

# Sistema de Simulación de Transformación Lluvia-Caudal (SSTLC)

(Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación WICC-2006)

María del Rosario San Miguel

Facultad de Ciencias de la Alimentación, Universidad Nacional de Entre Ríos  
3200 Concordia, Argentina

and

Martín M. Pérez

Facultad de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional de Entre Ríos  
3200 Concordia, Argentina

and

Eduardo A. Zamanillo

Facultad de Ciencias de la Administración, Universidad Nacional de Entre Ríos  
3200 Concordia, Argentina

## RESUMEN

Se presenta un modelo de simulación del proceso de transformación lluvia-caudal. El sistema permite elegir el mejor conjunto de algoritmos en cada fase del proceso, en función de la información disponible.

Se diseñó y desarrolló el sistema computacional, programando los diferentes algoritmos involucrados, con su testeado correspondiente. Se aplicó el modelo a la cuenca superior del río Gualeguaychú, obteniéndose un buen ajuste entre los caudales observados y calculados.

**Palabras Clave:** Simulación, Transformación lluvia-caudal, Hidrograma de proyecto.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los solución de los problemas de ingeniería hidrológica que afectan las actividades productivas y existenciales de gran cantidad de personas requieren la utilización de diferentes modelos hidrológicos como herramienta de diseño y de toma de decisiones.

Existen diversos sistemas computacionales para modelar la transformación lluvia-caudal (como IPHS1[1] y HEC-HMS[2]); aunque todos han sido desarrolladas en otros países, utilizando otros idiomas.

El sistema desarrollado tiene por objetivos:

- Representar de manera sencilla distintas cuencas hidrográficas.
- Ingresar información de tormentas observadas y de proyecto.
- Simular el comportamiento del curso de agua en distintos puntos de la cuenca ante la ocurrencia de una tormenta determinada.
- Modificar los parámetros y la configuración de la cuenca, para ajustar los resultados simulados con los observados.

El sistema ha sido programado en Visual FoxPro para lograr interactividad con el usuario, y permite elegir el mejor conjunto de algoritmos para una cuenca específica en cada fase del proceso de transformación lluvia-caudal y en las propagaciones en río, en función de la información disponible. Una vez seleccionados los procedimientos hidrológicos específicos y definidos los distintos escenarios meteorológicos de interés, se calculan los hidrogramas de proyecto.

La estructura del modelo de simulación se describe en la sección 2, en 3 se presenta una descripción sintética de los algoritmos involucrados y en 4 se detallan algunos aspectos operacionales. En la sección 5 se presenta la aplicación a la cuenca superior del río Gualeguaychú (ER), para el evento ocurrido el 11/09/02, en 6 se detallan las conclusiones asociadas al análisis de los resultados obtenidos.

## 2. ESTRUCTURA

El sistema presenta una estructura modular con las siguientes componentes:

1. Lectura de datos y manejo de archivos: permite generar los archivos de información que contienen los parámetros, datos hidrológicos y/o características físicas de la cuenca de acuerdo a las necesidades del usuario.
2. Modelos: está dividida en dos módulos: Cuenca y Río. Cada uno está formado por sub-módulos que realizan operaciones específicas. A su vez cada sub-módulo presenta opciones de diferentes algoritmos de cálculo. (Figura 1).
3. Visualización e impresión: es la salida que tiene por finalidad presentar los datos utilizados y los resultados numéricos y gráficos, cuando sean solicitados.

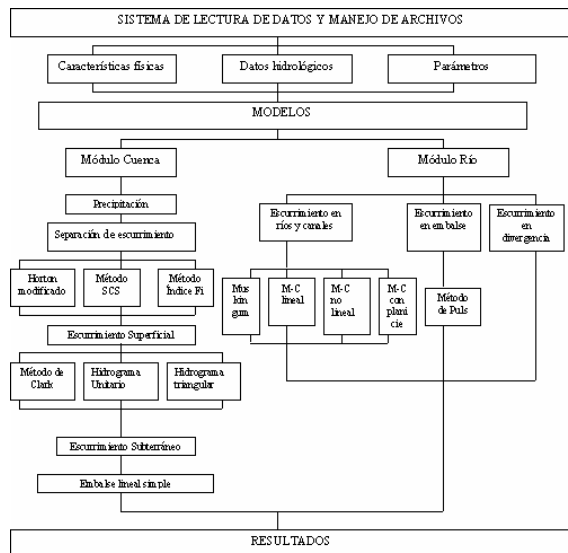


Figura 1: Estructura del sistema.

### 3. LOS ALGORITMOS

**Discretización de la cuenca:** para determinar el hidrograma de proyecto en cuencas pequeñas, donde las características de las precipitaciones son uniformes, no es necesario discretizar la cuenca en subcuencas. Pero en las que son mayores donde no hay uniformidades espaciales, donde existen embalses, modificaciones del lecho del río y áreas de inundación, sí es necesaria la subdivisión[3]. El sistema posibilita esta discretización considerando factores como: características hidrológicas y morfológicas homogéneas, localización de los puntos de interés, distribución espacial de las precipitaciones y de los embalses, entre otros.

**Módulo cuenca:** representa el proceso de transformación lluvia-caudal en cada una de las subcuencas en que se discretizó la cuenca total.

**Precipitación:** el algoritmo tiene por finalidad calcular el hietograma de cada subcuenca. Existen dos posibilidades: hietograma de proyecto y observado.

Los hietogramas, uno por cada pluviógrafo, se ingresan respetando un orden de numeración creciente. El algoritmo calcula la precipitación areal media para cada subcuenca según el método de los polígonos de Thiessen [4]. Si se trata de un hietograma de proyecto, existe la opción de ingresar la precipitación con una determinada ordenación definida por el usuario, en forma desagregada, en cuyo caso la tormenta se aplica directamente a la subcuenca para separar el escurrimiento y generar el hidrograma de escurrimiento superficial. O bien, está la opción de ingresar los valores de precipitación acumulada para cada intervalo de tiempo, extraídas de las curvas de intensidad-duración-frecuencia, en cuyo caso el algoritmo desagrega las precipitaciones acumuladas y permite reordenar la tormenta de proyecto variando el tiempo pico de la precipitación (Tpp) entre las

siguientes posiciones: 25, 50 y 75 % de la duración de la precipitación.

En el caso del hietograma observado se debe cargar para cada subcuenca los números de los pluviógrafos y sus correspondientes coeficientes de Thiessen para que el sistema calcule la precipitación media ponderada en cada intervalo de tiempo para cada subcuenca.

**Separación de escurrimiento:** la separación de la lluvia efectiva que va a ser utilizada para la determinación del hidrograma de escurrimiento puede realizarse mediante alguno de los siguientes algoritmos: Horton Modificado, Método del CN del SCS y Método de tasa de pérdida constante (índice Fi).

**Escurrimiento superficial:** la transformación de la lluvia efectiva en el hidrograma de escurrimiento directo puede realizarse mediante la elección de los siguientes algoritmos alternativos: Método Clark, Hidrograma Unitario Triangular (SCS) [5] e Hidrograma Unitario.

**Escurrimiento subterráneo:** es posible calcularlo a través del algoritmo Embalse Lineal Simple cuando se utiliza Horton Modificado para estimar la infiltración y la percolación.

**Módulo río:** comprende:

**Propagación en río:** el procedimiento básico de propagación de crecidas es el Método Muskingum en sus diferentes versiones: Muskingum clásico, Muskingum-Cunge lineal y no lineal, Muskingum-Cunge no lineal con planicie de inundación. Las dos últimas opciones admiten contribución lateral distribuida.

**Propagación en embalse:** basado en el método de Puls. El modelo simula la operación de diferentes estructuras de control (compuertas, orificios, vertedero libre, etc).

**Derivación de caudales:** incluye un algoritmo para simular un canal de derivación sin estructura de control.

### 4. FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

El sistema tiene un **menú principal** que cuenta con cuatro opciones: (Figura 2)

- **Menú Archivo:** presenta la opción de salir del sistema.
- **Menú Proyecto:** brinda la posibilidad de acceder a la gestión y ejecución de los proyectos de simulación.
- **Menú Cuenca:** permite gestionar (crear, eliminar, modificar) las cuencas que luego estarán disponibles dentro del sistema.
- **Menú Tormenta:** desde el cual se accede a la gestión de los eventos meteorológico que se utilizarán en las simulaciones.

Al acceder a la opción de **Gestión de cuencas**, se despliega la pantalla **Ingreso de Cuenca** (Figura 3) donde se debe ingresar el nombre, la descripción y el n° de estaciones de medición de lluvia.

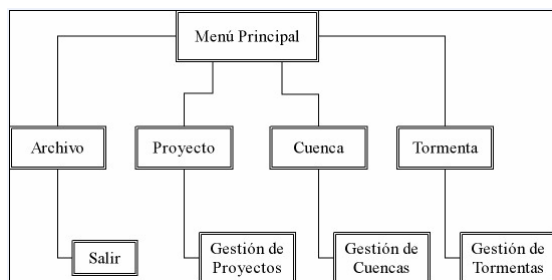


Figura 2: Menús.

Se selecciona de una lista desplegable el tipo de elemento (subcuenca, tramo de río, embalse, confluencia, hidrograma leído, derivación). Así se arma un esquema de la cuenca que se va a trabajar. Cada elemento va asociado a una operación hidrológica (transformación lluvia-caudal, propagación en río, propagación en embalse, suma de hidrogramas, derivación de caudales) y cada operación produce un hidrograma que es identificado con un n° y se ejecuta en forma secuencial.

Figura 3: Ventana que permite el ingreso de una cuenca.

Al acceder a la opción **Gestión de Tormentas** se despliega la pantalla **Ingreso de Tormenta** (Figura 4). Para crear un **Nuevo Proyecto** se abre la ventana **Gestión de Proyectos** (figura 5), donde se lo identifica con un nombre y una breve descripción. Luego se cargan los parámetros para cada una de las operaciones hidrológicas involucradas. Para **ejecutar** el proyecto se utiliza el formulario **Gestión de Proyectos**. Para **Visualizar resultados**, en forma gráfica o de reporte, basta seleccionar la operación y pulsar el botón correspondiente del mismo formulario.

Figura 4: Ventana que permite el ingreso de una tormenta.

Figura 5: Ventana para gestión de proyectos.

## 5. EJEMPLO DE APLICACIÓN GUALEGUAYCHÚ

### Descripción de la cuenca

La cuenca del río Guauguaychú se encuentra en la zona centro-este de la provincia de Entre Ríos. Tiene un clima de tipo sub-húmedo-húmedo. Presenta una red hidrográfica dendrítica con una alta densidad de drenaje [6].

La cuenca superior del río Guauguaychú (Figura 6) tiene una superficie de 470 km<sup>2</sup>, presentando una orientación general norte-sur. Su curso principal que se extiende desde sus nacientes hasta su intersección con el puente de la Ruta Nacional N° 130, tiene una longitud aproximada de 43 km y una pendiente media de 0.00051. El valle de inundación presenta pendientes transversales suaves, con un importante grado de ocupación agrícola ganadera. En general la cuenca presenta suelos con muy baja capacidad de infiltración, lo que unido a su geomorfología y a su régimen de lluvias (más de 1000 mm anuales) origina períodos con altos volúmenes de escorrentía superficial seguidos de otros muy escasos, que se toman casi nulos en épocas de estiaje prolongado [7].

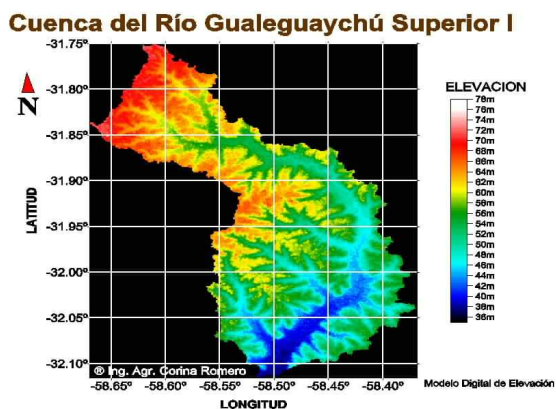


Figura 6: Mapa de la cuenca de la aplicación.

### Datos de la aplicación

Se utilizó el evento ocurrido el 11 de septiembre de 2002 (fuente: Instituto Nacional del Agua - INA, Centro Regional Litoral). Los datos pluviométricos corresponden a las estaciones: San Ernesto, La Clarita y Don Villavicencio.

Definida el área de aporte, fueron demarcadas 10 subcuencas, a las que se le determinaron las características físicas principales y para la propagación en río se utilizó una subdivisión en cinco tramos (Figura 7).

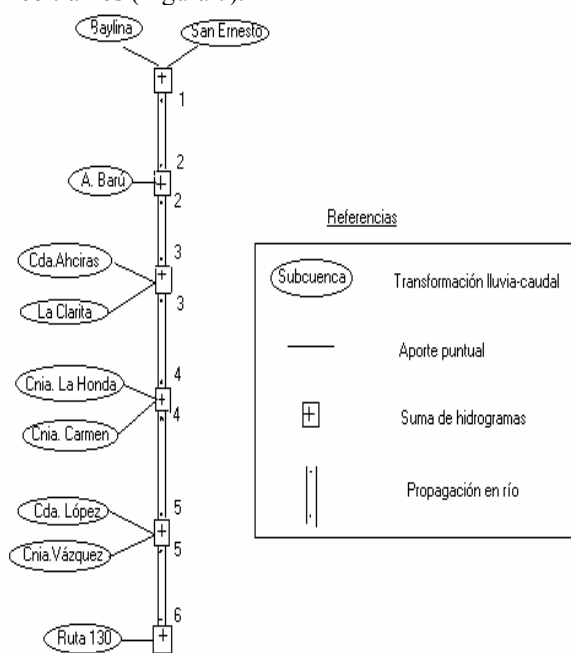


Figura 7: Discretización de la cuenca del río Gualeguaychú Superior.

Se obtuvieron registros de caudales continuos del limnógrafo de la estación hidrométrica localizada en la Ruta N° 130. Se utilizó la curva de descarga obtenida por Lenzi et al (2003).

### Aplicación del modelo

La Tabla n° 1 presenta la esquematización de la cuenca del Gualeguaychú Superior seleccionando los algoritmos hidrológicos y generando la secuencia de cálculo correspondiente. En las operaciones de

transformación lluvia-caudal se seleccionó el algoritmo N° de Curva del SCS para la separación de escurrimiento y el Hidrograma Unitario Triangular (SCS) para el escurrimiento superficial. En las propagaciones en río se seleccionó el algoritmo Muskingum Cunge Lineal por la limitación de los datos disponibles. Se efectuaron varias simulaciones para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning con el objeto de poder establecer el entorno de los tiempos de subida y al pico de los hidrogramas.

Hid.	Operación	Elemento	Datos de entrada
1	Tr.LI-C	Cnia. Baylina	Precip.
2	Tr.LI-C	San Ernesto	Precip.
3	Suma	Baylina+San Ernesto	Hid 1+Hid 2
4	Prop.en Río	Tramo 1-2	Hid 3
5	Tr.LI-C	Arroyo Barú	Precip.
6	Suma	Tramo1-2+A.Barú	Hid 4+Hid 5
7	Prop.en Río	Tramo 2-3	Hid 6
8	Tr.LI-C	Cda. Las Achiras	Precip.
9	Tr.LI-C	La Clarita	Precip.
10	Suma	Tramo2-3+Achiras+Clarita	Hid 7+Hid 8+Hid 9
11	Prop.en Río	Tramo 3-4	Hid 10
12	Tr.LI-C	Cnia. La Honda	Precip.
13	Tr.LI-C	Cnia. Carmen	Precip.
14	Suma	Tramo3-4+LaHonda+Carm en	Hid 11+Hid 12 +Hid 13
15	Prop.en Río	Tramo 4-5	Hid 14
16	Tr.LI-C	Cda. López	Precip.
17	Tr.LI-C	Cnia. Vázquez	Precip.
18	Suma	Tramo4-5+López+Vázquez	Hid 15+Hid 16+Hid 17
19	Prop.en Río	Tramo 5-6	Hid 18
20	Tr.LI-C	Ruta 130	Precip.
21	Suma	Tramo5-6+Ruta130	Hid 19+Hid 20

Tabla 1: Secuencia de cálculo y descripción de las operaciones hidrológicas.(Cuenca Gualeguaychú Superior)

### Resultados

El hidrograma final de la simulación se presenta en la Figura 8, junto al hidrograma observado. Se puede apreciar que, en cuanto a su forma y pico, responde adecuadamente a los datos observados; pero con una respuesta más tardía que la real. Y, en cuanto la conservación de masa, el modelo reproduce adecuadamente la realidad dado que el total escurrido en la simulación es de 17.41 hm<sup>3</sup> en contraste con los 17.76 hm<sup>3</sup> observados.

### 6. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado y aplicado a la cuenca superior del río Gualeguaychú muestra que es posible generar hidrogramas de proyectos a través de distintas simulaciones aplicadas a una cuenca específica.

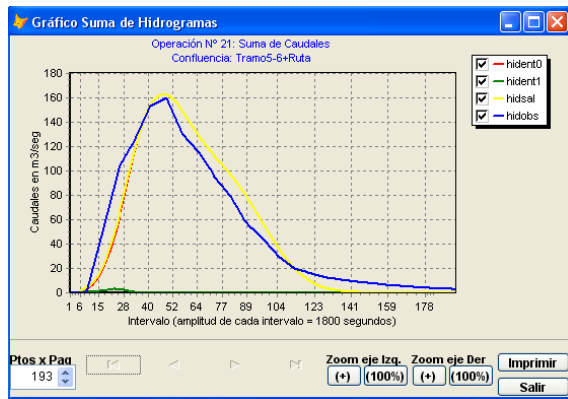


Figura 8: Hidrogramas observado y calculado en la ruta n° 130.

La metodología presentada permite al usuario elegir el mejor conjunto de algoritmos, para una cuenca determinada, en cada fase del proceso de transformación lluvia-caudal y en las propagaciones en río.

Los resultados alcanzados mostraron un buen ajuste, lográndose determinar la respuesta hidrológica de la cuenca ante una situación de elevada precipitación, con la consecuente validación del sistema.

Sin embargo, la herramienta generada está limitada por la información disponible. Los resultados en las simulaciones dependen, en gran medida de la existencia y confiabilidad de los datos observados. En este aspecto, es necesaria una toma de conciencia de la necesidad e importancia de la recolección y registro sistemático de datos de precipitación y de caudal, así como también de las características físicas de las cuencas, ríos y embalses.

El lenguaje de programación utilizado respondió adecuadamente, lográndose un sistema de manejo simple, aunque queda abierta la posibilidad de mejoras a partir de este trabajo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carlos E. Tucci, Eduardo Zamanillo, Hugo Pasinato; “Sistema de simulação precipitação-vação IPHS1”, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS; 1989.
- [2] U.S.Army, “Hydrologic Modeling Dystem HEC\_HMS, User’s manual”, U. S. Army Engineer Division, 2001.
- [3] Carlos Tucci, “Modelos hidrológicos”, Ed. Da Universidade / UFRGS / Associação brasileira de recursos hídricos, 1998.
- [4] H.E. Orsolini, E.D.Zimmermann, P.A.Basile; “Hidrología. Procesos y métodos”, UNR Editora – Editorial de la Universidad Nacional de Rosario, 2000.
- [5] Larry W. Mays, “Water Resources Engineering”, Copyright Jhon Wiley & Sons, Inc, 2001.

[6] Raúl A. Pedraza, “Estudio hidrológico rural cuenca río Gualeguaychú”, Informe final, Convenio Consejo General de Inversiones Provincia de Entre Ríos, 1991.

[7] Luis M. Lenzi y otros, “Estimación de la disponibilidad del recurso hídrico superficial con destino a riego, en una cuenca del centro-este de Entre Ríos”, Informe final, INA Centro Regional Litoral, 2003.