .

En lo que respecta al método de cálculo, por defecto, HEC-RAS realiza 20 iteraciones. En caso de no encontrar una solución adecuada compara la altura crítica con el resultado de menor error de las iteraciones. Si concuerda con el régimen del problema y su error es menor a 10 cm el programa entrega este valor. En caso de que no cumpla, HEC-RAS arrojará altura crítica en esa sección.

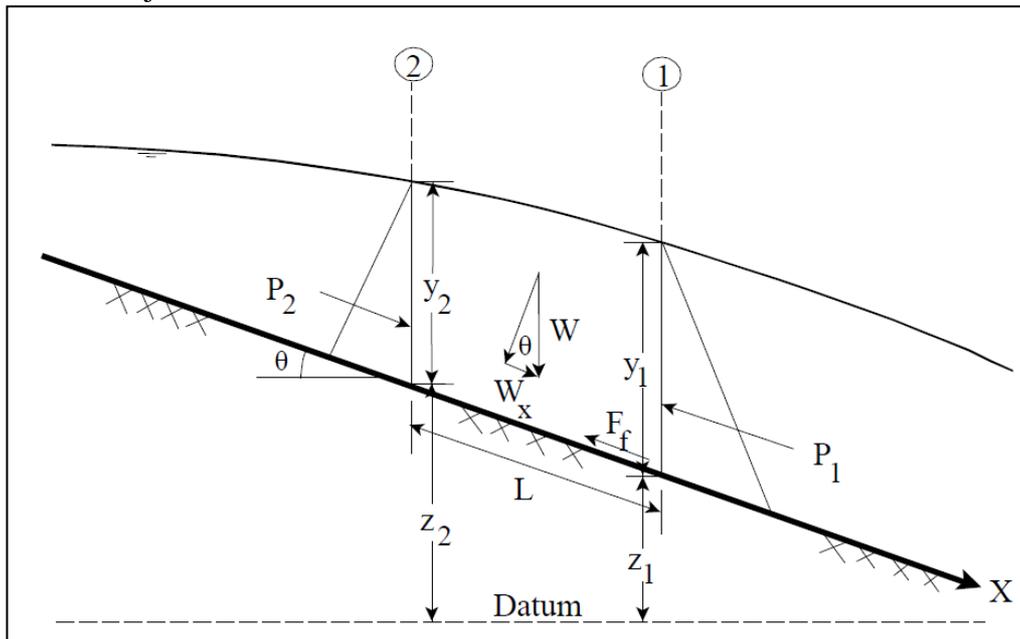


Figura 4: Aplicación del principio de Momento.

Fuente: HEC RAS Hydraulic Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers, 2010.

1.3.2 PAQUETE MIKE

1.3.2.1 MIKE SHE

MIKE SHE es un programa computacional que modela agua subterránea, agua superficial, recarga y evapotranspiración. Incluye todos los aspectos más importantes de la hidrología para el desarrollo de proyectos de modelos integrales. Las aplicaciones de MIKE SHE incluye:

Hidrología integrada de cuencas

Gestión y uso combinado de aguas superficiales y subterráneas

Riego y gestión de la sequía

Manejo y restauración de humedales

Flujos ambientales de los ríos

Gestión de planicies de inundación

Inundaciones inducidas por las aguas subterráneas

Impacto del uso de suelo y cambio climático en el agua superficial y agua subterránea

Destino de los nutrientes y su manejo

Gestión integrada de aguas de minería

El programa incluye métodos de modelación de flujo superficial en terreno semidistribuido para la transformación de lluvia-caudal y modelación por onda de difusión bidimensional con resolución de ecuaciones por método de diferencia finita, para la simulación detallada de la escorrentía y la modelación de inundaciones

1.3.2.2 MIKE Flow

MIKE Powered by DHI es una gama de productos de software que permiten analizar, modelar y simular con precisión cualquier tipo de situaciones referente al agua.

Es un programa informático que simula el caudal y el nivel del agua, la calidad del agua y el transporte de sedimentos en ríos, llanuras inundables, canales de riego, embalses y otras masas de agua mediterráneas. MIKE 11 es un modelo de río unidimensional. Fue desarrollado por DHI (Danish Hydraulic Institute).

La última versión de este programa, MIKE 2016, puede descargarse de la siguiente página web: <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-2016>.

MIKE FLOOD es una completa caja de herramientas para el modelado de inundaciones con flexibilidad en acoplamientos de modelos. Permite simular prácticamente cualquier problema de inundación en ríos, llanuras aluviales, zonas urbanas y costeras.

El MIKE FLOOD enlaza dinámicamente dos paquetes de programas independientes, el MIKE 11 (1D) y MIKE 21 (2D). El MIKE 11 resuelve las ecuaciones de Saint-Venant por medio de un esquema de diferencias finitas. Las brechas en presas se pueden modelar mediante una estructura de "ruptura de presa". El crecimiento de la brecha se puede describir por series de tiempo para el ancho de la brecha, el nivel de la cresta y la pendiente lateral. También está disponible un modelo de erosión basado en la ecuación de transporte de sedimentos de Engelund-Hansen. El flujo de ruptura se puede calcular mediante dos conjuntos de ecuaciones: el conjunto estándar se basa en las ecuaciones para el flujo a través de una estructura genérica (pérdidas Borda) y el conjunto alternativo se obtuvo a partir del modelo NWS DAMBRK.

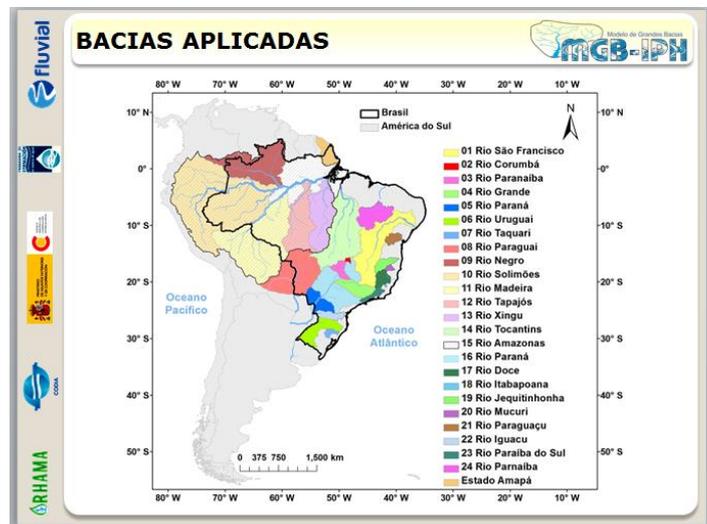
La versión "clásica" de MIKE 21 utiliza un formato de grilla rectangular y resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas mediante un esquema de diferencias finitas. Es capaz de manejar inundaciones y estiaje, rugosidad superficial que varía espacialmente, viscosidad y turbulencia, fuerzas de Coriolis y fricción del viento.

1.3.3 MGB Modelo de Grandes Bacías

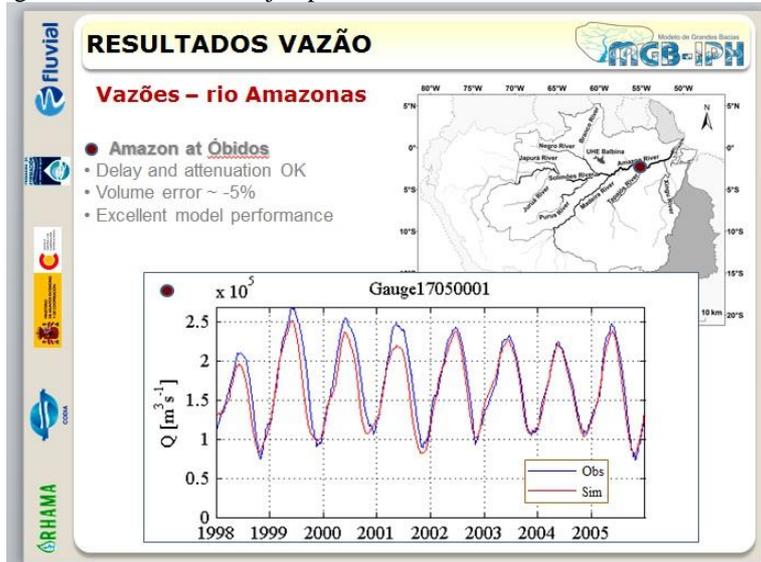
El Modelo de Grandes Bacías (MGB) o Modelo de Grandes Cuencas ($A > 10000 \text{ km}^2$), es un programa computacional desarrollado en el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) de la Universidad de Rio Grande do Sul, Brasil por Walter Collischonn. Tiene módulos de simulación hidrológica e hidrodinámica con interfaz gráfica y submodelos como simulación de calidad de agua y sedimentos.

El MGB es un modelo matemático distribuido de base física-conceptual, simulando los procesos de transformación de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales a lo largo de los ríos. Utiliza como parámetros de entrada, datos meteorológicos como temperatura, humedad relativa, insolación, precipitación, y características de la cuenca. Los datos de salida son los de humedad de suelo y caudal. El tránsito de caudales es realizado por medio del método Muskingum-Cunge, y para el tránsito hidrodinámico unidimensional resuelve las ecuaciones de Saint Venant.

La figura 19 muestra las cuencas hidrológicas en las cuales se han aplicado el modelo MGB.



En la figura 19 se muestra un ejemplo de simulación de la cuenca del Río Amazonas.



En la figura 20 se muestra un ejemplo de simulación de la cuenca del Río Amazonas.

1.3.4 SOBEK

SOBEK es una potente suite de modelado para el pronóstico de inundaciones, optimización de sistemas de drenaje, control de sistemas de riego, diseño de desbordamiento de alcantarillado, morfología del río, intrusión de sal y calidad del agua superficial. Los módulos dentro de la suite de modelado SOBEK simulan los flujos complejos y los procesos relacionados con el agua en casi cualquier sistema. Los módulos representan fenómenos y procesos físicos de manera precisa en sistemas de red unidimensionales (1D) y en cuadrículas horizontales bidimensionales (2D).

El software ha sido desarrollado en conjunto por Deltares y Delft Hydraulics, y se puede descargar de la página web: www.deltares.nl/en/software/sobek/.

SOBEK es un paquete de software integrado para la gestión fluvial, urbana o rural. Siete módulos del programa trabajan juntos para dar una visión general de los sistemas de vías fluviales manteniendo el control. Su marco integrado también significa que SOBEK puede vincular los sistemas de río, canal y alcantarillado para una solución total de gestión del agua.

Este programa es muy fácil de configurar y rápido de aprender, el mismo le guía en la obtención de las descripciones correctas del modelo. La interfaz gráficamente orientada hace que sea más fácil de usar que otros tipos similares de software. SOBEK está diseñado para interactuar con su software existente. Puede descargar información de una variedad de formatos de datos estándar y sistemas GIS. SOBEK se basa en tecnología informática de alto rendimiento, esto significa que puede manejar redes de agua de cualquier tamaño - grandes o pequeñas.

SOBEK 1D2D es un paquete de software integrado que permite la construcción de modelos complejos mediante la integración dinámica de los componentes 1D (unidimensionales) de SOBEK-Rural, SOBEK-Urban y SOBEK-River, y los componentes 2D (bidimensional) de SOBEK Overland Flow (antes conocido como Delft-FLS).

SOBEK 1D (Rural, Urban and River) resuelve las ecuaciones de Saint-Venant por medio de un esquema de diferencia finita. Las brechas y roturas de presas se pueden modelar mediante una compleja "presa del río", con propiedades dependientes del tiempo. El crecimiento de la brecha se puede describir por series de tiempo para el ancho de la cresta y el nivel de la cresta. Se obtiene el flujo de ruptura a partir de las ecuaciones de flujo de vertedero.

SOBEK 2D (Overland Flow) utiliza una grilla rectangular para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas mediante un esquema de diferencias finitas, similar al utilizado por SOBEK 1D. SOBEK 2D es capaz de manejar inundaciones y estiajes, rugosidad de la superficie espacialmente variable y fricción del viento. También contiene un módulo de "rotura de presa", capaz de describir el crecimiento de la brecha por medio de ecuaciones empíricas de crecimiento de brechas.

Anexo 2: Selección de un modelo estocástico y uno dinámico

2.1 Introducción

A fin de proceder a definir las herramientas de modelación a ser utilizadas en el Sistema de Pronósticos de caudales y niveles en el río Paraguay y su cuenca, se tomó en consideración la descripción detallada efectuada en el Anexo 1: Revisión de Metodologías existentes.

2.2 Selección del Modelo Estocástico

Atendiendo a la disponibilidad de datos hidrométricos en varias estaciones en el río Paraguay y a las herramientas que ya se utilizan en el país, se establece como prioridad la utilización de los modelos estadísticos de correlación y la comparación de hidrogramas en base a una clasificación de datos anuales en años muy húmedos, húmedos, secos y muy secos.

También se evaluará la alternativa de utilización de parámetros climáticos ya utilizados en forma experimental por David Rojo en la DMH Dinac, conforme se describió en 1.4.2 del Anexo 1.

En conclusión, y en base a la experiencia regional se procederá a utilizar los métodos estadísticos de correlación de hidrogramas y la correlación de caudales y niveles con parámetros hidroclimáticos.

2.3 Selección del Modelo Hidrodinámico.

En base a la descripción detallada de cada una de los paquetes de modelación disponibles en el mercado y su accesibilidad, se presenta en la Tabla 2 una comparación de cada uno, a fin de proceder a seleccionar el que más se adecua a las condiciones del proyecto.

Tabla 2: Comparación de Plataformas de Modelación Hidrodinámica-Hidrologica

<u>Características Modelos</u>	HEC	MIKE	MGB	SOBEK
<u>Desarrollador</u>	USACE	DHI	IPH-UFRGS	<u>Deltares</u>
<u>Sistema Operativo</u>	Windows, Solaris, Linux	Windows	Windows	Windows
<u>Idioma</u>	<u>Inglés</u>	<u>Inglés</u>	<u>Portugués</u>	<u>Inglés</u>
<u>Licencia</u>	<u>Dominio Público</u>	<u>Propietario/Pago</u>	<u>Dominio Público</u>	<u>Propietario/Pago</u>
<u>Código Abierto</u>	No	No		No
<u>Manuales y Referencias</u>	Si	Si	Si	Si
<u>Interface gráfica para entrada de datos -visualización resultados</u>	Si	Si	Si	Si
<u>Integración SIG</u>	Si	Si	Si	Si
<u>Calibración Automática</u>	Si	Si	Si	Si
<u>Modelación hidrológica agrupada y distribuida</u>	Si	Si	<u>Distribuida</u>	Si
<u>Simulación Hidrodinámica 1D</u>	Si	Si	Si	Si
<u>Simulación Hidrodinámica 2D</u>	Si	Si	No	Si
<u>Entrenamiento y Soporte Técnico</u>	<u>Por contrato</u>	<u>Por contrato</u>	<u>Por contrato</u>	<u>Por contrato</u>

Conclusiones para la selección del paquete hidrodinámico:

Se selecciona el paquete HEC del Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (USACE), el cual incorpora el modelo hidráulico (hidrodinámico) HEC RAS y el modelo Hidrológico HEC HMS, atendiendo a los siguientes criterios:

- a) Capacidad de acople del RAS y HMS mediante una base de datos única y que se dispone junto a los programas, DSS con el cual se administran los datos observados y simulados.
- b) El paquete HEC es de DOMINIO PÚBLICO.
- c) El HEC está respaldado por el USACE, financiado por organismos públicos de los EEUU, con profesionales dedicados en un Centro de Hidrología.
- d) HEC está recomendado por el Federal Highway Administration para uso en vías de comunicación en los EEUU.
- e) El HEC RAS presenta la ventaja sobre el MGB en que considera en forma directa la geometría del cauce, elemento clave para el sistema de pronósticos
- f) El HEC RAS ya fue utilizado con éxito en modelaciones en el país para los ríos Pilcomayo (MOPC), Yguazú (ANDE), Tacuarí (EBY), además de las experiencias en las Binacionales sobre el río Parana.
- g) El Manual de Drenaje del MOPC recomienda el uso del HEC para los diseños hidrológicos e hidráulicos en vías de comunicación.
- h) El equipo de investigación del proyecto ya cuenta con experiencia en el uso del Paquete HEC.

Referencias

- Modelacion Hidrodinámica del Rio Paraguay, Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental, MOPC- Compañía del Rodano, Francia, 2005
- Desarrollo de un sistema experto para la predicción de caudales medios mensuales en Colombia. Julián Rojo. PARH-UNAL. Universidad Nacional de Colombia
- Sobre el pronóstico del rio Paraguay. Julián David Rojo Hernández – I.C. MSc. PhD. (c) Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia.
- Estudio de crecidas del Río Paraguay. De Egea, J.M. Cazó, E. Tesis de Grado. FIUNA 1998
- U. S. Army Corps of Engineers (2000). “Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual”.

-U. S. Army Corps of Engineers (2009). “HEC Data Storage System User’s Manual”.
Version 2.0.

-US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC RAS - River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*, California.

-US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC RAS - River Analysis System: User`s Manual*.
Davis, California.

-Entidad Binacional Yacyreta (1984). Modelo Matemático Hidrométrico de los ríos Paraná
y Paraguay.

-TEORIA Y PROBLEMAS DE ESTADISTICA - Murray R. Spiegel, Ph. D. Libros
mcgraw-Hill de Mexico, S.A de C.V.

-GUIDE TO HYDROLOGICAL PRACTICES - World Metereological Organization -
ISBN 92-63-15168-7

-HIDROLOGIA BASICA I (Edición revisada) - Ing. Henry Jimenez E. – Universidad
del Valle - Facultad de Ingeniería - Departamento de mecánica de fluidos y C.T. -
Cali 1992.

Anexo 3: Sistematización de datos (reporte de avance)

3.1 SISTEMATIZACION DE DATOS

Como primer paso para el desarrollo de este proyecto, se identificó la Red de estaciones hidrométricas disponibles, en territorio paraguayo, así como el estudio de las series de datos disponibles. La información recabada se describe a continuación.

Existen 25 estaciones en territorio paraguayo, en las cuales se puede observar que 9 de ellas cumplen con las condiciones básicas para ser usadas en el proyecto: cota del cero hidrométrico referido a coordenadas absolutas y serie de datos mayores a 20 años.

Las cotas de los ceros de las estaciones hidrométricas existentes a lo largo del Río Paraguay, en el trecho del proyecto, no están referidas altimétricamente a un mismo origen. Dada la importancia que tienen estos valores para el Proyecto y no siendo posible realizar un trabajo de amarre dentro del presente estudio, se ha visto la necesidad de analizar y complementar toda la información existente en varios trabajos con relación a este aspecto.

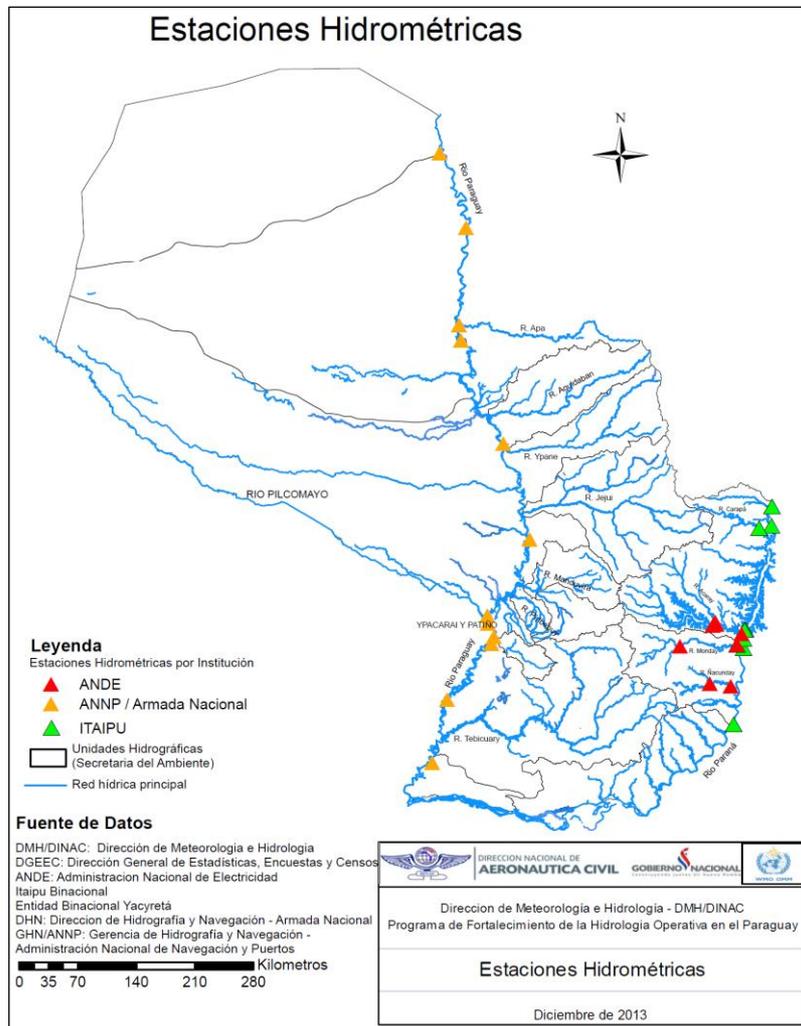


Figura 5: Ubicación de las estaciones hidrométricas ANNP.

Las fuentes consultadas fueron:

- Estudio de Zonificación de áreas inundables realizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional para el comité de Emergencia Nacional
- Anuario hidrográfico de la ANNP en todo el tramo del Proyecto
- En el tramo Norte:
 - a. Estudio de relacionamiento entre los datos de nivelación paraguayo y brasilero.
 - b. Estudio de navegabilidad del Río Paraguay al Norte de Asunción ANNP- PNUD.
- En el tramo Sur:
 - a. Estudio de navegabilidad del Río Paraguay al Sur de Asunción ANNP-PNUD-Sir William Halcrow & Partners.
 - b. Estudio de crecidas Ríos Paraná y Paraguay EBY- Motor Columbus.
 - Planos de la ANDE de los cruces de líneas eléctricas de los ríos Paraguay y Paraná, especialmente la línea 220kv – Valle mi – Loma Plata que cruza el río Paraguay en la zona de Pto. Casado.

Según el análisis las cotas de los ceros de las escalas están referidas:

1. Tramo Norte, desde Bahía Negra hasta la desembocadura del Río Apa,
 - a. Estaciones Hidrométricas en territorio brasilero: al IBGE (Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística)
 - b. Estaciones Hidrométricas en territorio paraguayo a nivelaciones deducidas por niveles de agua.
2. Tramo Medio, desde la desembocadura del Río Apa hasta la desembocadura del Río Pilcomayo, al IGM paraguayo
3. Tramo Bajo, desde la desembocadura del Río Pilcomayo hasta su confluencia con el Río Paraná.
 - a. Estaciones Hidrométricas en territorio paraguayo: al IGM paraguayo.
 - b. Estaciones Hidrométricas en territorio argentino: al IGM argentino.

Se anexa una tabla donde se especifica los kilometrajes y las cotas de los ceros de cada estación hidrométrica. La misma se encuentra publicada en el trabajo de Zonificación de Áreas inundadas del Paraguay.

Para la sistematización de datos, las actividades principales que están siendo desarrolladas son:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCION										
FACULTAD DE INGENIERIA										
Departamento de Desarrollo de Investigaciones										
PROYECTO : " ZONIFICACION DE AREAS INUNDABLES DEL RÍO PARAGUAY										
CONVENIO FONPLATA OCT/RC/ PAR-4/96										
RED DE ESTACIONES HIDROMETRICAS										
COTAS DE LOS CEROS DE LAS ESCALAS HIDROMETRICAS										
	ESTACIÓN	PAIS	KM	NORTE	ESTE	ANUARIO	IBGE	PNUD	HALCROW	ADOPTADO
1	BAHIA NEGRA	py	1250	7762332	378173	87,60	* 76,69	76,69		76,69
2	FUERTE OLIMPO	py	1087	7672991	409757		* 72,53	72,67		72,67
3	FECHO DOS MORRO	br	1028				71,75			72,50
4	PORTO MURTINHO	br	995				70,75			71,46
5	LA ESPERANZA	py	935	7562752	395806	76,80	* 70,40	70,74		* 70,74
6	VALLEMI	py	912				* 70,39			* 70,39
7	LA VICTORIA	py	904	7536455	403482	75,60	* 69,55	70,26		70,26
8	FONCIERE	py	874							
9	PINASCO	py	832			73,00	* 67,93			68,64
10	ARRECIFE	py	810							
11	PUERTO COOPER	py	769				* 66,35			67,06
12	CARAYA VUELTA	py	750							
13	CONCEPCION	py	700	7411412	453682	* 64,42	64,42	64,42		64,42
14	TACURUPYTA	py	647				* 62,09			62,80
15	ANTEQUERA	py	588			61,12	60,41	61,12		61,12
16	ROSARIO	py	537	7295690	485348	58,34	57,63	58,34		58,34
17	VILLA REY	py	492							
18	OLIVARES	py	444							
19	PIQUETE CUE	py	420			55,01	54,30	55,01		55,01
20	VIÑAS CUE	py	399	7209324	441719		54,29			
21	ASUNCION	py	390	7204353	435513	54,04	53,33	54,04	54,04	54,04
22	PILCOMAYO	ar	375						53,31	53,31
23	BOUVIER	ar	360						* 52,72	52,72
24	VILLETA	py	353	7178993	442315	52,86			52,86	52,86
25	GUYRATÍ	py	340			51,32			51,32	51,32
26	PARAISO	py	282			49,99				49,99
27	DALMACIA	ar	274						*50,90	49,95
28	ALBERDI	py	209	7103591	386408					
29	FORMOSA	ar	207						48,19	48,19
30	PILAR	py	89	7029095	369738	46,46			46,46	46,46
31	BERMEJO	ar	65						45,87	45,87
32	HUMAITA	py	49	7005447	350279				45,57	45,57
33	ITA PIRU	py	0	6980719	344949				44,07	44,07

Observaciones: **IBGE(Br)=IGM(Pa) - 0,71 m**

* Cota de Concepcion corregida

3.1.1 Ajuste de las posibles curvas de distribución a los datos observados de alturas máximas anuales en varias estaciones.

Se eligieron las distribuciones más frecuentemente utilizadas para estimaciones de máximos caudales (aunque en este estudio se utilizaron alturas máximas): Normal, Log Normal, Gumbel y Log Pearson III. La metodología del ajuste se hizo de acuerdo a la bibliografía clásica sobre el tema, excepto para la distribución Log Pearson III, cuyo ajuste final se realizó buscando minimizar la distancia entre la distribución de los datos observados y la distribución teórica para los valores mayores de las alturas.

Distribuciones probabilísticas utilizadas

En este apartado se describe la metodología utilizada para el ajuste de las curvas teóricas a los datos observados y para la construcción de sus correspondientes gráficos. La principal bibliografía consultada fue: FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE, de Francisco Javier Aparicio Mijares e HIDROLOGÍA APLICADA de Ven Te Chow.

a) Valores Observados

Para las alturas, se definieron intervalos de 50 centímetros, tomando como puntos medios de dichos intervalos, los valores: 0, 50, 100, 150, etc. Dando los intervalos (-25,25], (25,75], (75,125], (125,175], etc., respectivamente.

Con estos intervalos se halló la distribución de frecuencias de los Valores Observados. Con las frecuencias halladas y los puntos medios de los intervalos se graficó la curva de Valores Observados.

b) Normal

La distribución Normal o de Gauss tiene la siguiente función de Densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

y la siguiente función de Distribución:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (1)$$

En estas fórmulas, $\bar{\leftarrow}$ es la media aritmética y σ es la desviación típica:

Para calcular la función de Densidad $f(x)$ y su correspondiente función de Distribución

$$z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (3)$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

$F(x)$ se debe utilizar la Normal Tipificada que tiene media $\bar{\leftarrow} = 0$ y desviación típica $\sigma = 1$. La función de Densidad $f(z)$ y la de Distribución $F(z)$ de la Normal Tipificada se encuentran tabuladas para distintos valores de z , donde:

Con los valores de $f(z)$ y $F(z)$, utilizando la transformación de la fórmula (3) se puede encontrar los valores de $f(x)$ y $F(x)$ para cualquier valor de x .

También existen fórmulas aproximadas para F(z) y por otro lado casi todas las planillas electrónicas tienen como funciones incorporadas a f(x) y F(x) para cualquier valor de la media \bar{x} y de la desviación típica σ .

Para calcular las frecuencias esperadas según la Distribución Normal, se calcula la probabilidad p de cada uno de los intervalos definidos anteriormente.

Luego se multiplica este valor hallado, por el número total de datos observados, para obtener de esa manera las frecuencias esperadas:

$$f = p.n \quad (4)$$

Estas son las frecuencias esperadas que se grafican para cada punto medio de los intervalos

OBSERVACIÓN: es importante tener en cuenta que las fórmulas mencionadas hasta acá se refieren a la Población y no a una Muestra. Como nuestro caso se trata de mediciones hechas a lo largo del tiempo, y estas pueden ser infinitas, el conjunto de datos disponibles debe considerarse como una muestra. En este caso, los parámetros que no se conocen deben ser estimados por la media aritmética y la desviación típica muestrales:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Donde n es el tamaño de la muestra, o sea la cantidad de datos disponibles en esa estación.

c) LOG NORMAL

El ajuste de esta distribución es absolutamente igual al de la Normal que se acaba de describir, sólo que previamente se debe calcular el logaritmo de cada uno de los datos antes de hacer el ajuste [$y=\log(x)$]. Se puede usar logaritmos decimales o naturales, el resultado es el mismo ya que el paso de logaritmos de una base a otra es una transformación lineal y la distribución no varía cuando se hacen transformaciones lineales. En nuestro caso se usaron logaritmos decimales. La media y la desviación típica para hacer el ajuste deben calcularse con los logaritmos de los datos, no con los datos originales.

Para calcular la probabilidad de cada uno de los intervalos ya definidos, por ejemplo para el intervalo [a,b], se calcula la probabilidad del intervalo [$\log(a),\log(b)$] en la distribución normal ajustada. Luego se calcula la frecuencia esperada de la misma manera que antes, es decir con la fórmula (4).

d) GUMBEL

La distribución de Gumbel tiene las siguientes funciones de densidad y de distribución:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (8)$$

$$f(x) = \alpha.e^{-\alpha(x-\beta)} \quad (7)$$

Donde α y β se estiman mediante las fórmulas:

Los coeficientes 1,2825 y 0,45 pueden variar si la muestra es pequeña.

La probabilidad p de un intervalo $[a,b]$ se halla mediante la diferencia $F(b) - F(a)$.

La frecuencia esperada de cada intervalo se halla de la misma manera que en los casos anteriores.

$$\beta = \bar{X} - 0,45 S \quad (\text{donde } \bar{X} \text{ es la media aritmética de los datos originales})$$

$$\alpha = \frac{1,2825}{S} \quad (\text{donde } S \text{ es la desviación típica de los datos originales})$$

e) Log Pearson III

Para hallar los valores esperados según la distribución Log Pearson III se ajusta la distribución Pearson III a los logaritmos de los datos originales. Por este motivo, se verá como se realiza el ajuste con esta última distribución, ya que después sólo habrá que ajustarla a los logaritmos de los datos originales.

La distribución Pearson III tiene como funciones de densidad y de distribución, las

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x \left\{ \frac{t - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{t - \delta_1}{\alpha_1}} dt$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}}$$

siguientes:

Donde los parámetros siguientes se estiman mediante las tres ecuaciones siguientes:

$$\bar{x} = \alpha_1 \beta_1 - \delta_1$$

$$S^2 = \alpha_1^2 \beta_1$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta_1}}$$

Donde \bar{x} y S son la media aritmética y la desviación típica e los datos y γ es el Coeficiente de Asimetría o de Sesgo que se define como:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n S^2}$$

Haciendo la substitución:

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \quad (9)$$

Se puede probar que la función $F(y)$ es una distribución chi cuadrada con $2 \otimes 1$ grados de libertad y $\chi^2 = 2y$. De esta manera la probabilidad p de un intervalo $[a,b]$ se calcula hallando primero y_a y y_b mediante la fórmula (9), luego utilizando la distribución χ^2 con $2 \otimes 1$ grados de libertad se calcula la probabilidad mediante la diferencia $F(2y_b) - F(2y_a)$. A partir de allí se procede como en los casos anteriores.

El ajuste de una distribución de Log Pearson III a veces necesita alguna modificación del parámetro τ_1 . Se recomienda fijar este parámetro a ojo, como la ordenada al origen en un gráfico de caudal contra período de retorno. En este estudio se prefirió realizar el ajuste

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (10)$$

manual mediante la utilización de la función χ^2 , buscando el valor del parámetro τ_1 que diese la función de densidad que mejor se ajustase a los datos observados. La función χ^2 utilizada fue la siguiente:

Donde O_i es la frecuencia de los valores observados d

el intervalo i y E_i es la frecuencia esperada para ese mismo intervalo según la distribución ajustada. Se utilizó esta metodología porque en definitiva lo que se busca es seleccionar de una familia de funciones la que mejor se ajusta a los datos, y el método de la chi cuadrada es uno de los más utilizados. La variable que se hizo variar para encontrar esa curva de mejor ajuste es el parámetro.

La función chi cuadrada no se utilizó para todos los intervalos, sino solamente para los que correspondían a valores mayores, ya que éstos son los que realmente interesan al estudio realizado.

3.1.2 Primeros resultados obtenidos

Se muestra en el siguiente gráfico, que corresponde a la ciudad de Asunción. Se consignan los datos observados y las cuatro curvas ajustadas, para Asunción.

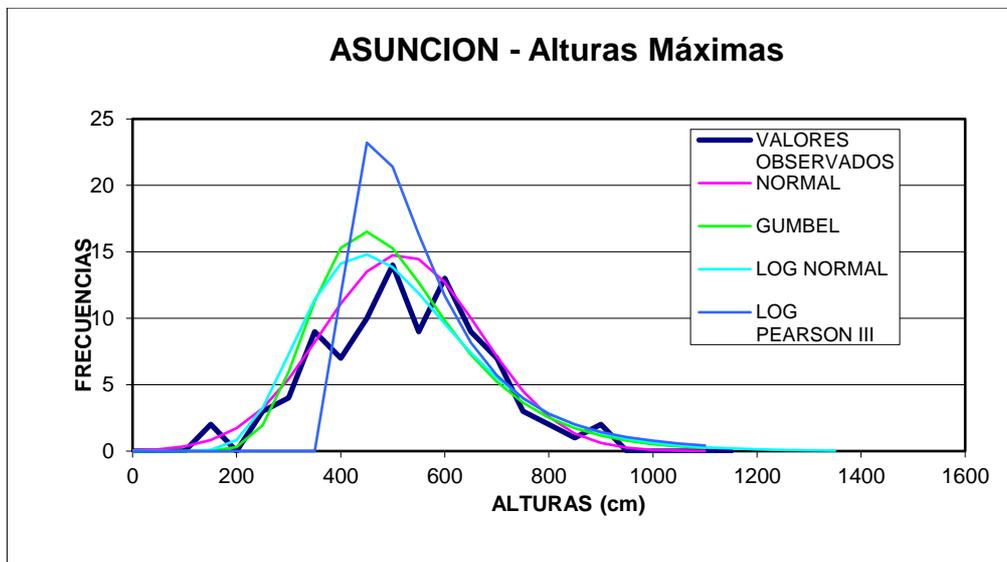


Figura 6: Gráfico de frecuencias vs. Alturas para la ciudad de Asunción.

Con estos gráficos ya se tuvo una primera impresión del comportamiento de los distintos modelos y de cuál podría ser la distribución teórica que presentaba el mejor ajuste. Este estudio se está realizando para cada una de las estaciones seleccionadas para el análisis estadístico.

Un resultado importante que se obtuvo en esta etapa es que el cálculo de los tiempos de recurrencia no sólo depende de los datos sino también de la cantidad de datos. La estadística indica que cuanto mayor es la muestra, más confiables son las estimaciones de los parámetros de la población. El resultado obtenido obligó a estudiar la posibilidad de estimar valores faltantes en las estaciones que tuviesen pocos datos, procurando llegar a la mayor cantidad posible.

Determinación del modelo que mejor se ajuste a los datos observados en cada una de las estaciones.

Una vez obtenidas las cuatro distribuciones teóricas ajustadas, se buscó cual era la mejor en cada estación. Hay que tener en cuenta que el comportamiento de las máximas alturas está muy relacionado con la topografía del terreno y que por tanto su distribución estadística puede ser diferente de estación en estación. Esta fue la razón por la que no se impuso la restricción de utilizar un solo modelo para todas las estaciones.

La determinación de la curva de distribución que mejor se ajustaba se hizo utilizando una adaptación de las pruebas Chi Cuadrada y de Kolmogorov-Smirnov. En el primer caso se calculó la chi cuadrada entre los datos observados y cada una de las cuatro distribuciones teóricas, obtenidos cuatro valores de chi cuadrada y categorizando a las curvas teóricas en ranking de 1 a 4 correspondiendo a valores crecientes de la chi cuadrada. Con la prueba de Kolmogorov-Smirnov se calculó la máxima separación entre las funciones de Distribución $F(x)$ de los datos observados y de cada una de las curvas teóricas, categorizándolas también en un ranking de 1 a 4 correspondiendo a valores crecientes de la máxima separación. Una vez obtenidas las dos categorizaciones se tomó como la distribución teórica que mejor ajustaba a los datos a aquella cuyo promedio de categorizaciones era el mejor de los cuatro promedios.

S S

: Año sin dato

D D

: Datos dudosos

M M

: Datos modificados

3.3 MONITOREO DEL NIVEL DE AGUA

En el presente apartado se muestra a modo de ejemplo las actividades realizadas en cuanto al análisis estadístico y monitoreo del nivel de agua registrado.

Se tienen datos diarios anuales de las estaciones que figuran en la tabla anterior. Estos datos se encuentran disponibles en formato Excel, en donde en cada hoja se tienen los datos diarios del nivel del río, con su respectivo limnigrama.

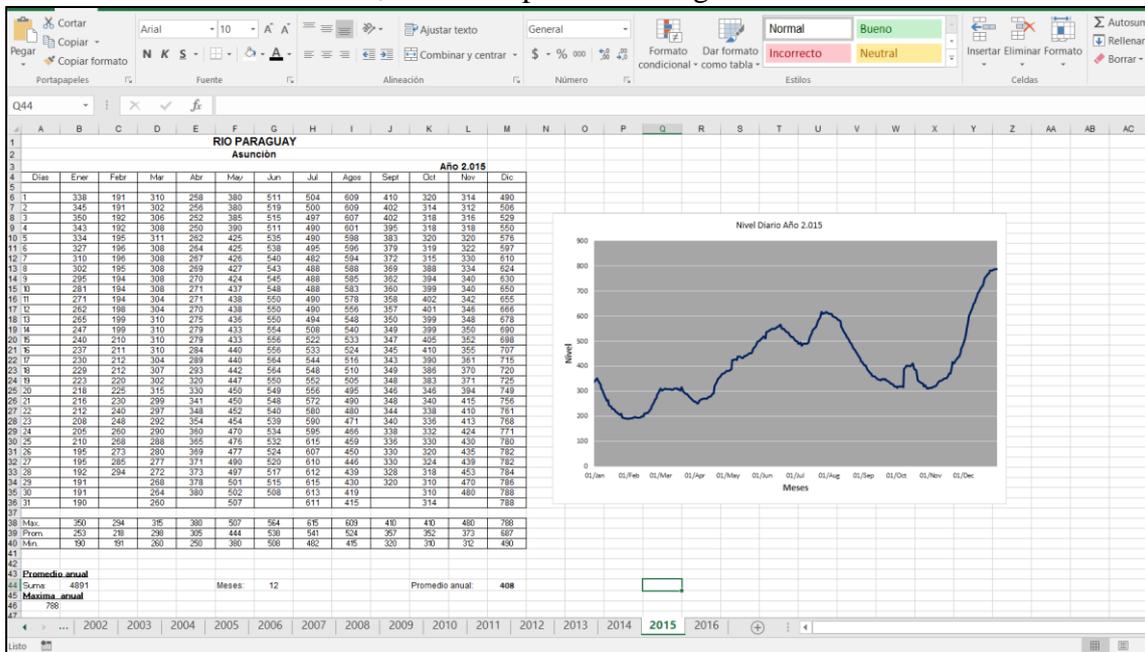


Figura 7: Ejemplo de formato de presentación de datos en Excel.

A continuación, se muestra limnigrama, es decir, el gráfico de niveles diario en un año para la estación de Asunción, correspondiente al año 2015.



Figura 8: Nivel Máximo Anual. Serie 1970-2013. Fuerte Olimpo

Del mismo modo, se tiene el formato tabular los mismos datos, de esta manera mediante funciones en Excel se pueden determinar rápidamente cual es el nivel máximo registrado en un determinado año, en el máximo mensual de toda la serie.

Como ejemplo, se ha optado por mostrar una tabla de una estación diferente. A continuación, se muestran todos los niveles registrados para Fuerte Olimpo, desde 1970 hasta el 2013. Se puede ver que el nivel máximo registrado ocurrió en junio de 1988, en donde el nivel del agua alcanzó los 9.60m a partir del cero hidrométrico de la regla.

Tabla 3: Nivel Máximo Anual. Estación Fuerte Olimpo.

AÑO/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	MAXIMO
1970	0	0	152	190	194	200	202	179	0	0	72	75	202
1971	150	161	186	186	190	150	124	63	4	0	61	103	190
1972	103	158	188	210	200	190	152	129	70	34	90	311	311
1973	316	257	259	258	248	253	248	207	118	54	154	268	316
1974	418	477	490	486	545	620	679	681	662	586	466	374	681
1975	378	341	356	423	438	436	470	470	450	379	250	234	470
1976	248	339	384	441	495	515	526	536	534	517	458	430	536
1977	564	574	571	600	648	684	684	665	625	597	528	500	684
1978	469	515	531	560	598	617	622	616	591	533	380	355	622
1979	459	527	652	816	902	901	882	826	745	631	500	373	902
1980	446	481	528	637	826	856	852	799	721	622	475	467	856
1981	507	555	566	591	613	655	662	656	625	552	434	412	662
1982	427	428	591	710	920	956	943	878	795	677	590	574	956
1983	645	668	738	726	780	778	751	710	656	591	483	434	780
1984	434	457	534	588	610	612	614	610	564	516	420	513	614
1985	547	570	666	740	823	824	818	780	712	637	519	336	824
1986	274	376	385	381	435	471	487	483	459	395	308	330	487
1987	329	422	476	523	566	591	600	595	551	440	286	259	600
1988	344	373	503	746	950	960	946	859	752	616	386	232	960
1989	398	615	631	692	761	813	814	789	771	712	626	468	814
1990	342	393	429	442	519	532	545	540	514	442	374	323	545
1991	329	340	422	506	607	670	690	689	652	573	431	381	690

AÑO/MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	MAXIMO
1992	441	416	553	649	724	718	720	719	724	721	668	631	724
1993	584	580	557	584	583	597	601	597	562	460	320	255	601
1994	277	330	350	371	440	485	443	440	403	318	229	327	485
1995	656	614	573	650	767	802	804	782	716	615	526	405	804
1996	403	403	379	416	505	510	530	530	506	427	317	294	530
1997	317	451	475	568	636	700	712	703	671	611	500	475	712
1998	421	367	406	439	448	467	468	499	467	384	287	316	499
1999	363	351	385	421	445	465	465	455	388	246	135	184	465
2000	169	200	327	394	442	472	478	476	428	300	207	235	478
2001	251	267	307	303	315	331	334	327	249	171	303	315	334
2002	382	440	449	466	522	541	557	554	516	369	248	179	557
2003	234	339	405	456	515	572	584	584	582	541	427	389	584
2004	340	338	356	418	508	540	553	550	497	385	365	363	553
2005	420	479	515	509	489	506	507	488	424	322	395	432	515
2006	428	464	501	561	611	661	696	705	698	657	588	518	705
2007	524	665	639	603	620	631	632	625	563	359	258	371	665
2008	429	488	558	555	564	578	606	608	592	510	292	237	608
2009	258	325	333	332	351	380	415	423	409	362	308	326	423
2010	468	598	603	543	558	568	573	567	504	361	268	270	603
2011	345	485	632	696	739	769	789	790	760	675	456	269	790
2012	296	321	413	456	461	540	554	468	425	367	323	318	554
2013	346	367	391	627	540	575	630	587	559	513	360	320	630
Max	656	668	738	816	950	960	946	878	795	721	668	631	960

También se cuentan con gráficos de máximos anuales para toda la serie, que se muestra a continuación.

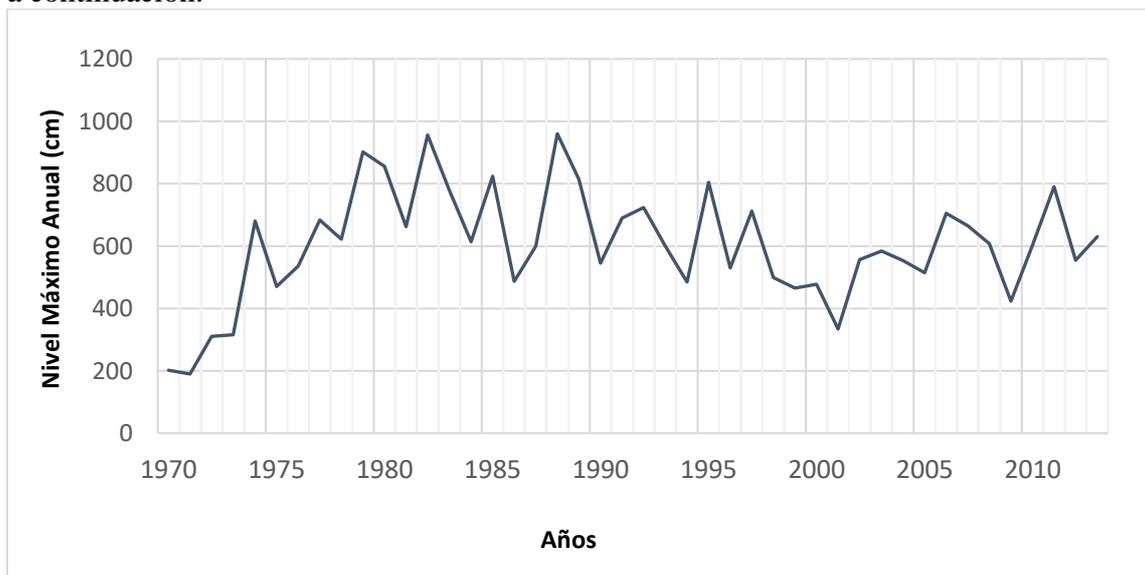


Figura 9: Nivel Máximo Anual. Serie 1970-2013. Fuerte Olimpo

Anexo 4: Datos de entrada al modelo

DATOS DE ENTRADA AL MODELO HIDROLOGICO

4.1 Datos de Elevación

Para realizar los análisis iniciales, se utilizó un Modelo de Elevación Digital de toda la cuenca del río Paraguay.

El modelo digital de elevación utilizado es el descargado gratuitamente de la página del CGIAR-CSI por el Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). El modelo utilizado fue el elaborado por la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de la National Geospatial Intelligence Agency (NASA). El mismo tiene una resolución espacial de 90m x 90m.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En la siguiente figura se ve la cuenca del río Paraguay (en lila) hasta su confluencia con el río Paraná. De fondo se observa el modelo digital de elevación. Los rangos de colores indican la elevación.

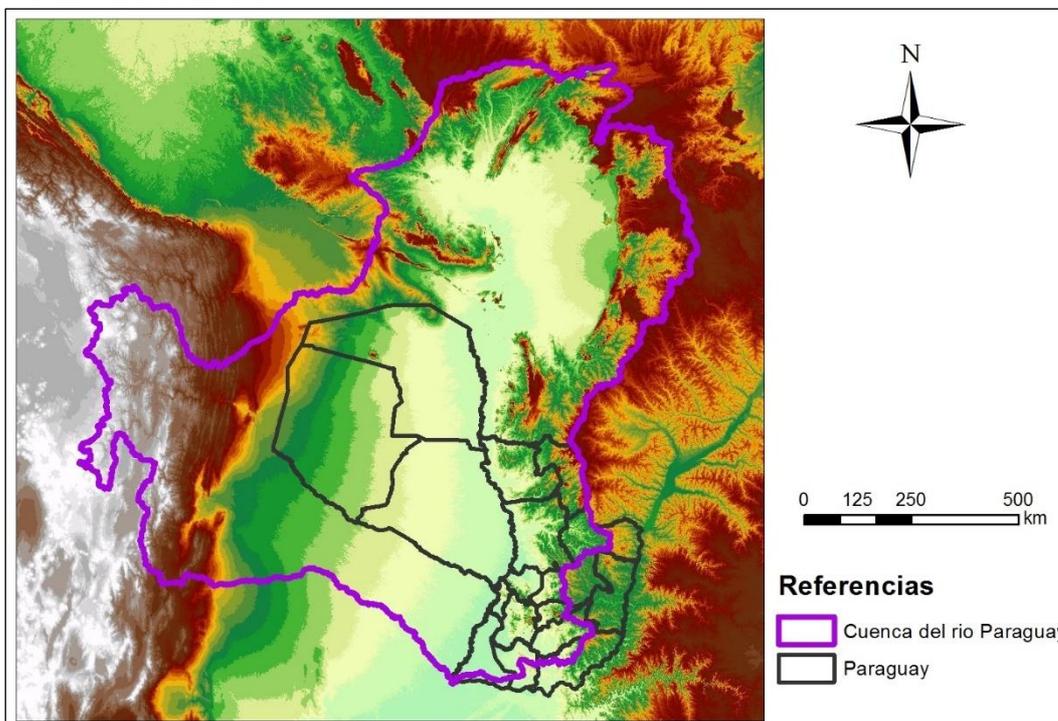


Figura 10: Modelo de Elevación SRTM 90x90.

Los datos distribuidos por la NASA o USGS contienen agujeros de datos inexistentes, donde el agua o las sombras evitan la cuantificación de la elevación. Estos generalmente son agujeros pequeños, sin embargo hacen los datos menos útiles, especialmente en campos de modelación hidrológica, a diferencia de los datos de elevación digital SRTM

provistos por el CGIAR-CSI, que han sido procesados para llenar los datos con huecos para facilitar el uso.

Los datos fueron descargados en formato ArcInfo ASCII, utilizándose varios cuadros que cubren todo el Paraguay, y parte de Brasil, Bolivia y Argentina, de esta forma asegurando que contenga en su totalidad el área de estudio, tal y como se muestra en la figura siguiente.

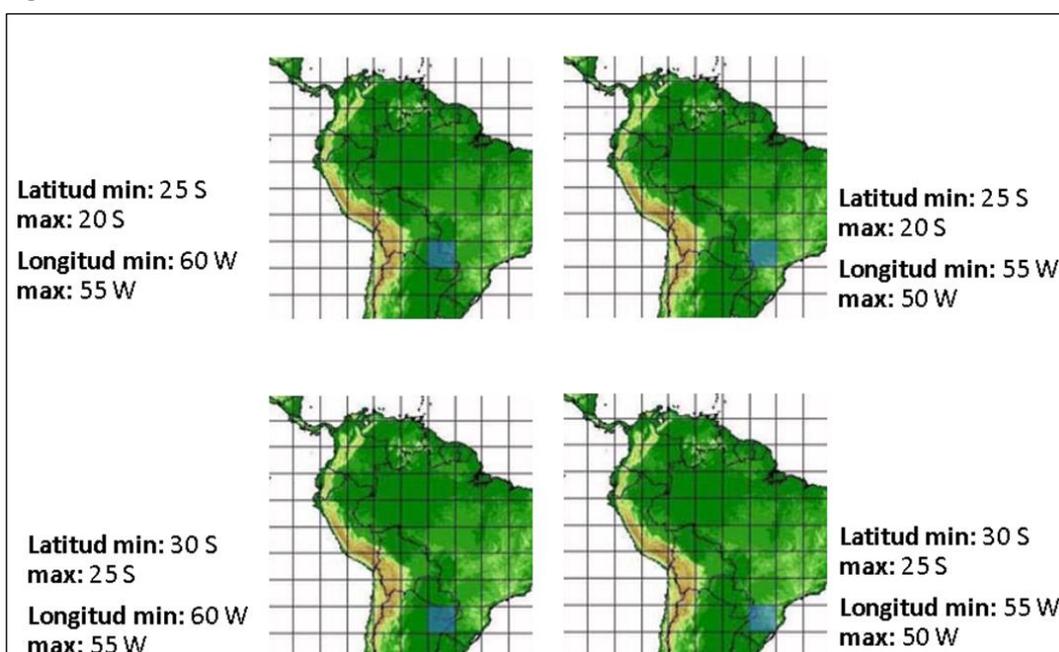


Figura 11: Ejemplo de la obtención del MDE. Fuente: CGIAR-CSI

Se deben unir los cuadros de MDEs que contienen al área de estudio, y realizar un mosaico completo de toda el área de interés.

4.2 Tipo de suelo

Para determinar el tipo de suelo para este estudio, se utilizaron dos fuentes. La primera es la clasificación taxonómica del suelo realizado para el proyecto PRUT, y la otra son las cargas digitales en formato raster denominadas *Soil Grids* de la FAO, cuya descarga es libre.

El mapa de tipo de suelo utilizado fue elaborado por el Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT) realizado en el año 1995, a solicitud del Gobierno del Paraguay, ejecutado directamente por el Banco Mundial (BIRF) en conjunto con la Dirección de Ordenamiento Ambiental (DOA) de la Subsecretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SSERNMA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería, actualmente Secretaría del Ambiente (SEAM).

Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra

El Estudio de Suelos de la Región Oriental del Paraguay en el marco del Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra (PRUT) se llevó a cabo a través del uso de ampliaciones de imágenes satelitales a escala 1:100.000, cuyo procesamiento y cartografía digital fue realizado por el "Earth Satellite Corporation", de Rockville, Md., EEUU, a partir del "Landsat Thematic Mapper" (TM) - conteniendo las bandas TM 3, 7 y 4, en órdenes azul, verde y rojo-; cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar a escala 1:100.000; trabajo de campo consistente en la descripción de perfiles de suelos de toda la Región Oriental y toma de muestras de suelos; análisis laboratoriales de las muestras de suelos e interpretación y procesamiento de toda la información recolectada. También se caracterizó el clima, la fisiografía-geomorfología y uso actual de la tierra. Este estudio permitió la elaboración de los mapas de Taxonomía de los suelos, de Capacidad de Uso de la Tierra y de Ordenamiento de la Tierra de la Región Oriental del Paraguay.

El proyecto tuvo como objetivo la realización de un estudio de reconocimiento de suelos y determinación de su capacidad de uso en la Región Oriental del Paraguay, a efectos de sentar las bases para la planificación racional del uso y manejo sustentable de este recurso y la promoción de su ordenamiento territorial. (López et al. 1995)

El mapa de suelos de la Región Oriental del país, producido en este estudio, contiene 349 unidades cartográficas, en donde los suelos que las componen pertenecen a 7 Ordenes, 13 Subórdenes, 28 Grandes Grupos y 58 Subgrupos, clasificados por el sistema "Soil Taxonomy", del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA, 1992). Las unidades cartográficas contienen información sobre el tipo de suelos de cada área, en particular, paisaje donde aparece cada suelo, material parental, clase textural, pendiente del terreno, drenaje, pedregosidad y rocosidad. Además, cada tipo de suelos se presenta descrito según sus características morfológicas, químicas, físicas y taxonómicas.

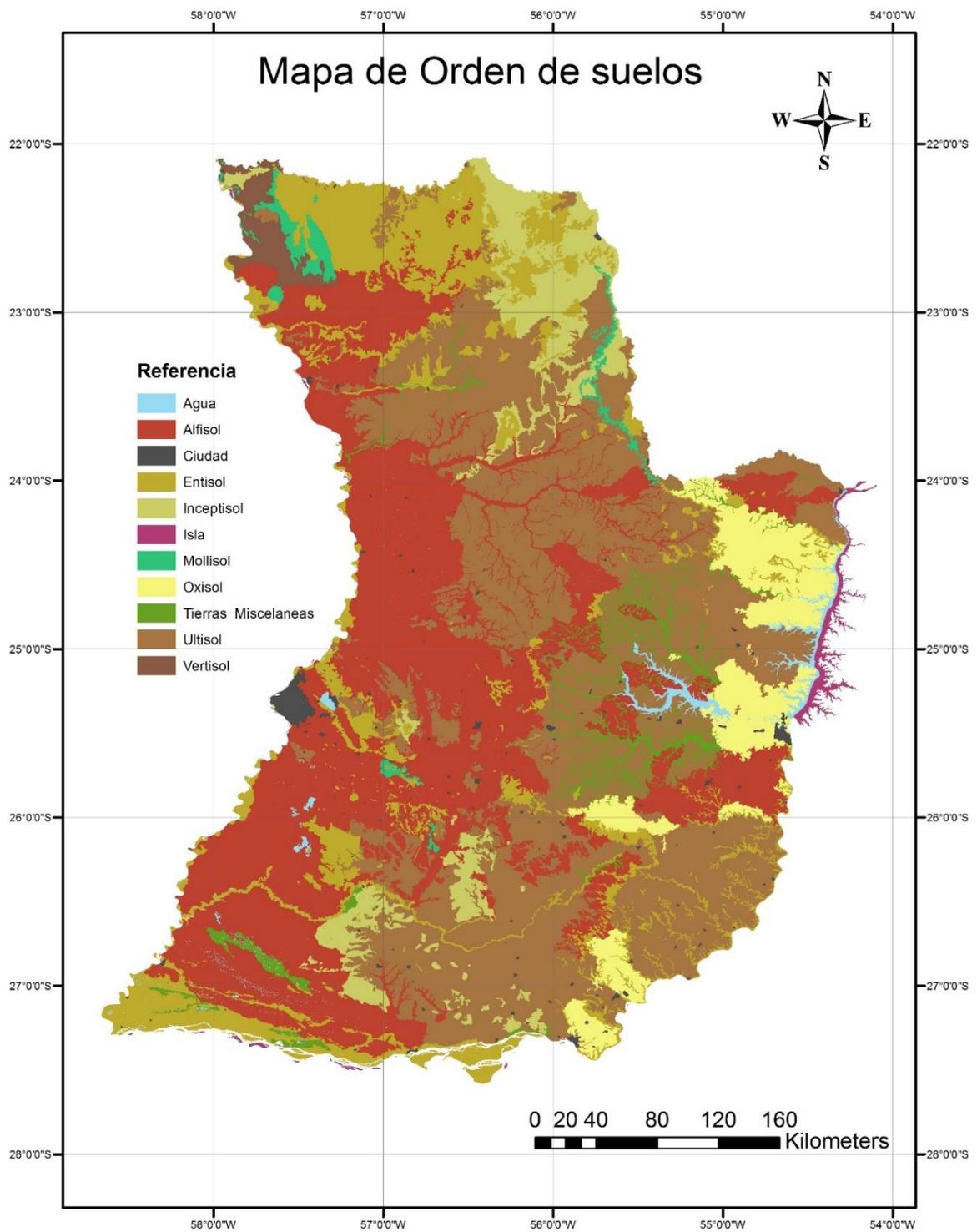


Figura 12: Mapa de Orden del suelo. Fuente: PRUT

Datos de la FAO

Como el PRUT, únicamente se encuentra disponible para la Región Oriental, se han analizado otras fuentes para acceder a la misma información para el modelo hidrológico.

De la página www.soilgrids.org se puede descargar gratuitamente información referidas al suelo, que se encuentra disponible para todo el mundo. Para este estudio en particular, se han descargado informaciones en formato raster, con píxeles de 250m de resolución. Los datos descargados constituyen la densidad aparente del suelo a nivel superficial y a diferentes profundidades. También se ha descargado datos que indican el porcentaje de contenido de arena, limo y arcilla del suelo en cada punto. Otros datos descargados corresponden a la profundidad estimada del techo roca entre otros.

4.3 Uso de suelo

Para determinar el uso de suelo actual de la cuenca, se realiza una clasificación de imágenes provistas por el satélite Landsat. Se descargaron varias escenas que cubrían en su totalidad a la cuenca a ser estudiada mediante en el modelo hidrológico. Las imágenes se encuentran en el sistema de coordenadas WRS (Worldwide Reference System).

El satélite Landsat representa la colección adquirida de forma continua más larga del mundo, de resolución moderada de la tierra, basado en datos espaciales de sensores remotos. Su mantenimiento y operación está a cargo de NASA en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Para realizar propiamente la clasificación de uso de suelo, se realiza el mosaico de las bandas de cada escena descargada. Luego se determina la mejor combinación de bandas para realizar una clasificación supervisada. Se estudia la posibilidad de determinar las siguientes clases en las cuencas a estudiar.

- Bosques
- Campos Naturales o Pastizales
- Tierras pecuarias y de cultivo
- Esteros y humedales
- Zonas Urbanas e Infraestructura

4.4 Datos de Precipitación

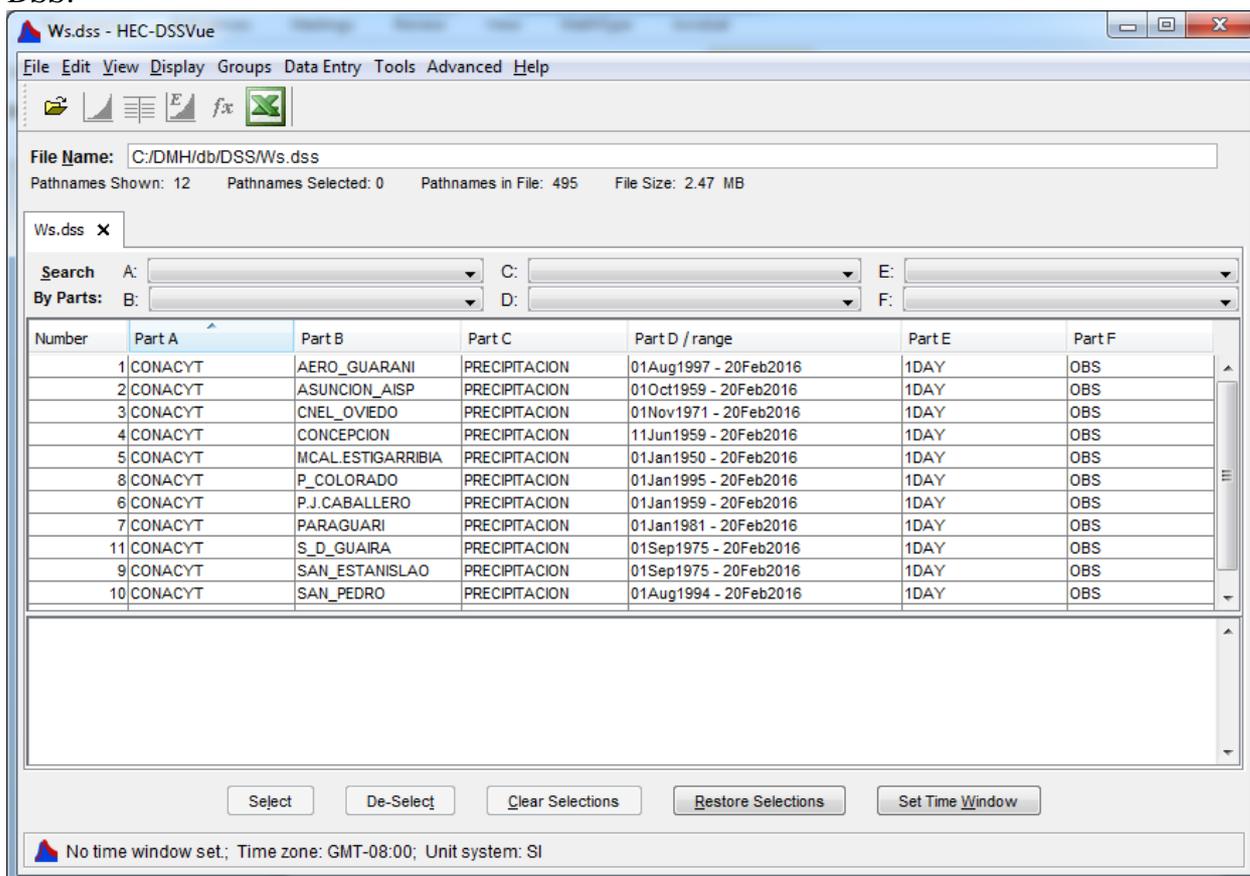
Los datos de precipitación que se utilizarán como fuente de datos principal para la implementación del modelo hidrológico corresponde a la red de estaciones meteorológicas de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). En una primera fase se recopilamos los datos y éstos fueron implementados en el sistema de base de datos Sistema de Almacenamiento de Datos, DSS (Data Storage System) del Centro de Ingenieros Hidrológicos, sin la validación de los datos recibidos, como ser la verificación de datos faltantes por ausencia de medición.

La siguiente tabla muestra las estaciones cuyos datos de precipitación de frecuencia diaria fueron recopilados y almacenados en la base de datos del proyecto.

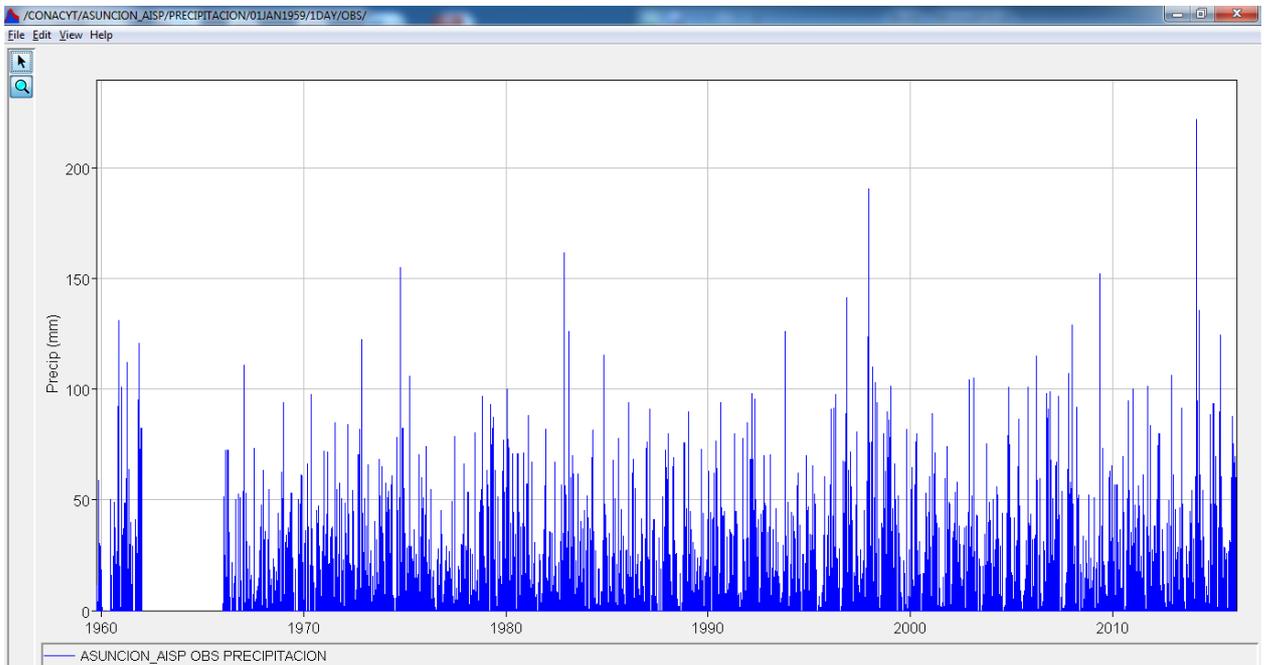
Código	Estación	Inicio	Final
86068	Mariscal Estigarribia	01-01-1950	31-12-2015
86097	Pedro Juan Caballero	01-01-1959	31-12-2015
86128	Pozo Colorado	01-01-1995	31-12-2015
86134	Concepción	11-06-1959	31-12-2015
86185	San Pedro	01-08-1994	31-12-2015

86192	San Estanislao	01-09-1975	31-12-2015
86210	Salto del Guairá	01-09-1975	31-12-2015
86218	Asunción Aeropuerto Silvio Pettirossi	01-10-1959	31-12-2015
86221	Paraguari	01-01-1981	31-12-2015
86233	Villarrica	01-01-1956	31-12-2015
86234	Coronel Oviedo	01-11-1971	31-12-2015
86246	Aeropuerto Guarani	01-08-1997	31-12-2015

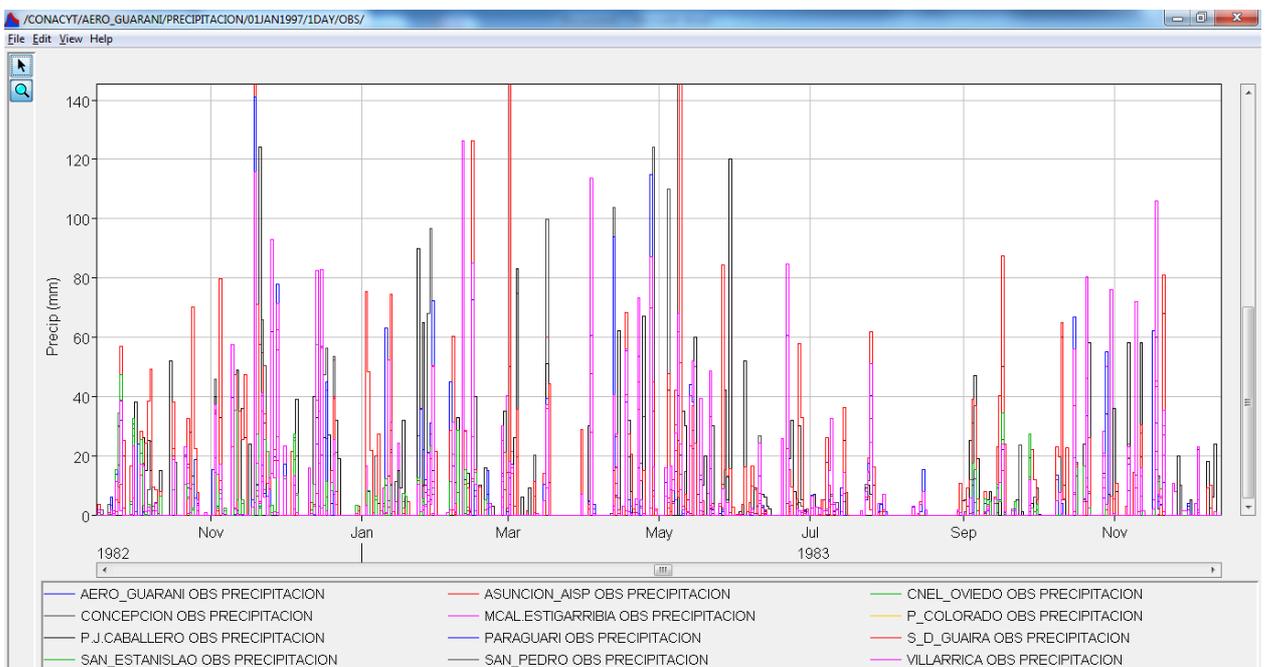
En la figura se muestra como ejemplo los datos almacenados en la base de datos HEC-DSS.



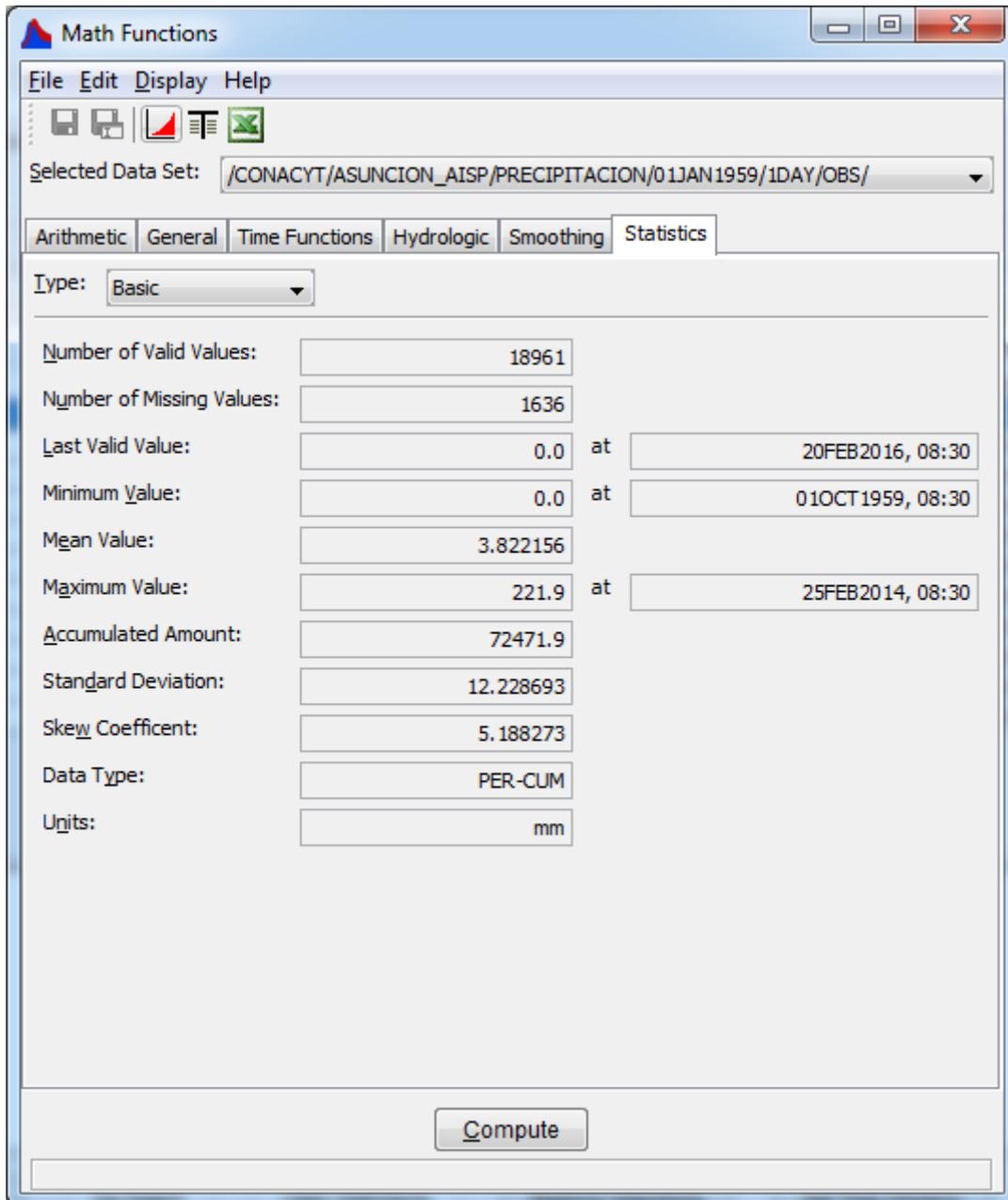
La siguiente figura es un ejemplo que muestra los datos existentes para Asunción correspondiente a la estación del Aeropuerto Internacional Silvio Pettirossi.



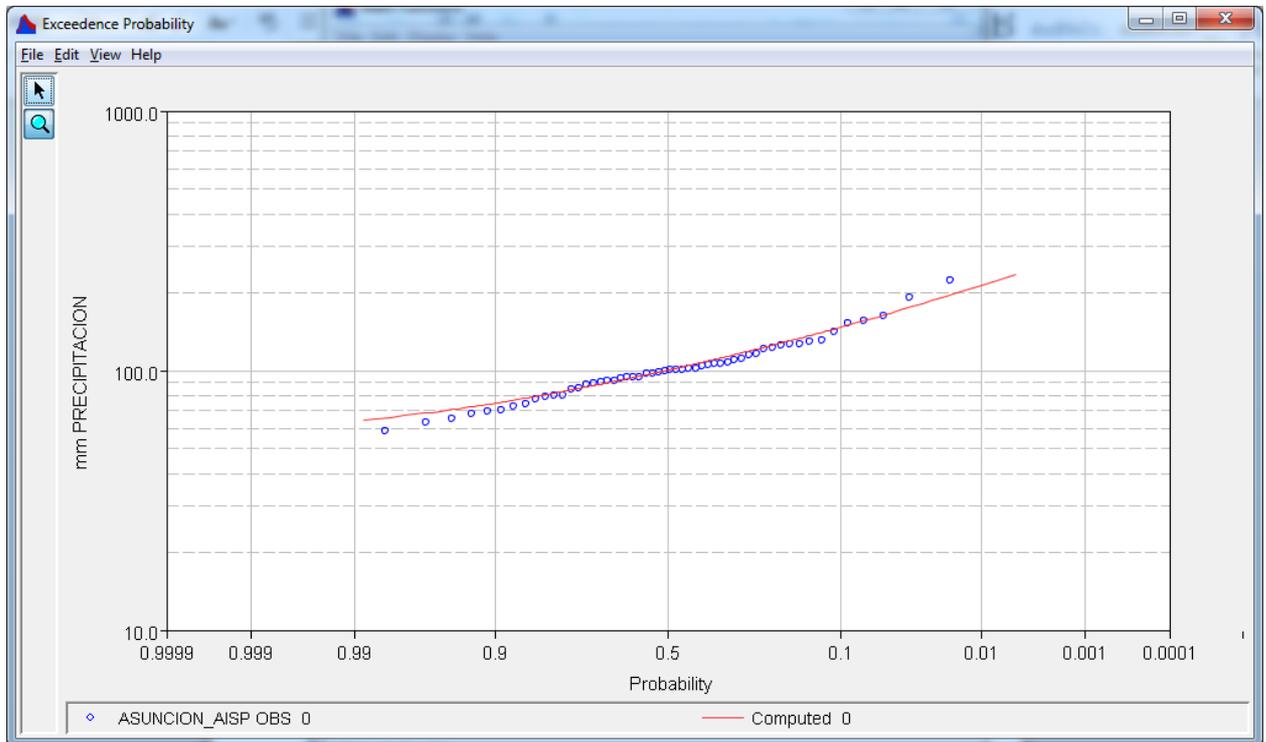
También a modo de ejemplo se muestra en la figura xx los datos de todas las estaciones recopiladas en simultaneo.



El HEC-DSS también tiene la posibilidad de realizar análisis estadísticos de manera rápida a modo de obtener un resumen de la estación configurada. La figura xx muestra un ejemplo de la cantidad de valores existentes, datos faltantes, valor mínimo, valor máximo, desviación estándar y otros parámetros estadísticos para la estación de Asunción – Aeropuerto Internacional Silvio Pettrossi.



La figura anterior muestra el resultado del análisis estadístico realizado por el HEC-DSS en el que se muestran las probabilidades asociadas a las precipitaciones registradas para la estación de Asunción – Aeropuerto Internacional Silvio Pettirossi.



Como resultado de este análisis se puede observar que la precipitación máxima de 221.90 mm tiene una probabilidad de excedencia del 2% mientras que la precipitación de 58.70mm tiene una probabilidad de excedencia de 98%.

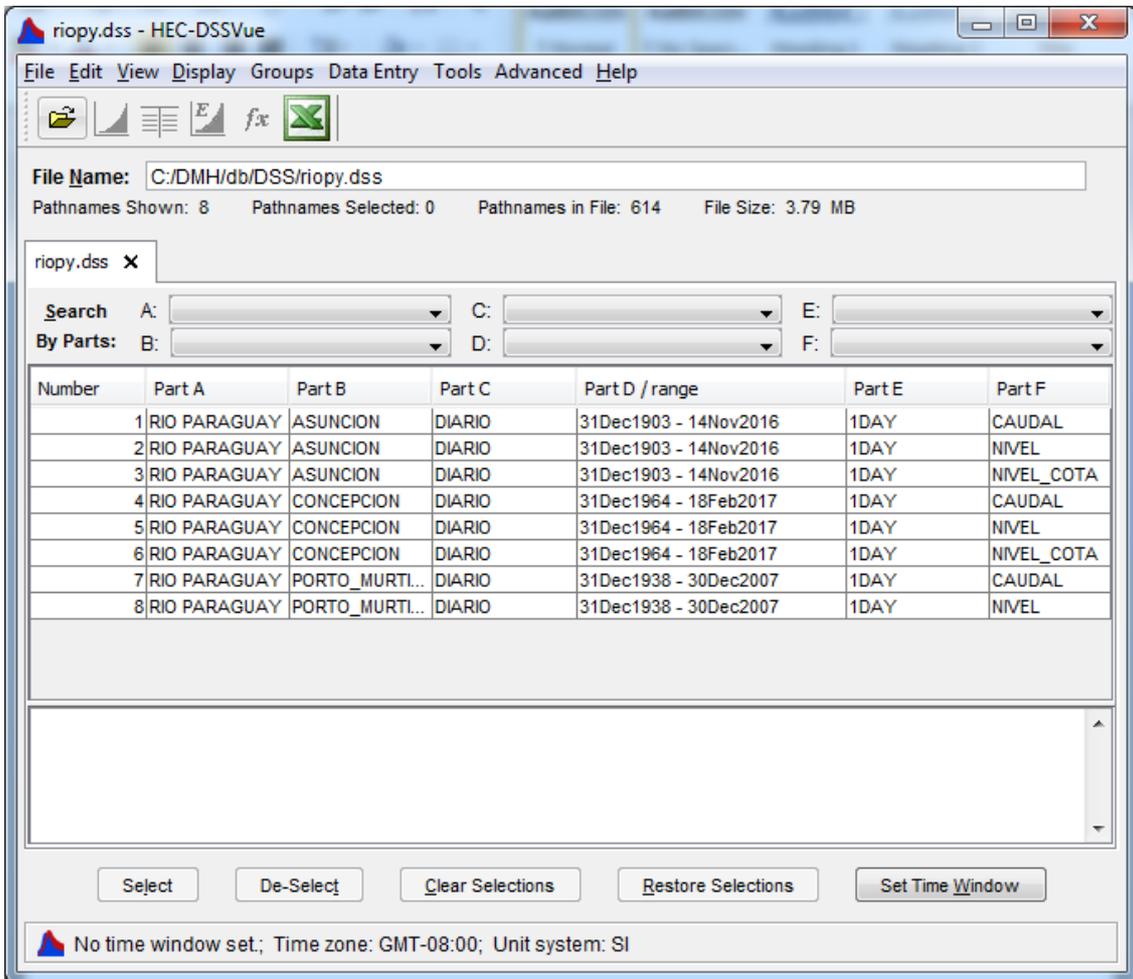
4.5 Datos de Niveles del Río Paraguay

Los datos de niveles diarios del Río Paraguay fueron obtenidos de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC). La DMH obtiene los datos de niveles de las estaciones (reglas hidrométricas) a cargo de la Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP).

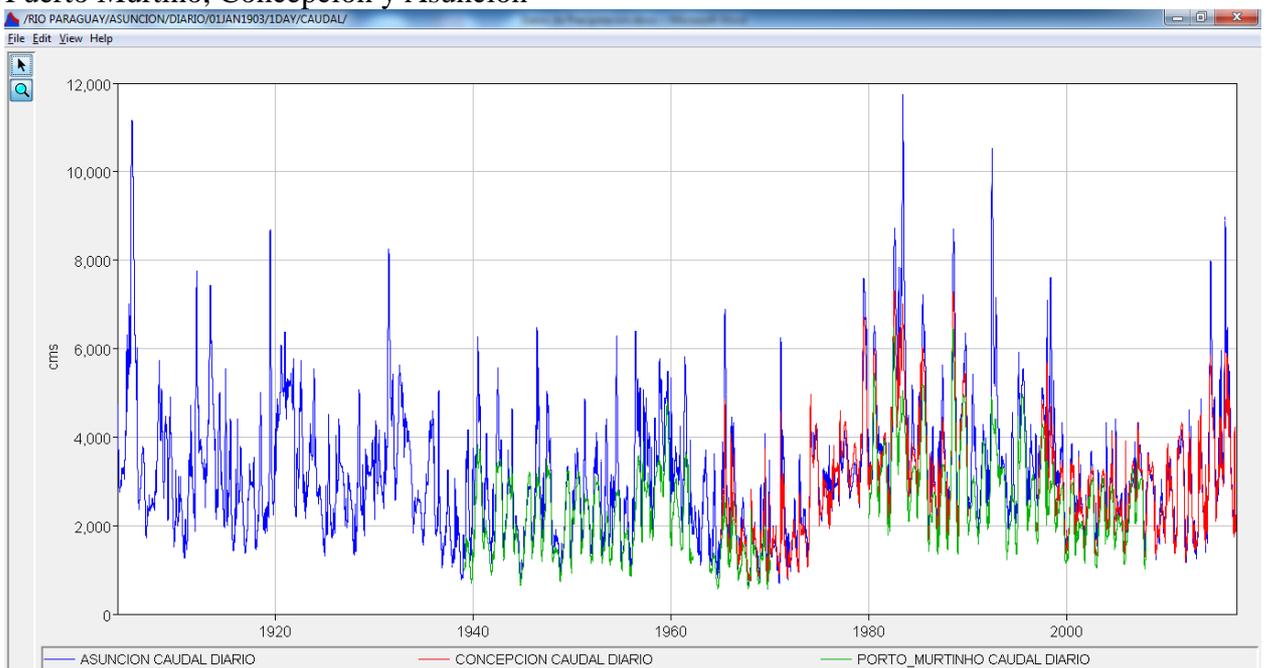
En la siguiente tabla xx se muestra una descripción de la serie de tiempo de las estaciones recopiladas.

Cauce	Estación Hidrométrica	Inicio Registro	Fin Registro	Parámetros
Río Paraguay	Asunción	01-01-1904	31-12-2015	Nivel, Caudal y Cota
Río Paraguay	Concepción	01-01-1965	31-12-2015	Nivel, Caudal y Cota
Río Paraguay	Porto Muritnho	01-01-1939	31-12-2007	Nivel y Caudal

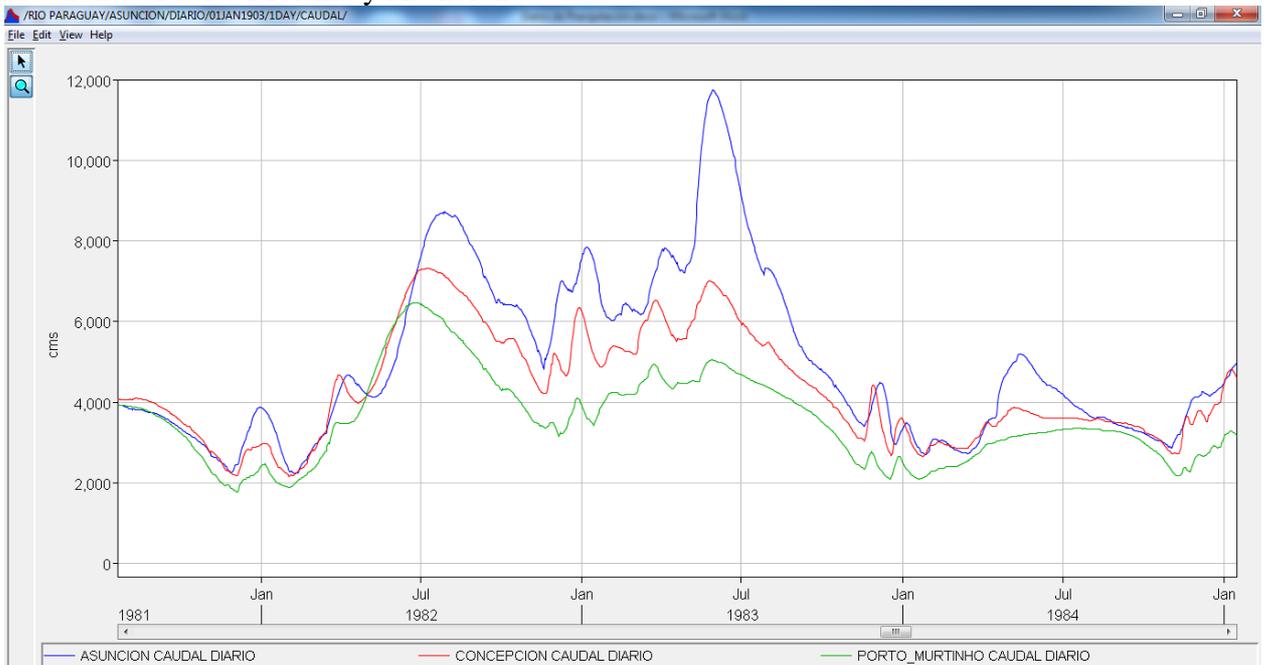
En la siguiente figura xx se puede observar la serie de datos ya ingresados. Los parámetros de caudales y cotas para las estaciones de Asunción y Concepción fueron estimados en base a la información del cero de la regla hidrométrica y a las ecuaciones de altura-caudal.



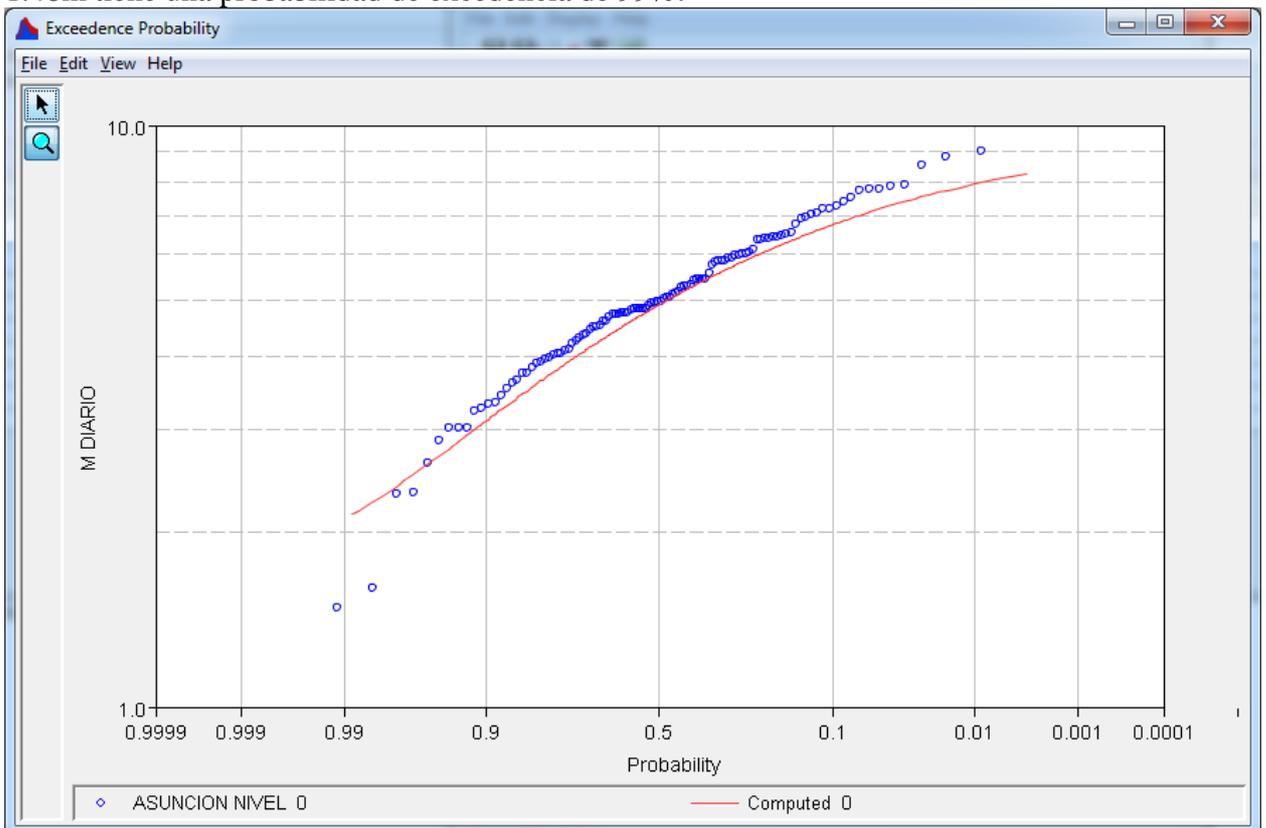
En la figura xx se observan los datos en formato de gráfico para todo el periodo recopilado. La figura muestra valores de caudales observados para las estaciones de Puerto Murtiño, Concepción y Asunción



A modo de mostrar los datos almacenados, la figura xx muestra el evento ocurrido en el año 1983, donde se pueden observar los incrementos significativos de caudales entre la estación de Puerto Murtiño y Asunción.



También es posible el análisis estadístico de probabilidades de excedencia. A modo de ejemplo el análisis para la estación de Asunción se muestra en la figura xx, en el cual el nivel de 9.01m tiene una probabilidad de excedencia de 1% mientras que el nivel de 1.48m tiene una probabilidad de excedencia de 99%.



4.6 Descripción de fuente de datos a ser utilizado por el modelo.

Soil Grids

Es un sistema de mapeamiento automatizado del suelo basado en datos de perfiles de suelo globales y covariables ambientales. SoilGrids representa una colección de propiedades y clases de suelos del mundo a una resolución espacial de 1km y 250m producidos utilizando mapeos de suelos basados en algoritmos de aprendizaje automático. Las predicciones representadas por SoilGrids son actualizados con una frecuencia regular (por lo menos con frecuencia de algunos meses).

SoilGrids es un producto de datos globales generados en el ISRIC – Información de Suelos Mundial como resultado de una colaboración internacional y como propuesta de contribución a la iniciativa de Sociedad Global de Suelos. SoilGrids 1km y SoilGrids 250m son salidas de un sistema automático global de mapeo de suelos desarrollado en el marco de la Información Global de Suelos. Este sistema tiene por objetivo el de facilitar datos globales de suelos y de servir como conexión entre los datos globales y los mapeos de suelos locales. La última actualización realizada a SoilGrids es del mes de Junio de 2016.

La información a ser utilizada por el presente proyecto es de resolución de 250m y se poseen como parámetros los especificados en la siguiente tabla.

Parámetro	Resolución (m)	Profundidad (m)
Arena		
Limo		
Arcilla	250	0, 0,05, 0,15, 0,30, 0,60, 1, 2
Carbono Orgánico		
Densidad Aparente		

Como indica la tabla, se tiene 7 capas para las distintas profundidades para cada parámetro. Estos datos deben ser procesados a nivel de celdas mediante el álgebra de mapas.

Los parámetros a ser obtenidos son los de Capacidad de Campo, Punto de Marchitez, Saturación, Disponibilidad de Agua y Conductividad Hidráulica en Saturación a una resolución igual que la fuente de información.

Anexo 5: Informes de Actividades de consultores

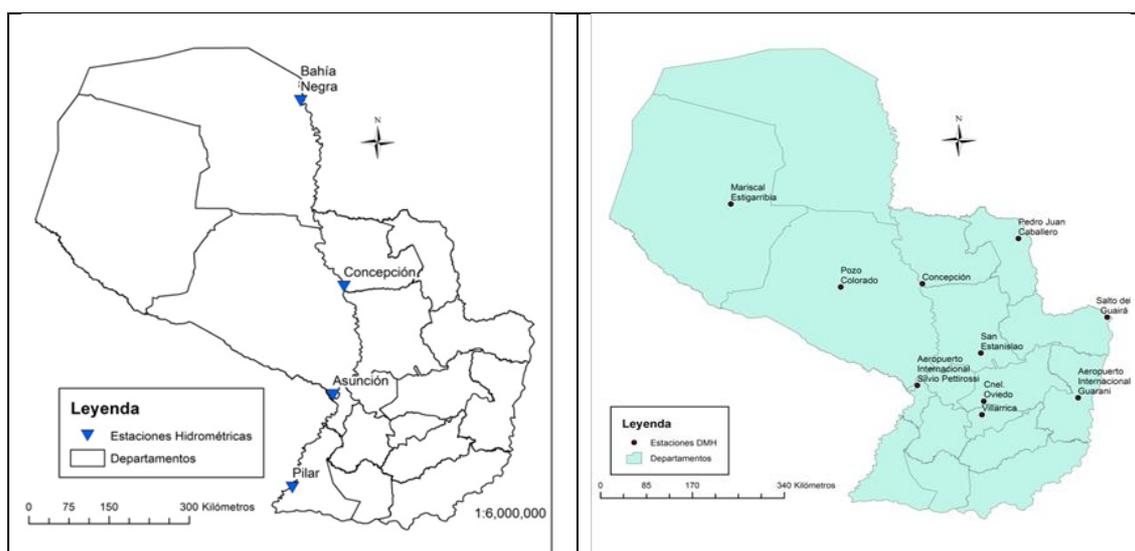
5.1 Informe – Investigador Principal – Ing. Roger Monte Domecq

- (a) Supervisión de todas las actividades del proyecto, elaboración del plan de trabajo general del equipo y supervisión de las actividades de cada consultor.
- (b) Definición y ejecución del plan financiero, en coordinación con el responsable administrativo
- (c) Gestión institucional para la obtención de datos en diversas instituciones públicas vinculadas a los datos requeridos para el proyecto: ANNP, SEAM, Disergemil, DMH Dinac e universidades con proyectos antecedentes.
- (d) Elaboración del informe de Avance semestral, en coordinación con los miembros del equipo de investigación

5.2 Informe – Co Investigador 1- Lic MSc, Julián Báez

- (a) Gestión de obtención de datos hidroclimaticos

La gestión de los datos hidroclimaticos consistió en la recopilación de la información disponible relacionada a la precipitación y los niveles hidrométricos. Se obtuvieron datos de la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil. En la Figura xx se muestran las estaciones meteorológicas con datos de precipitación que son de probable utilidad para el proyecto.



También se recopilaron datos de estaciones hidrométricas a lo largo del Río Paraguay existente en la base de datos de la DMH cuyas mediciones corresponden a la ANNP.

Luego de la recopilación se procedió al procesamiento a cargo del equipo de trabajo, ejecutando tareas de supervisión de datos.

- (b) Relevamiento y análisis de modelos estocásticos, resultados presentados en el anexo 1 y 2

5.3 Informe – Co Investigador 2: José Luis Avila

Actividades según Contrato

- 1) Revisar y analizar desde su competencia, de las metodologías existentes para el desarrollo de sistemas de pronósticos de niveles y caudales en ríos similares al río Paraguay
- 2) Seleccionar en coordinación con el equipo de investigadores de un modelo estocástico y uno dinámico para el río Paraguay, para su utilización en el sistema de pronóstico de niveles y caudales.
- 3) Supervisar el proceso de instalación de 2 estaciones hidrométricas automáticas en el río Paraguay
- 4) Supervisar la base de datos del proyecto: datos hidrométricos y topo batimétricos del río Paraguay.
- 5) Supervisar la Sistematización de datos hidrométricos disponibles y elaboración del análisis de consistencia de datos hidrométricos
- 6) Apoyar al trabajo en equipo para el desarrollo del sistema de pronóstico con calibración de los modelos a utilizar.

1.- Introducción

El río Paraguay está constituida por una planicie que abarca unos 1.095.000 Km² estando su nacimiento en ubicada aproximadamente en a los 14° 20' de latitud sur y a los 56° 25' de longitud oeste a 300 m sobre el nivel del mar.

Al norte del territorio Paraguayo se encuentra el pantanal, su superficie ha sido estimada en unos 80.000 km², durante las máximas crecidas con una longitud de 700 Km de largo, y alcanza hasta el río Apa.

A partir de este punto los meandros del río se suceden unos a otros, sus orillas son bajas y las aguas desbordan sobre ambas márgenes durante las crecientes, inundando de 10 a 15 km. El ancho del Río Paraguay es muy variable, a la altura de Asunción es de 700 m, aproximadamente; de 350 a 400 m al norte del Río Apa llegando a tener en algunos tramos cerca de 1.500 m.

En todo su recorrido el río baña costas exclusivamente brasileras en una extensión aproximada de 1.000 km; 50 km frontera común entre Brasil y Bolivia; 340 km frontera común entre Brasil y Paraguay; 540 km bañando exclusivamente costa paraguaya y 375 km frontera entre Argentina y Paraguay.

2.- Supervisar la base de datos del proyecto: datos hidrométricos y topo batimétricos del río Paraguay.

Los datos que se precisan para el proyecto y con lo cual desarrollar una base de datos, son de niveles o caudales a lo largo del río Paraguay, así como los datos topo batimétricos existente y las cartas de navegación del río Paraguay

a) Recopilación de la información hidrométrica existente:

Como primer paso para el desarrollo de ésta actividad, se identificó la Red de estaciones hidrométricas disponibles, en territorio paraguayo, así como el estudio de las series de datos disponibles. La información recabada se describe a continuación:

a.1) Red de estaciones Hidrométricas

Existen 25 estaciones en territorio paraguayo, en las cuales se puede observar que 9 de ellas cumplen con las condiciones básicas para ser usadas en el proyecto: cota del cero hidrométrico referido a coordenadas absolutas y serie de datos mayores a 20 años.

Las cotas de los ceros de las estaciones hidrométricas existentes a lo largo del Río Paraguay, en el trecho del proyecto, no están referidas altimétricamente a un mismo origen. Dada la importancia que tienen estos valores para el Proyecto y no siendo posible realizar un trabajo de amarre dentro del presente estudio, se ha visto la necesidad de analizar y complementar toda la información existente en varios trabajos con relación a este aspecto.

Las fuentes consultadas fueron:

1. Estudio de Zonificación de áreas inundables realizado por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional para el comité de Emergencia Nacional
2. Anuario hidrográfico de la ANNP en todo el tramo del Proyecto
3. En el tramo Norte:
 - a. Estudio de relacionamiento entre los datos de nivelación paraguayo y brasilero.
 - b. Estudio de navegabilidad del Río Paraguay al Norte de Asunción ANNP- PNUD.
4. En el tramo Sur:
 - a. Estudio de navegabilidad del Río Paraguay al Sur de Asunción ANNP-PNUD-Sir William Halcrow & Partners.
 - b. Estudio de crecidas Ríos Paraná y Paraguay EBY- Motor Columbus.
5. Planos de la ANDE de los cruces de líneas eléctricas de los ríos Paraguay y Paraná, especialmente la línea 220kv – Valle mi – Loma Plata que cruza el río Paraguay en la zona de Pto. Casado.

Según el análisis las cotas de los ceros de las escalas están referidas:

1. Tramo Norte, desde Bahía Negra hasta la desembocadura del Río Apa,
 - a. Estaciones Hidrométricas en territorio Brasileiro: al IBGE (Instituto Brasileiro de Geografía y Estadística)
 - b. Estaciones Hidrométricas en territorio Paraguayo a nivelaciones deducidas por niveles de agua.
2. Tramo Medio, desde la desembocadura del Río Apa hasta la desembocadura del Río Pilcomayo, al IGM Paraguayo
3. Tramo Bajo, desde la desembocadura del Río Pilcomayo hasta su confluencia con el Río Paraná.
 - a. Estaciones Hidrométricas en territorio Paraguayo: al IGM Paraguayo.
 - b. Estaciones Hidrométricas en territorio Argentino: al IGM Argentino.

Se anexa una tabla donde se especifica los kilometrajes y las cotas de los ceros de cada estación hidrométrica. Que se encuentra publicada en el trabajo de Zonificación de Áreas inundadas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCION FACULTAD DE INGENIERIA Departamento de Desarrollo de Investigaciones PROYECTO : " ZONIFICACION DE AREAS INUNDABLES DEL RÍO PARAGUAY CONVENIO FONPLATA OCT/RC/PAR-4/96 RED DE ESTACIONES HIDROMETRICAS COTAS DE LOS CEROS DE LAS ESCALAS HIDROMETRICAS										
	ESTACIÓN	PAIS	KM	NORTE	ESTE	ANUARIO	IBGE	PNUD	HALCROW	ADOPTADO
1	BAHIA NEGRA	py	1250	7762332	378173	87,60	* 76,69	76,69		76,69
2	FUERTE OLIMPO	py	1087	7672991	409757		* 72,53	72,67		72,67
3	FECHO DOS MORRO	br	1028				71,75			72,50
4	PORTO MURTINHO	br	995				70,75			71,46
5	LA ESPERANZA	py	935	7562752	395806	76,80	* 70,40	70,74		* 70,74
6	VALLEMI	py	912				* 70,39			* 70,39
7	LA VICTORIA	py	904	7536455	403482	75,60	* 69,55	70,26		70,26
8	FONCIERE	py	874							
9	PINASCO	py	832			73,00	* 67,93			68,64
10	ARRECIFE	py	810							
11	PUERTO COOPER	py	769				* 66,35			67,06
12	CARAYA VUELTA	py	750							
13	CONCEPCION	py	700	7411412	453682	* 64,42	64,42	64,42		64,42
14	TACURUPYTA	py	647				* 62,09			62,80
15	ANTEQUERA	py	588			61,12	60,41	61,12		61,12
16	ROSARIO	py	537	7295690	485348	58,34	57,63	58,34		58,34
17	VILLA REY	py	492							
18	OLIVARES	py	444							
19	PIQUETE CUE	py	420			55,01	54,30	55,01		55,01
20	VIÑAS CUE	py	399	7209324	441719		54,29			
21	ASUNCION	py	390	7204353	435513	54,04	53,33	54,04	54,04	54,04
22	PILCOMAYO	ar	375						53,31	53,31
23	BOUVIER	ar	360						* 52,72	52,72
24	VILLETA	py	353	7178993	442315	52,86			52,86	52,86
25	GUYRATI	py	340			51,32			51,32	51,32
26	PARAISO	py	282			49,99				49,99
27	DALMACIA	ar	274						*50,90	49,95
28	ALBERDI	py	209	7103591	386408					
29	FORMOSA	ar	207						48,19	48,19
30	PILAR	py	89	7029095	369738	46,46			46,46	46,46
31	BERMEJO	ar	65						45,87	45,87
32	HUMAITA	py	49	7005447	350279				45,57	45,57
33	ITA PIRU	py	0	6980719	344949				44,07	44,07

Observaciones: **IBGE(Br)=IGM(Pa) - 0,71 m**

* Cota de Concepcion corregida

a.2) Situación de las series de datos

Se analizó en cada estación la situación de los datos, discriminando la continuidad de las series anuales. En la Tabla II: "Situación de los Datos Originales" se detalla el resultado de dicho diagnóstico, ver anexo.

Con toda esta información relevada se implementaron planillas que revelan la situación de la continuidad de las series de datos por estaciones, las cuales se detallan como Planillas tipo III. Ver anexo.

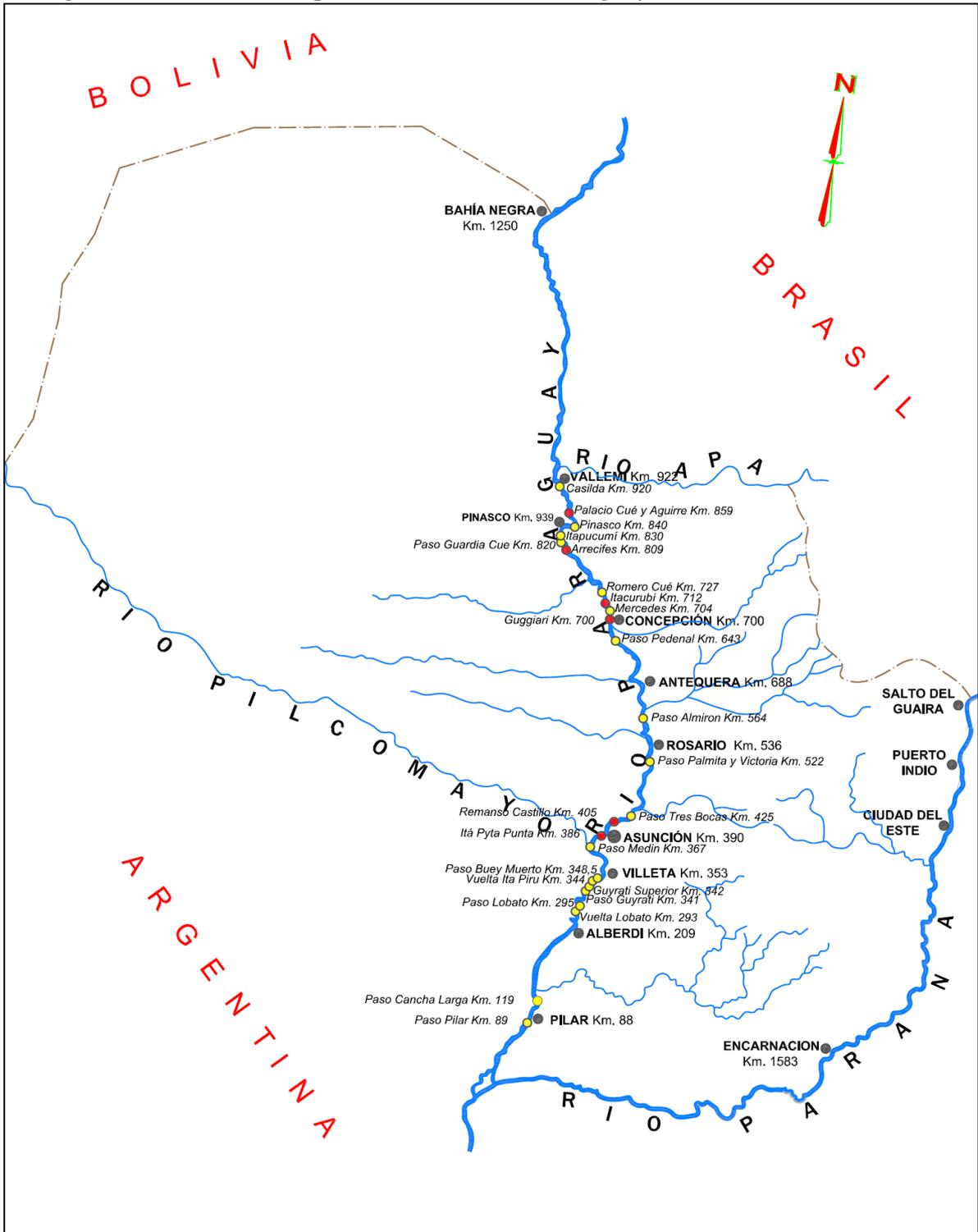
b) Recopilación de la información topo batimétrica existente:

Lo largo del Rio Paraguay la ANNP realiza periódicamente relevamientos batimétricos, especialmente en los puntos críticos del rio Paraguay en el tramo comprendido desde la

confluencia con el Rio Apa hasta la confluencia con el Rio Parana. Estos datos son necesario para la implementación de los modelos hidráulicos.

Así mismo se cuenta con las cartas de navegación del rio Paraguay desde Corumba (Brasil) hasta Asunción.

En el grafico se muestran los puntos críticos de Rio Paraguay



5.4 Informe de actividades – Ing. MSc Roberto Takahashi

Para realizar para la implementación de modelos y el desarrollo apropiado del proyecto se requiere realizar las siguientes actividades:

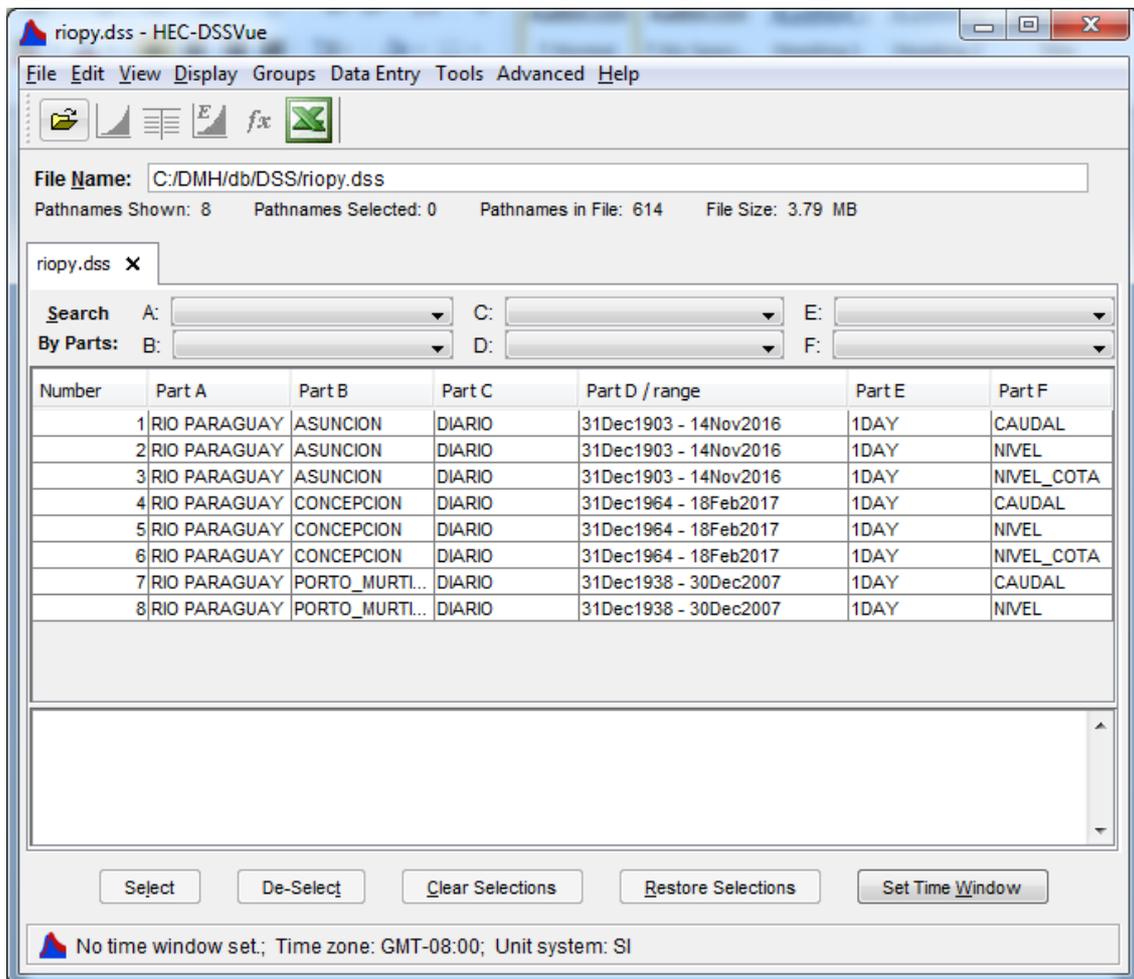
La recopilación y sistematización de la información existente relacionado al tema
Procesamiento de la información
Implementación de los datos procesados
Simulación y calibración de los modelos

Actividades realizadas en el primer semestre:

- (a) La recopilación de la información relacionada al proyecto incluyó la revisión de bibliográfica de los siguientes documentos:
 - ✓ Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay, resumen presentado en el Congreso Paraguayo de Recursos Hídricos en Noviembre de 2005, y elaborado por el Centro Multiuso de Monitoreo Ambiental e Hidrológico (CMMAH) del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones de Paraguay y la Compañía Nacional del Ródano (CNR).
 - ✓ Coupled Hydrologic-Hydraulic Modeling of the Upper Paraguay River Basin. Artículo científico publicado por la American Society of Civil Engineers (ASCE) en Mayo de 2012. Esta publicación cuya autoría corresponde a J. M. Bravo; D. Allasia; A. R. Paz; W. Collischonn; y C. E. M. Tucci, describe la implementación del MGB en la cuenca alta del Río Paraguay acoplado a un modelo unidimensional HEC-RAS.
 - ✓ Analysis of Flooding in the Paraná/Paraguay River Basin. Artículo publicado en setiembre de 1993 por el Banco Mundial, cuya autoría corresponde a Robert J. Anderson Jr., Nelson da Franca Ribeiro dos Santos y Henry F. Diaz. En este documento se presenta un análisis de los mayores caudales registrados para los Río Paraguay y Paraná en tres estaciones, Paraná-Posadas, Paraguay-Asunción, Paraná-Corrientes, en el que se expone que las mayores inundaciones ocurridas en la cuenca del Paraguay-Paraná se debieron a grandes precipitaciones ocurridas en ambas cuencas.
 - ✓ Hydrologic and Environmental Impact of the Paraná-Paraguay Waterway on the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. Este estudio llevado a cabo por la Universidad Estatal de San Diego, cuya autoría corresponde al Dr. Victor Ponce y actualizada en su versión online a agosto de 2015, expone las principales características de la Cuenca del Río Paraguay y los principales impactos que el Río Paraguay tendría de llevarse a cabo el proyecto Hidrovía.
 - ✓ Implementación de un modelo unidimensional en la cuenca media del Río Paraguay. La tesis llevada a cabo por Roberto Takahashi en el año 2016 corresponde el trabajo final de maestría en la Universidad de Illinois, en Estados Unidos. En este estudio se expone los escasos datos que existen en la actualidad para implementar un modelo hidráulico y se presentan algunos resultados de simulación para eventos seleccionados, mostrando mapas de inundación.
- (b) Al mismo tiempo del proceso de recopilación bibliográfica, también se procedió al procesamiento de la información obtenida.

La implementación y actualización de la base de datos en el HEC-DSS de niveles del Río Paraguay fue uno de los primeros procedimientos realizados.

En la siguiente figura se observan los datos cargados hasta la fecha, que corresponde hasta noviembre de 2016 para la estación de Asunción, febrero de 2017 para la estación de Concepción y 2007 para la estación de Puerto Murtiño.



La ecuación utilizada para convertir los niveles a caudales para la estación de Asunción es la siguiente:

Curva H-Q Asunción (H=nivel de regla hidrométrica en metros)

$$Q = 885 + 774.059 \times H - 76.563 \times H^2 + 13.7967H^3$$

La ecuación utilizada para convertir los niveles a caudales para la estación de Concepción es la siguiente:

Curva H-Q Concepción (H=nivel de regla hidrométrica en metros)

$$Q = 547.43 + 583.57 \times H + 26.18 \times H^2$$

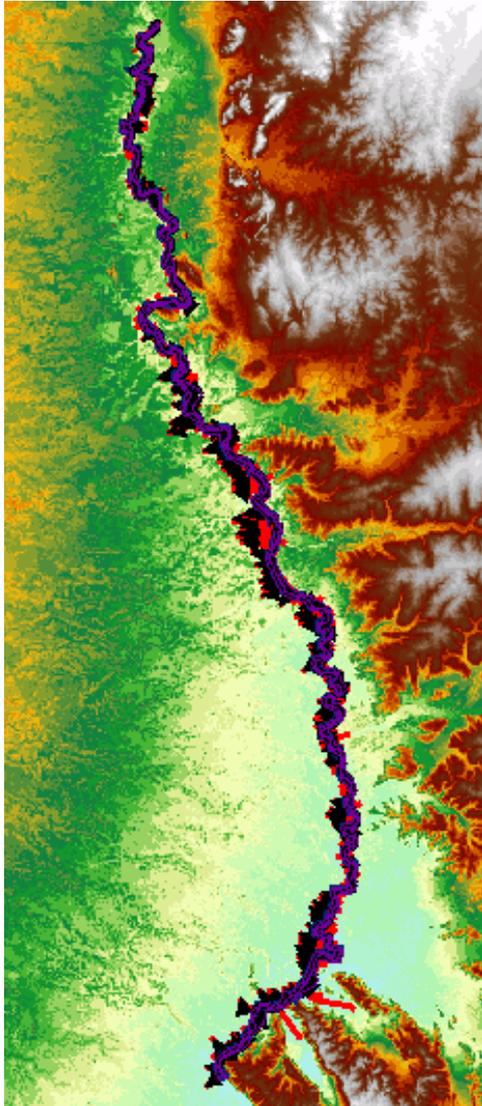
De la tesis de Takahashi se recopiló la ecuación altura-caudal para la estación de Puerto Murtiño, en la cual corresponde a una estimación hecha encontrando la mejor aproximación polinomial, la cual obtuvo un $R^2=1$, mediante el análisis de los datos de niveles y caudales para la serie de tiempo existente.

Curva H-Q Puerto Murtiño (H=nivel de regla hidrométrica en metros)

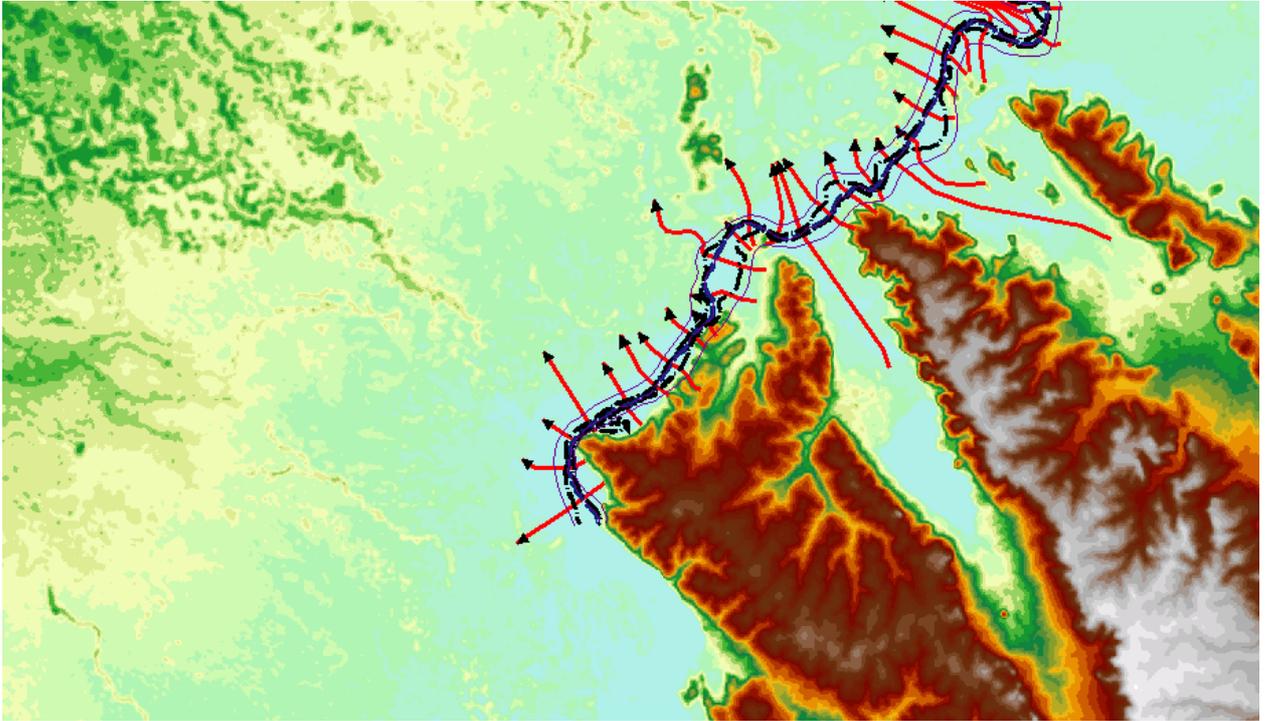
$$Q = 29.063H^2 + 364.28H + 229.89$$

También se ha recopilado la información correspondiente a la tesis de Takahashi, para la implementación de la topobatimetría del Río Paraguay. El mejoramiento de la información fue la de realizar de vuelta la interpolación de los datos batimétricos y una suavización de la topografía correspondiente a la planicie de inundación en el tramo Puerto Murtiño a Asunción. Para este proyecto se propone mejorar las estimaciones iniciales existentes de los parámetros de n de Manning.

La siguiente figura muestra la topografía y batimetría junto con las secciones transversales implementadas para el modelo desde Concepción a Asunción.



La siguiente figura muestra las secciones en las cercanías de la ciudad de Asunción.



Estos resultados preliminares corresponden a la conformación e implementación del modelo hidrodinámico en el programa HEC-RAS. Los caudales que son simulados en el HEC-HMS son almacenados en el HEC-DSS y luego utilizados en el HEC-RAS. El sistema de base de datos HEC-DSS es el medio por el cual se acoplan los resultados hidrológicos al modelo hidráulico. El modelo hidrológico por su parte requiere de procesamientos minuciosos en el que se deben caracterizar las cuencas a modelar. Estos procedimientos aún están siendo llevados a cabo los cuales están en su fase de delimitación y obtención de características morfológicas.

5.5 Informe Investigador Junior. Ing. Alberto Grissetti

Responsabilidades según contrato

- Asistir al consultor para el desarrollo e implementación de los modelos hidrológicos e hidráulicos
- Recopilar y controlar la calidad de la información disponible relacionada a parámetros hidrológicos, climatológicos y geográficos espaciales del área del proyecto
- Asistir la implementación de los modelos hidrológicos e hidráulicos del proyecto
- Elaborar informes bimensuales sobre el avance de las tareas
- Apoyar a la elaboración de los informes de resultados del proyecto
- Colaborar con el equipo en las mediciones de caudal y la calibración de las curvas altura caudal.
- Colaborar con la implementación de un portal web con el sistema de pronóstico del río Paraguay.

ACTIVIDADES REALIZADAS HASTA LA FECHA

(a) Delimitación de subcuencas

La primera actividad realizada al inicio del proyecto fue la obtención de datos de elevación, específicamente el DEM, para delimitación de las cuencas interiores de la región Oriental, a ser introducidas al modelo Hidrológico.

Las principales cuencas a ser consideradas para el modelo hidrológico, hasta Asunción, son las siguientes:

- Río Apa
- Río Aquidaban
- Río Ypané
- Río Jejuí

Se muestra en el mapa a continuación las cuencas delimitadas, utilizando la herramienta HEC-GeoHMS, que es una extensión para el programa ArcMap.



Figura 1: Cuencas a estudiar y modelo de elevación digital.

(b) Parámetros hidrológicos

Posterior a la delimitación de cuencas y subcuencas de los aportes laterales al río Paraguay, se determinan los parámetros hidrológicos de las subcuencas.

Por las características propias de un modelo hidrológico semi-distribuido, es imprescindible subdividir el área de proyecto en unidades más pequeñas llamadas subcuencas, a las cuales se le asignarán características particulares de acuerdo al tipo de suelo, uso de suelo, precipitación media, etc.

Se realiza el geoprocésamiento correspondiente utilizando como datos de entrada el Modelo de Elevación Digital para determinar parámetros geométricos y de elevación. Para el tipo de suelo, se utilizan los datos del PRUT y FAO.

Para determinar el de uso de suelo, se emplean las últimas las Tecnologías de Información Geográfica, tanto los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como la Teledetección, que son herramientas fundamentales para realizar un estudio de los cambios en los usos del suelo agrícola a escala local, regional y nacional. Al hablar de Teledetección se hace referencia a un conjunto de técnicas utilizadas para determinar, a distancia, las propiedades y objetos que se encuentran en la superficie terrestre, a partir de las radiaciones que ellas reflejan o emiten en diversas longitudes de onda.

Para realizar la clasificación del uso de suelo a partir de las imágenes satelitales se utilizarán programas de manejo con GIS, principalmente ArcGIS, realizando la

combinación óptima de las bandas espectrales de las imágenes, lo cual permite determinar las clases del uso de suelo, con el apoyo de herramientas como “Clasificación Supervisada” y el cálculo del “NDVI” para una determinada zona. Finalmente, se utiliza la interfaz Hec-GeoHMS, desarrollada por el HEC, que permite generar los parámetros hidrológicos en el programa ArcMap, y luego exportar en el formato requerido por el HEC-HMS.



Figura 2: Fragmento de imagen satelital

(c) Sistematización de datos de niveles del río Paraguay.

Con los datos obtenidos de la ANNP (Administración Nacional de Navegación y Puertos) se realiza un análisis estadístico para varios periodos de retorno, comprendidos entre 2 y 200 años, con valores máximos de nivel de agua del Río Paraguay para toda la serie registrada, a través del Método Gumbel, Log Normal y Log Pearson III.

Para cada estación se tienen los datos diarios, con el siguiente formato para el periodo registrado. Al final de la tabla, se tiene un resumen de los niveles máximos, promedios y mínimos mensuales. Las celdas vacías representan los datos faltantes o meses incompletos.

Tabla 4: Ejemplo de formato de los niveles diarios por año para cada estación.

RIO PARAGUAY												
Bahía Negra												
Año 2.016												
Días	Ener	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
1	134	292		448	431	420	411	387	312	223	154	
2	132	298	428	446	430	419	411	384	308	222	153	
3	130	304	431	447	430	419	410	382	303	217	151	
4	130		431	448	427	419	409	380	301	226	150	
5	129	317	436	449	426	420	409	379	300	214	149	
6	129	317	436	450	422	421	407	378	298	212	149	
7	136	328	441	451	425		407	377	295	21	148	
8	149	331	444	452	425	421	407	377	292	207	147	
9	145	337	447	446	424	421	406	376	292	205	147	
10	145	349	446	449	426	421	405	374	291	200	147	
11	145		447	450	426	421	405	372	291	197	144	
12	173	355	448	445	428	421	403		290	195	145	
13	187	355	447	444	426	420	402	368	287	193	145	
14	198	359	447	449	425	419	401	368	284	191	146	
15	210	362	448	448	426	419	401	363	283	190	145	
16	214		448	446	424	419	400	362	282	188		
17	224	372	449	445	424	419	398	360	276	186		
18	232	375	449	445	423	418	397	358	272	184		
19	238	379	447		422	418	396	353	270	181		
20	254	382	445	444	423	418	395	353	268	177		
21	259	386	445	444	422	418	395	348	264	174		
22	279	385	445	445	423	418	394	345	258	169		
23	279	385	441	445	421	417	393	344	252	158		
24	280	396	443	445	420	416	392	340	249	162		
25	283	402		446	420	415	391	335	246	160		
26		408	448	444	420	415	391	334	244	160		
27		412	448	439	419	415	391	330	239	160		
28	282		449	436	419	413	390	325	234	159		
29	282		446	434		412	389	322	230	159		
30				432	421	412	389	320	226	157		
31	285		447		420		387	316		156		
Max.	285	412	449	452	431	421	411	387	312	226	154	0
Prom.	202	358	444	445	424	418	399	357	275	181	148	0
Min.	129	292	428	432	419	412	387	316	226	21	144	0

Luego de la verificación de la obtención de los datos, para cada estación, de los datos diarios se tomó el nivel máximo de cada mes y, posteriormente, el nivel máximo de cada año teniendo en cuenta los niveles máximos de cada mes.

A continuación, se muestra como ejemplo el análisis estadístico con los valores obtenidos para los distintos periodos de retorno. Se muestra el cálculo de Fuerte Olimpo, en donde se tiene una muestra de 44 años consecutivos.

Tabla 1: Parámetros de cálculo probabilístico.

Gumbel					
MEDIA	DESV. EST.	DESV. REDUC.	MEDIA. REDUC.	Coef. Gumbel	Moda
m	s	Sn (para n = 44)	Yn (para n = 44)	a	u
602.750000	180.042776	1.14990	0.54580	0.006386816	517.292702
LOG PERSON III					
Coef. Asim	MEDIALOG.	D. EST. LOG.	Coef. Asim. Log	Fact. Frecuen.	
Cs	m	s	Cs. Log	k	
-0.17458936	2.756880929	0.154066349	-1.316184544	-0.219364091	

p	w	z	Kt
0.5000	1.17741002	-1.01007E-07	0.208638747
0.2000	1.79412258	0.841456717	0.832771362
0.1000	2.14596603	1.281728757	1.060719638
0.0500	2.44774683	1.64521144	1.205566488
0.0200	2.79714962	2.054188589	1.327817761
0.0133	2.93853301	2.21680565	1.365839043
0.0100	3.03485426	2.326785333	1.388465943
0.0080	3.10751146	2.409345447	1.403905222
0.0067	3.16563905	2.475161601	1.415303731
0.0057	3.21396514	2.529728234	1.424163541
0.0050	3.25524726	2.576236081	1.431304941

Los valores obtenidos coinciden con los registros históricos de los niveles máximos del río Paraguay y, por tanto, el análisis es válido.

Aplicando estas tres distribuciones, se han obtenido las alturas de crecida del río Paraguay en la ciudad de Fuerte para cada TR. Los análisis probabilísticos se realizaron con niveles hidrométricos, cuyos resultados se muestran a continuación.

Tabla 2: Nivel Máximo de Inundación para cada distribución.

Nivel de agua			
Tr (años)	GUMBEL	NORMAL	LOG PEARSON III
	NIVEL (m)	NIVEL (m)	NIVEL (m)
2	5.75	6.03	6.15
5	7.52	7.54	7.68
10	8.7	8.34	8.32
20	9.82	8.99	8.76
50	11.3	9.73	9.15
75	11.9	10	9.27
100	12.4	10.2	9.35
125	12.7	10.4	9.4
150	13	10.5	9.44
175	13.3	10.6	9.47
200	13.5	10.7	9.49

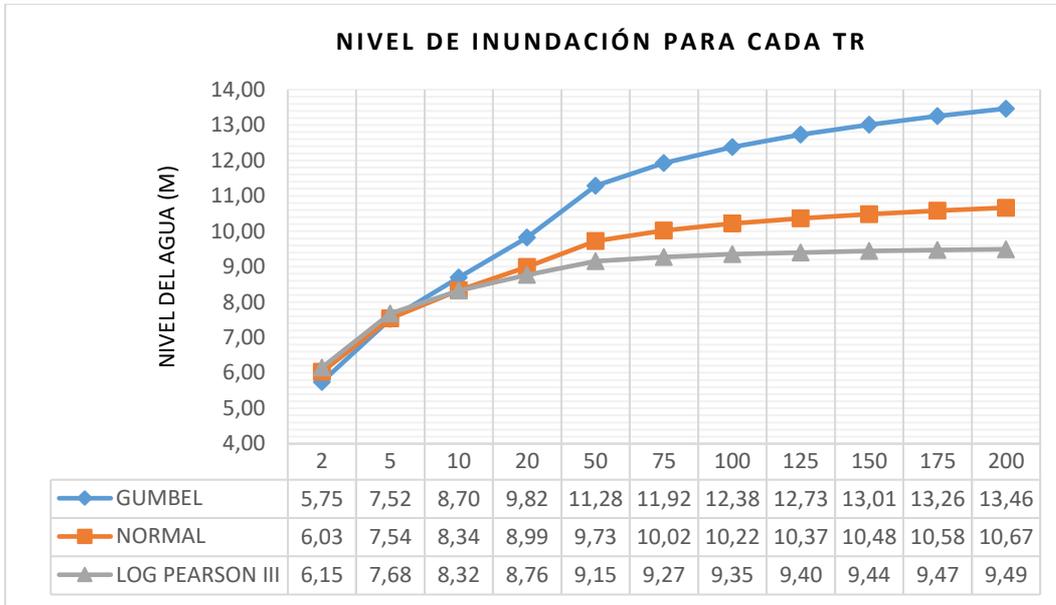


Figura 313: Nivel Máximo de Inundación para cada distribución.

Entre las tres distribuciones, se debe utilizar la más representativa para la estación, para ello es necesario calcular la bondad del ajuste, mediante la distribución Chi Cuadrada.

5.6 Informe Estudiante (Ing. Ambiental) Rosa Aseretto.

En el marco del Proyecto CONACYT-UCA “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY” (14-INV-280), en ejecución por el Centro de Tecnología Aplicada CTA de la UCA, como el mismo es extenso se propuso un tema de tesis < Modelación Hidrológica de Cuencas Interiores del Rio Paraguay: Rio Ypané y Rio Jejuí>, el tema de tesis se aprobó y los objetivos, justificación y alcance fueron los siguientes:

Justificación del Problema a Investigar

Se cuenta con la referencia que en las cuencas del río Paraguay y el río Paraná se observaron grandes variaciones de caudal después del año 1970, esto puede ser consecuencia de las modificaciones antrópicas ocurridas dentro de toda esa área a lo largo de los años (Müller, 1998 y Galdino, 1997).

De acuerdo a la bibliografía consultada, los modelos hidrológicos permiten prever con 3 días de anticipación el caudal de los afluentes principales del río Paraguay (ríos Ypané y Jejuí), conociendo los datos de nivel y de lluvia en tiempo real. Existen antecedentes de la Cooperación Francesa , que conectado a una red de medidas de nivel de agua y de precipitaciones en las cuencas y asociado a los modelos hidrológicos de los afluentes principales, el modelo podrá ser utilizado en tiempo real para anticipar las variaciones de nivel del río en sus distintos tramos. (Modelo Hidrodinámico del Río Paraguay, 2005)

Existiendo la necesidad de implementación de políticas sustentables para el uso y aprovechamiento de recursos hídricos(Ley 3239/1997⁹), estudios hidrológicos sobre estas cuencas, son importantes para un uso, aprovechamiento y protección de las fuentes de agua, atendiendo a la complejidad de las cuencas seleccionadas. Actualmente en una de ellas, se solicitó la construcción de una pequeña Central Hidroeléctrica, sobre el río Ypané , aproximadamente a unos 24 Km río arriba ubicada en la ciudad de Belén , del Dpto. de Concepción, tendrá una capacidad de potencia instalada de 12MW a 18 MW, que será construida con inversión privada con la fiscalización de la ANDE.(*PR/OCI/198/17-08-2016*)

La investigación contribuirá al Proyecto CONACYT-UCA “DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE PRONOSTICO DE NIVELES Y CAUDALES DEL RIO PARAGUAY”. (14-INV-280), ya que la modelación de estas cuencas se utilizaran para obtener la transformación lluvia caudal en la confluencia con el río Paraguay para vincular con la modelación hidrodinámica del río Paraguay

Objetivos generales

Implementar un modelo hidrológico continuo en las cuencas de los ríos Ypané y Jejuí, afluentes del Río Paraguay en su cuenca media.

⁹http://www.seam.gov.py/sites/default/files/ley_de_recursos_hdricos.pdf

Objetivos específicos

- Análisis de los datos de entrada para la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.
- Simular y calibrar el modelo hidrológico HEC-HMS. (simulación y calibración)
- Implementación del modelo hidrológico en las cuencas, para la obtención de hidrogramas a ser utilizados en un modelo hidrodinámico del Río Paraguay, de forma operativa para la realización de pronósticos hidrológicos.

Delimitación del Alcance

El resultado del modelado de las cuencas del Río Ypané y Río Jejuí obtenga la transformación lluvia caudal en la confluencia con el río Paraguay

Antecedentes:

La cuenca del Río Paraguay ocupa 106.907 km² (67%) en esta región, mientras que la cuenca del Río Paraná los restantes 52.920 km² (33%, sin contar el área de la cuenca del río Paraguay). Estos a su vez tienen importantes afluentes que bañan a esta región.

Dos de los principales afluentes del Río Paraguay, serán estudiados y modelados; la cuenca del Río Ypané y la cuenca del Río Jejuí Guazú.

La modelación hidrológica busca representar matemáticamente los procesos hidrológicos superficiales y subterráneos, transformando la precipitación en caudal. Para ello son necesarios los datos meteorológicos y climatológicos, las características físicas y topográficas de la zona, así como, hidrológicos. Se realizará la simulación y calibración buscando el ajuste con la realidad (Collischonn y Tucci, 2001). El Modelo utilizado; es el Modelo Hidrológico HEC-HMS (“Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System”)

Desarrollo del proyecto: Se realizó revisión bibliográfica de libros, como de manuales técnicos y asistencia a charla de interés del proyecto.

- HEC-HMS Technical Reference Manual (US Army Corps of Engineers, 2000)
- Fattorelli- Fernández (2011) “Diseño Hidrológico”, 2ª Ed. Argentina, 531p.
- Tucci, CEM. (2005). “Modelos hidrológicos”. 2. Ed. Porto Alegre: UFRGS, 678p.
- Universidad Nacional de Asunción (2005) “División Administrativa y Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales de la República del Paraguay a Partir de las Cuencas Hidrográficas. 407p
- Participación de la charla técnica “**Simulación Hidrológica en grandes cuencas**”. Dictada por el Dr. Prof. Walter Collischonn, docente extranjero del Programa de Postgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos, desarrollado en la Facultad de Ingeniería-UNA.

Río Ypané.

Se extiende de este a oeste en la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil (límite natural de la cordillera de Amambay), al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Aquidabán y al sur con la cuenca del Río Jejuí Guazú.

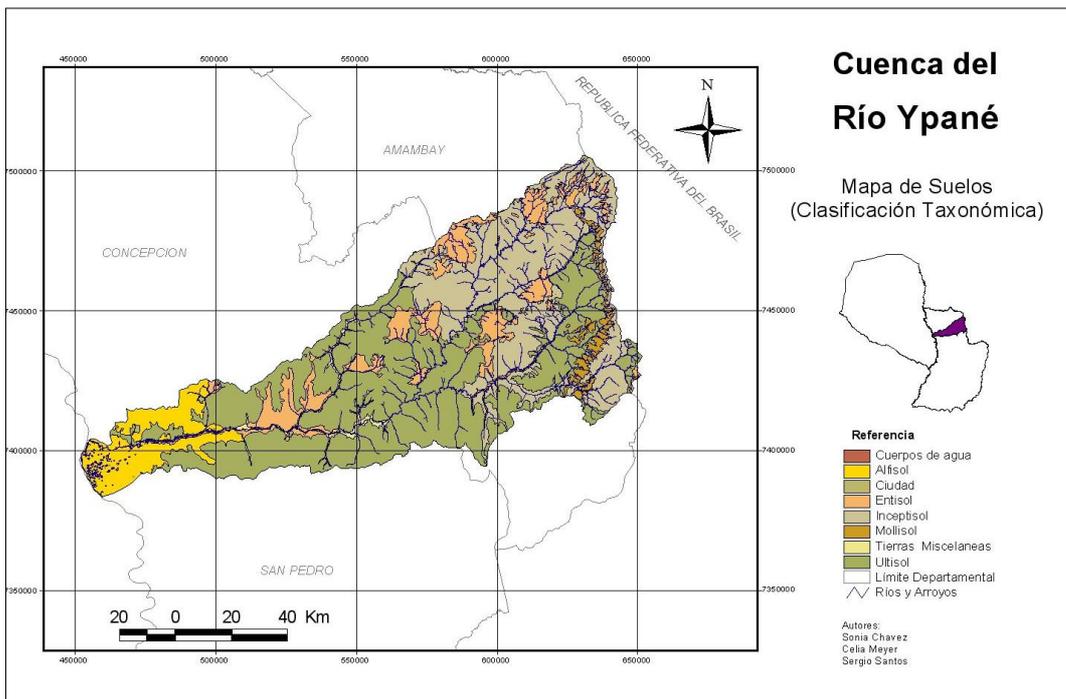
Abarca en parte a los departamentos de Concepción, San Pedro y Amambay. La superficie de su cuenca es de 10.266 Km² aproximadamente.

La **evapotranspiración** media es de 1.025mm., según datos obtenidos del Balance Hídrico Superficial (FIUNA-UNESCO) realizado en el año 1991, este y otros datos de importancia son detallados a continuación en la siguiente tabla:

Cuenca	Subcuenca	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	
		[P]	[ETR]	[R]	
		Mm	mm	Mm	m3/s
Paraguay	Río Ypané	1.549	1.025	524	165

Los **suelos** predominantes en esta región de acuerdo al mapa de suelos de la DOA/MAG/BANCO MUNDIAL, son del tipo **ultisol (47,62%)**, los cuales se desarrollan en condiciones de clima cálido y tropical.

Otros tipos de suelo que predominan son el **inceptisol (27,76 %)** caracterizados por ser suelos incipientes de baja o media evolución cuyos perfiles se forman rápidamente como resultado de la alteración de la roca madre; y el **entisol (12,52%)** el cual representa a suelos poco evolucionados, sus propiedades están muy determinadas por el material original.



En esta cuenca se está trabajando actualmente; en base al DEM de la región Oriental se realizó la extracción de la cuenca para delimitarla en ArcGis, utilizando la herramienta del Geo-HMS, y luego exportar al HEC-HMS.

Como siguiente paso será agregar los datos hidrológicos, para los modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada, para que el programa cree la corrida de simulación.

Río Jejuí:

Se extiende de este a oeste de la Región Oriental, lindando al este con la República Federativa del Brasil, al oeste con el Río Paraguay, al norte con la cuenca del Río Ypané y al sur con la cuenca del Río Manduvirá. La **superficie** de la cuenca del Río Jejuí Guazú es de aproximadamente 22.719 km²

La **evapotranspiración** media en la cuenca es de 1.025 mm de acuerdo al Balance Hídrico Superficial (FIUNA-UNESCO) realizado en el año 1991, el cual se resume en la siguiente tabla junto con otros valores obtenidos del mencionado estudio:

Cuenca	Subcuenca	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	
		[P]	[ETR]	[R]	
		mm	Mm	mm	m ³ /s
Paraguay	Río Jejuí Guazú	1.535	1.025	510	325

Los **suelos** predominantes en esta región son del tipo **ultisol (58,40%)** de acuerdo al mapa de suelos de la DOA/MAG/BANCO MUNDIAL, los cuales se desarrollan en condiciones de clima cálido y tropical. Otro tipo de suelo que predomina es el **alfisol (32,10 %)** que es propio de regiones húmedas. Sus características principales son: horizonte superficial de gris a pardo, contenido en bases medio o alto y zona de acumulación de arcillas.

