

# Implementación de un modelo hidrológico de balance diario para simular la transformación lluvia-caudal en áreas irrigadas

Silvina Ester San Miguel<sup>(1)</sup>, Carlos E. Alvez<sup>(2)</sup> y Eduardo A. Zamanillo<sup>(2)</sup>  
<sup>(1)</sup>Facultad de Ciencias de la Alimentación – <sup>(2)</sup>Facultad de Ciencias de la Administración  
Universidad Nacional de Entre Ríos  
Alvear 1424 – (3200) – Concordia – Entre Ríos  
[sanmiguel@fcal.uner.edu.ar](mailto:sanmiguel@fcal.uner.edu.ar); [caralv@ai.fcad.uner.edu.ar](mailto:caralv@ai.fcad.uner.edu.ar); [eduzam@ai.fcad.uner.edu.ar](mailto:eduzam@ai.fcad.uner.edu.ar)

## Resumen

Se presenta un modelo de simulación de la transformación lluvia-caudal y su correspondiente sistema computacional. Sus objetivos son: simular matemáticamente la respuesta hidrológica de las cuencas de aporte y extender series de caudal a partir de series de precipitación observadas para una planificación más racional y sustentable del uso, control y aprovechamiento de los recursos hídricos en áreas irrigadas.

Se basa en un esquema conceptual que representa los almacenamientos en la cuenca mediante tres reservorios: superficial, de humedad de suelo y subterráneo.

La variable determinante de entrada es la precipitación, mientras que las salidas de agua ocurren por evaporación directa de la lluvia, por evapotranspiración y por las salidas de los reservorios que conforman los escurrimientos superficial, subsuperficial y subterráneo.

Las transferencias de masa entre reservorios y hacia la atmósfera y la generación de los distintos tipos de escurrimiento están reguladas por funciones y algoritmos cuyos parámetros deben ser determinados mediante optimización.

Para el ajuste de parámetros se requieren series simultáneas de precipitación, evapotranspiración y caudales observados. Se aplica el algoritmo de optimización bloqueada de Rosenbrock.

El sistema computacional está implementado en el lenguaje Visual FoxPro. Éste le permite al usuario crear proyectos para organizar y administrar los datos de distintos cursos de agua de manera simple y eficiente. También, permite visualizar los valores observados y calculados, seleccionar períodos adecuados para el ajuste de parámetros, verificación de la validez de los mismos y, sobre la base de estos parámetros, extender series de caudales en períodos sin registros.

**Palabras clave:** simulación, balance hídrico, optimización de parámetros

## 1. Introducción:

Para la planificación de un empleo sustentable de los recursos hídricos superficiales de un país o de una región es de fundamental importancia el conocimiento de los volúmenes aportados por los cursos de agua, en lapsos suficientemente largos para que tengan validez los cálculos y estimaciones estadísticas.

En los organismos públicos y privados relacionados con los recursos no son utilizados modelos lluvia-escurrimiento para extender series de caudales, debido a que no tienen buena documentación en español o el personal profesional involucrado no ha recibido entrenamiento adecuado, o no está disponible una versión apta para la infraestructura computacional existente, (generalmente PC).

Esta carencia de software accesible y bien documentado redundo en el uso de técnicas simplificadas que involucran mayores márgenes de error, y que por lo tanto resultan en el sobre(sub)dimensionamiento de obras de infraestructura básica, como embalses o aprovechamientos a pelo de agua para abastecimiento de este recurso para uso doméstico, agrícola o industrial.

El objetivo específico de este trabajo consistió en desarrollar, implementar, testear, aplicar y documentar un modelo matemático hidrológico concentrado de simulación continua orientado a

extender series de caudales semanales a partir de la precipitación media diaria observada sobre una cuenca. En función del objetivo específico se efectuó la:

- Implementación de los algoritmos paramétricos conceptuales de simulación de las componentes del ciclo hidrológico para un modelo de balance de paso de tiempo diario y ajuste semanal.
- Implementación del algoritmo de optimización indirecta restringida (minimización de Función Objetivo) para la optimización automática de los parámetros del modelo.
- Aplicación del modelo a la cuenca superior del Río Gualeguaychú para simular la extensión de la serie de caudales.
- Preparación de la documentación del modelo.

El modelo que se presenta se basa en un esquema conceptual que representa los almacenamientos en la cuenca a través de tres reservorios ficticios, el reservorio superficial (agua que se almacena superficialmente), el reservorio de humedad de suelo o subsuperficial (agua almacenada en los horizontes superiores del suelo) y reservorio subterráneo (agua almacenada en las napas acuíferas).

El proceso de ajuste de parámetros se realiza de forma semiautomática mediante el empleo del algoritmo de optimización bloqueada de Rosenbrock que impone fajas viables a la variación de los parámetros.

A fin de poder llevar a cabo la calibración es preciso disponer de series simultáneas de precipitación, evapotranspiración y caudales observados.

El sistema computacional permite al usuario, organizar y administrar de manera simple y eficiente todos los datos necesarios para la operación del sistema.

En la sección 2, se describe el esquema conceptual del modelo; en la sección 3 el balance hídrico; en la 4, el algoritmo de optimización, en la sección 5 se describe el sistema computacional y en la sección 6 se muestra la aplicación a la cuenca superior del Río Gualeguaychú.

## 2. Esquema conceptual del modelo

El modelo de transformación lluvia-caudal que se implementa se basa en un esquema conceptual que representa los almacenamientos en la cuenca a través de tres reservorios ficticios, el reservorio superficial (agua que se almacena superficialmente), el reservorio de humedad de suelo o subsuperficial y el reservorio subterráneo (Zamanillo et al, 1991).

Las salidas de agua de la cuenca ocurren por la evaporación directa de la lluvia, por la evaporación o evapotranspiración de los reservorios superficial, de humedad de suelo y subterráneo y por el escurrimiento efluente de la cuenca constituido por los escurrimientos superficial, subsuperficial y subterráneo.

Los datos de entrada al modelo son la precipitación diaria y la evapotranspiración diaria, semanal o mensual. Si no se dispone de lecturas de evapotranspiración, ésta puede estimarse ingresando temperaturas medias diarias, semanales o

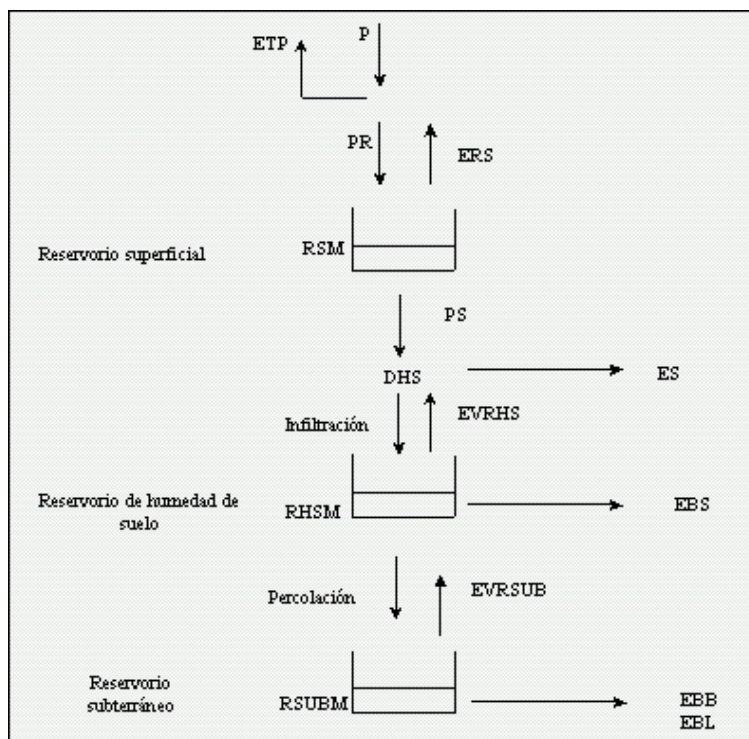


Figura 1: Esquema conceptual

mensuales o

mensuales. El sistema tiene incorporado el método de Thornthwaite para el cálculo de la evapotranspiración potencial. En la Figura 1 se presenta el esquema conceptual del modelo.

El intervalo de cálculo del modelo es diario, mientras que el intervalo de tiempo para ajuste y calibración es semanal.

### **3. Balance Hídrico**

El objetivo del algoritmo es realizar el balance hídrico en cada intervalo de tiempo, calculando los caudales efluentes de la cuenca y la evapotranspiración real. Para ello los datos de entrada son la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Inicialmente, la precipitación alimenta la evapotranspiración potencial hasta ser anulada o hasta satisfacerla. Si la precipitación es anulada por la evapotranspiración, la cuenca se encuentra en fase de recesión, en caso contrario, se halla en fase de recarga y de posible generación de escurrimiento.

Durante la fase de recesión, la demanda de evapotranspiración potencial que no fue satisfecha por la precipitación, se satisface inicialmente por el reservorio superficial y, de no ser suficiente, la demanda remanente se satisface total o parcialmente del reservorio de humedad de suelo. Si aún existe evapotranspiración residual, en algunos casos puede ser satisfecha en forma parcial por el reservorio subterráneo. Del reservorio de humedad de suelo existe percolación al reservorio subterráneo. Por las salidas de los reservorios de humedad de suelo y subterráneo se genera el escurrimiento base.

En la fase de recarga la precipitación remanente de la evapotranspiración potencial satisface en primer término el déficit del reservorio superficial hasta que alcance su altura máxima. Del agua que llega al suelo una parte infiltra y otra genera escurrimiento superficial. Parte del agua infiltrada entra al reservorio de humedad de suelo y desde allí percola hacia el reservorio subterráneo. Cuando este alcanza su capacidad máxima, el excedente genera escurrimiento base adicional. Al igual que en la fase de recesión, la secuencia final corresponde al agotamiento de los reservorios de humedad de suelo y subterráneo que producen el escurrimiento base.

#### **3.1 Descripción de los procesos.**

Las variables y parámetros que se mencionan están descritos en la Tabla 1.

##### **3.1.1 Precipitación**

Para tratar los datos de precipitación el modelo posibilita correcciones a los errores sistemáticos de medición debidos a una defectuosa cobertura espacial de los aparatos de registro.

La necesidad de corregir la precipitación de entrada puede detectarse cuando el volumen total de escurrimiento calculado difiere significativamente del volumen total de escurrimiento observado para cualquier conjunto de parámetros de ajuste.

##### **3.1.2 Evapotranspiración**

El modelo compara la precipitación con la evapotranspiración potencial. Si la precipitación supera la ETP, se está en fase de recarga; en caso contrario se ingresa en fase de recesión.

En fase de recarga, la ETP se satisface de la precipitación. La evapotranspiración real coincide con la potencial, por lo tanto no habrá evapotranspiración en el reservorio superficial ni en el reservorio de humedad de suelo. En la fase de recesión, la demanda de evapotranspiración remanente se satisface en el reservorio superficial hasta agotarlo; luego, del reservorio de humedad de suelo y, de ser necesario, del reservorio subterráneo.

Para extraer agua del reservorio de humedad de suelo se consideran dos alternativas:

- Extracción del agua sin restricción y hasta alcanzar el límite mínimo admisible de humedad de suelo (correspondiente aproximadamente al punto de marchitez permanente de las plantas) y / o satisfacer la demanda.

- Extracción del agua con restricciones proporcionales al estado del reservorio de humedad de suelo (ecuación 1)

$$EVRHS = EX * (ERHS / RHSM)^{EX1} \quad (1)$$

En la determinación de la evaporación correspondiente al reservorio subterráneo interviene el parámetro EVSUB. Este parámetro determina qué fracción de la evapotranspiración potencial remanente será satisfecha por el reservorio subterráneo.

<b>Variables y parámetros</b>	
P	Precipitación total media en la cuenca
ETP	Evapotranspiración potencial
ES	Escurrimiento superficial
EBS	Escurrimiento subsuperficial
EBB	Escurrimiento subterráneo
ERS	Evapotranspiración del reservorio superficial
EVRHS	Evapotranspiración del reservorio humedad de suelo
EVRSUB	Evapotranspiración del reservorio subterráneo
ESRS	Estado del reservorio superficial
ERHS	Estado del reservorio de humedad de suelo
ERSUB	Estado del reservorio subterráneo
<b>Parámetros</b>	
HSMIN	Define la proporción permitida de evapotranspiración en el reservorio de humedad de suelo
RSM	Capacidad máxima del reservorio superficial
RHSM	Capacidad máxima del reservorio de humedad de suelo
KRHS	Coefficiente de agotamiento del reservorio de humedad de suelo
RSUBM	Capacidad máxima del reservorio subterráneo
KRSUB	Coefficiente de agotamiento del reservorio subterráneo
IB	Infiltración base
R	Coefficiente de infiltración secundaria
RSSM	Límite mínimo del reservorio de humedad de suelo
EVSUB	Fracción de evapotranspiración remanente que se satisface del reservorio subterráneo
KEBL	Coefficiente que regula el escurrimiento lateral del reservorio subterráneo.
EX1	Coefficiente de evaporación del reservorio de humedad de suelo
<b>Variables auxiliares</b>	
PR	Precipitación eficaz
PSB	Infiltración
DHS	Déficit de humedad de suelo

Tabla 1: Variables que intervienen en el Balance Hídrico

### 3.1.3 Reservorios superficial, de humedad de suelo y subterráneo

El reservorio superficial representa la intercepción de la precipitación por parte de la vegetación y la retención en las depresiones impermeables del suelo. La única entrada que admite es la precipitación remanente de la evapotranspiración y la única salida es la satisfacción de la misma en períodos sin lluvia o cuando excede la precipitación. En función de la retención que ejerce, produce un retardo en la respuesta de la cuenca cuando ocurren precipitaciones de baja intensidad.

El reservorio de humedad de suelo simula el almacenamiento del agua en las capas superiores del suelo. La entrada es la infiltración resultante de la separación de escurrimientos. En fase de recesión, puede satisfacer la evapotranspiración potencial residual generando una salida de evapotranspiración real. Además, genera percolación hacia el reservorio subterráneo.

El reservorio subterráneo simula el comportamiento del acuífero subterráneo. La única entrada admitida es la percolación del agua desde el reservorio de humedad de suelo y sus salidas son la generación de escurrimiento subterráneo en función del nivel de almacenamiento, la generación de escurrimiento lateral, cuando existe y, en algunos casos, la satisfacción de la evapotranspiración potencial remanente en la fase de recesión.

### 3.1.4 Separación de escurrimientos

El algoritmo de separación de escurrimientos define la proporción de la precipitación que alcanza la superficie permeable de la cuenca y produce escurrimiento superficial y la proporción que infiltra.

La capacidad de infiltración en cada intervalo de tiempo queda definida por el déficit de humedad de suelo y por la magnitud de la lluvia eficaz en el intervalo (ecuación 2).

$$PSB = R * PR * DHS + IB \quad (2)$$

El déficit de humedad de suelo (DHS) está dado por la diferencia entre la capacidad máxima del reservorio y el estado del mismo. Es máximo cuando el reservorio de humedad de suelo presenta el mínimo nivel de almacenamiento y es nulo si el reservorio alcanza su capacidad máxima. La pendiente de las rectas que relacionan la capacidad de infiltración con el DHS depende de un parámetro R mayor o igual que cero.

Si la infiltración calculada resulta menor que la precipitación eficaz, el escurrimiento superficial es igual a la diferencia entre la precipitación eficaz y la infiltración calculada.

### 3.1.5 Percolación

La percolación (PB) es el proceso mediante el cual el reservorio de humedad de suelo abastece al reservorio subterráneo. El algoritmo utilizado determina que una fracción de lo que infiltra en cada intervalo de tiempo percola al reservorio subterráneo en función del estado del mismo (ecuación 3).

$$PB = PSB * (RSUBM - ERSUB) / (PSB + RSUBM - ERSUB) \quad (3)$$

Si el déficit del reservorio subterráneo es muy alto con relación a la infiltración, prácticamente toda el agua que infiltra pasa a alimentar el reservorio subterráneo. Si por el contrario, el reservorio subterráneo alcanza su capacidad máxima, la tasa de percolación es nula.

### 3.1.6 Escurrimiento base

Las dos fases del balance, recarga y recesión, culminan en el cálculo de escurrimientos y actualización del estado de los reservorios. El escurrimiento base es la suma de los escurrimientos subsuperficial, aportado por el reservorio de humedad de suelo, y el escurrimiento subterráneo, aportado por el reservorio subterráneo.

Los escurrimientos subsuperficial y subterráneo se obtienen de propagar las salidas de los reservorios mediante un embalse lineal simple, (ecuaciones 4 y 5) con tiempos de retardo KRHS y KRSUB, respectivamente:

$$EBS = ERHS * (1 - \text{EXP}(-KRHS)) \quad (4)$$

$$EBB = ERSUB * (1 - \text{EXP}(-KRSUB)) \quad (5)$$

## 4. Optimización de parámetros

Los distintos parámetros que caracterizan los algoritmos empleados para simular procesos hidrológicos, sintetizan las características físicas de una cuenca y requieren ser ajustados para cada aplicación particular. La aplicación de técnicas de optimización a modelos hidrológicos permite reducir el tiempo para la estimación de los valores correspondientes a los parámetros del modelo.

Para el ajuste de los parámetros del balance hídrico se implementa un algoritmo de optimización basado en el método de rotación de coordenadas de Rosenbrock (1960).

El método de rotación de coordenadas establece, para una función dependiente de  $n$  variables,  $n$  ejes ortogonales que define como direcciones de búsqueda. Elegida una dirección y realizada la primera

tentativa en esta dirección, puede ocurrir un suceso (disminución de la función objetivo) o una falla. En caso de suceso, las variables quedan alteradas para este nuevo valor y se acelera el paso en el mismo sentido; en caso de falla, las variables continúan con sus valores anteriores y en la próxima tentativa en esta dirección se cambia el sentido. Las modificaciones continúan hasta que ocurra por lo menos un suceso y una falla en cada dirección. La tentativa siguiente es realizada en la nueva dirección hasta que todas las variables sean alteradas. Cuando ya no se logra minimización, se adopta el valor de la variable que produzca la menor función objetivo. Una vez que el ciclo se completa, para el ciclo siguiente las coordenadas sufren una rotación atendiendo a la alteración total de cada variable. El primer eje del segundo ciclo tiene la dirección del vector determinado por los puntos inicial y final del primer ciclo. Los siguientes ejes deben ser normales al anterior. La búsqueda se reitera en cada ciclo de la misma forma y se interrumpe cuando se obtiene la precisión deseada o se alcanza el máximo de iteraciones preestablecido.

La rutina está preparada para soportar la optimización de un máximo de veinte parámetros y permite trabajar con o sin fajas de viabilidad para los parámetros. Inicialmente determina la matriz de direcciones de movimiento de los parámetros y el sentido en que se realizará el mismo. El movimiento del valor de los parámetros continúa con aceleración constante mientras existe disminución de la función objetivo. Ocurredada una falla, vuelve al punto anterior donde existió mejoría y reitera el proceso retomando el paso inicial o contrayéndolo.

Si existe rango de viabilidad para los parámetros, cada movimiento verifica el valor de cada uno a fin de evitar que salgan del rango o que estén dentro de las fajas limítrofes inferior o superior del mismo.

Recorrida la matriz de direcciones iniciales, si no se llegó a optimizar según el criterio de tolerancia, se rotan los ejes mediante la obtención de una nueva matriz de direcciones perpendiculares a las iniciales a partir de la alteración total sufrida por los parámetros. La rutina se reitera desde el inicio.

En el caso de que uno o más parámetros no hayan sufrido cambios, se reducen las dimensiones de la matriz de direcciones, esto se permite mientras el número de dimensiones sea mayor que dos.

La optimización se detiene si se alcanza el máximo de iteraciones, la tolerancia preestablecida o si no es posible una mayor contracción del paso.

## **5. Sistema**

La estructura del sistema se divide en dos grandes partes:

- *Administración de Proyectos*: El objetivo de la administración de proyectos, es permitir al usuario administrar datos de distintos cursos de agua, de manera simple y eficiente.
- *Operaciones*: Permite al usuario: Ajustar parámetros, verificar la validez de los mismos y extender series de caudal.

### **5.1 Administración de Proyectos**

El sistema permite al usuario, organizar y administrar de manera simple y eficiente todos los datos necesarios para la operación del sistema. Para esto, el usuario tiene la posibilidad de crear proyectos para cada curso de agua con el que desee trabajar. Los datos que utiliza el sistema para poder la realizar las distintas operaciones son:

*Datos observados*: Por cada curso de agua con que el usuario quiera trabajar, se necesitan datos de precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados de manera simultánea.

*Información sobre los datos* (metadatos): El sistema permite que el usuario ingrese información descriptiva de los diferentes cursos de agua. Además, registra automáticamente otros metadatos necesarios para controlar que las operaciones que se realicen, se ejecuten de manera segura y eficiente, tales como: si cuenta o no con datos de precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados para el curso de agua del proyecto actual y los períodos en los que cuenta con dichos datos.

*Datos de control:* Cada proyecto puede contar, por cada curso de agua, con distintos datos de control necesarios para realizar las operaciones de ajuste de parámetros, verificación y extensión de series de caudal. Entre estos datos se tiene:

- Identificación del registro del control.
- Identificación del proyecto con el que está relacionado el registro de control.
- Período en el que se realizará la operación (ajuste, verificación o extensión).
- Estados iniciales de los reservorios.
- Retardos de escurrimientos de los distintos reservorios.
- Valores iniciales de los parámetros a optimizar, verificar, o a utilizar.
- Valores máximos, mínimos, paso de cada parámetro y otras opciones para el algoritmo de optimización.

En cualquier sesión del sistema, el usuario estará posicionado en un proyecto (Proyecto actual). De esta manera, los datos observados y de control que se encuentran disponibles en ese momento para realizar las distintas operaciones, son los correspondientes a dicho proyecto. Cuando el usuario ingresa al sistema, el proyecto actual es el que estuvo trabajando en la última sesión.

Para la administración de proyectos el sistema le brinda al usuario las siguientes opciones:

- *Crear un nuevo proyecto:* se crea la estructura necesaria para almacenar los datos descriptivos y observados del proyecto.
- *Cambiar proyecto:* Le permite al usuario cambiar el “*Proyecto actual*”.
- *Eliminar proyecto:* Cuando el usuario selecciona la opción eliminar proyecto, el sistema le muestra con qué datos observados cuenta el proyecto. Si el usuario confirma la eliminación, dichos datos son eliminados.
- *Importar datos:* El sistema permite importar datos observados de planillas Excel (.xls). Las unidades de entrada / salida para precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados se muestran en la Tabla 2.
- *Exportar datos:* Permite exportar datos de precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados del proyecto actual a planillas Excel (xls).

	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
Precipitaciones	Valores diarios	Valores diarios
Evapotranspiración	Evapotranspiración diaria o semanal. Temperaturas medias diarias, semanales o mensuales. Se estima evapotranspiración por el método de Thornthwaite.	Valores diarios de evapotranspiración
Caudal	Valores diarios o semanales.	Valores semanales

Tabla 2: Unidades de entrada / salida para precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados

## 5.2 Operaciones

Las distintas operaciones que permite realizar el sistema son: Ajuste de parámetros, Verificación y Extensión de series de caudal.

### 5.2.1 Ajuste de Parámetros

Para poder utilizar la operación de *Ajuste de parámetros* para un proyecto determinado, el mismo debe contar con datos de precipitaciones, evapotranspiración y caudales observados. La pantalla de *Ajuste de parámetros* (Figura 2) brinda las siguientes opciones:

- *Seleccionar datos de control a utilizar:* permite seleccionar un registro de control mediante una lista desplegable. En esta lista, sólo se muestran los registros de control correspondientes al proyecto actual. Una vez seleccionado un registro, los datos de control del mismo se utilizarán para el cálculo del balance hídrico y optimización de parámetros.

- *Modificar datos de control:* permite al usuario modificar cualquier dato del registro actual del archivo de control (Figura 3).

- *Visualizar datos observados del proyecto:* Esta opción permite visualizar en forma gráfica los datos observados de precipitaciones, evapotranspiración y caudales del proyecto actual, para de esta manera, facilitar la búsqueda de un período apropiado para realizar el ajuste (Figura 4).

- *Optimizar parámetros mediante la rutina de Rosenbrock:* Esta rutina realiza la optimización de los parámetros a los cuales se les ha establecido rangos de variación. Esta optimización se realiza utilizando algunas de las siguientes funciones objetivo:

- Función cuadrática

$$\sum_{i=1}^n (QO_i - QC_i)^2$$

- Función inversa

$$\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{QO_i} - \frac{1}{QC_i} \right)^2$$

- Coeficiente de determinación  $R^2$ .

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QO_i - QC_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QO_i - \bar{QO})^2}$$

donde:  $QO_i$  y  $QC_i$  corresponden a los caudales observados y calculados del período  $i$ ,  $\bar{QO}$  indica los caudales medios observados y  $n$  es la cantidad de períodos.

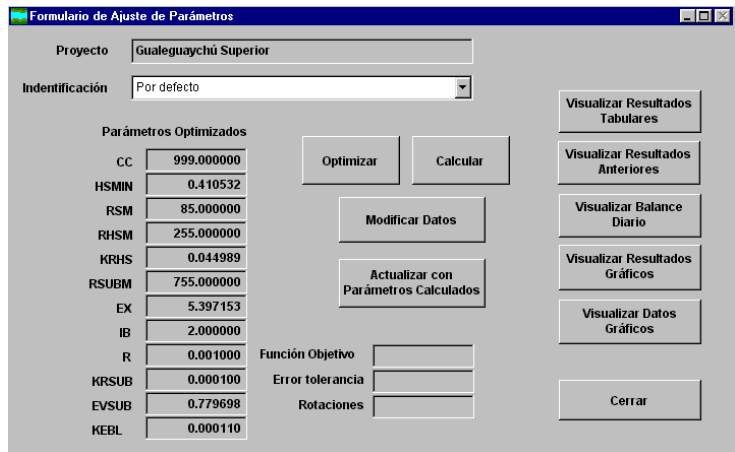


Figura 2: Pantalla utilizada para el Ajuste de Parámetros.

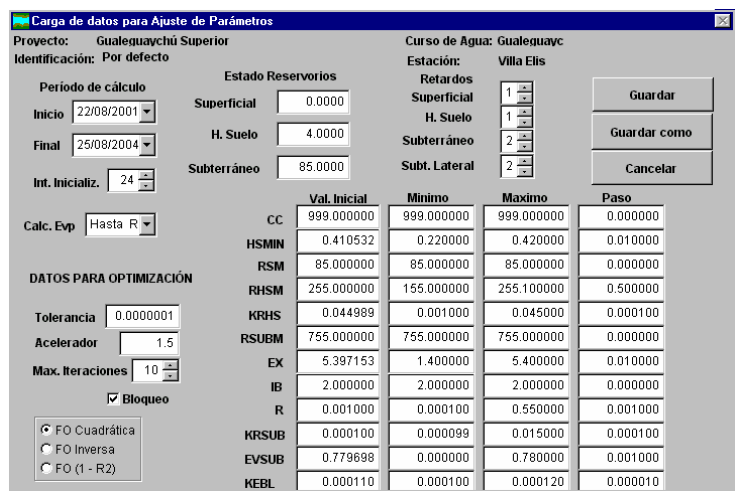


Figura 3: Pantalla para la modificación de datos de control.

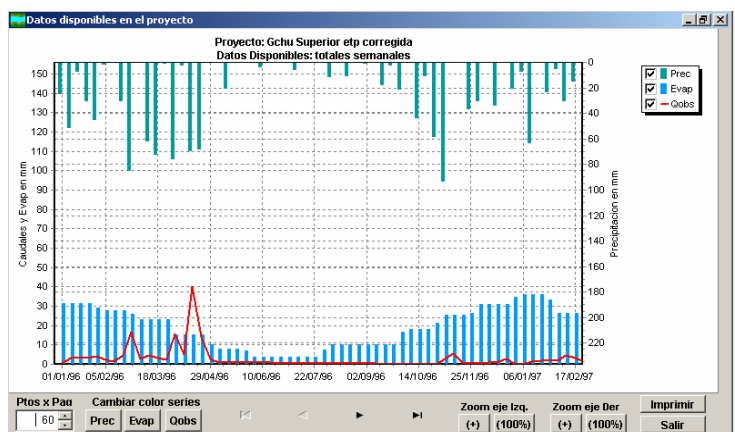


Figura 4: Pantalla para la visualización de datos observados.



Esta rutina retornará el conjunto de parámetros que hace mínima la función objetivo seleccionada.

- **Actualizar parámetros en el archivo de control con parámetros optimizados:** actualiza el archivo de control con los parámetros optimizados.
- **Calcular balance hídrico:** Esta operación se ejecuta utilizando los datos del registro actual de la tabla de control. Este proceso tiene como salida una tabla que muestra resultados diarios y otra con resultados semanales y estadísticos.
- **Visualizar balance diario:** Esta opción permite observar con intervalos diarios la evolución del cálculo de caudal y todas las componentes que intervienen en él (Figura 5). Su objetivo es permitir realizar un análisis detallado del modelo.
- **Visualizar resultados semanales y estadísticos:** los resultados del cálculo se pueden observar en forma tabular (Figuras 6), donde se muestra una grilla con las variables más importantes a analizar, o en forma gráfica (Figura 7), donde el usuario puede seleccionar qué variables visualizar con casillas de verificación.

En cada una de estas salidas, se tiene opción de: Imprimir, exportar y guardar con otro nombre.

### 5.3 Verificación

Los requerimientos para ejecutar esta opción son los mismos que para ajuste de parámetros. En la pantalla de verificación de parámetros se le permitirá al usuario:

- **Seleccionar un juego de parámetros:** El sistema permite seleccionar un juego de parámetros, mostrándole al usuario el campo de identificación del archivo de control (*id\_control*) en una lista

Fecha	P	Prem	Dhs	Dsup	Dsub	Esrs	Erhs	Ersb	Inf	PerSub	PerHum	EscRHS	EscSub	EscSup
07/08/04	0.00	0.00	31.42	275.98	38.44	7.00	73.95	349.04	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
08/08/04	0.00	0.00	33.00	276.05	38.96	5.42	73.87	348.52	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
09/08/04	0.00	0.00	34.58	276.13	39.48	3.84	73.80	348.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
10/08/04	0.00	0.00	36.16	276.20	40.00	2.26	73.73	347.47	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
11/08/04	0.00	0.00	37.74	276.27	40.53	0.68	73.65	346.95	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
12/08/04	0.00	0.00	39.32	276.35	41.05	0.00	72.69	346.43	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
13/08/04	0.00	0.00	40.00	277.31	41.57	0.00	71.05	345.91	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
14/08/04	0.00	0.00	40.00	278.95	42.09	0.00	69.41	345.40	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
15/08/04	0.00	0.00	40.00	280.59	42.60	0.00	67.78	344.88	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
16/08/04	0.00	0.00	40.00	282.22	43.12	0.00	66.14	344.36	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00
17/08/04	4.90	0.00	40.00	283.86	43.64	3.32	66.08	343.84	0.00	0.00	0.00	0.07	0.52	0.00

Figura 5: Visualización de variables del balance en intervalos diarios

Fecha	Lluvia	Qobs	Eshum	Essub	Essu	Qcal	Estat	EvpPot	Evsup	Evsups	EvsSubt	EvpT
22/08/2001	26.00	3.37	0.92	0.03	0.00	0.96	0.04	11.83	3.22	0.00	0.00	5.61
29/08/2001	44.00	11.56	0.81	0.04	0.00	0.86	0.06	25.27	25.27	0.00	0.00	0.00
05/09/2001	8.50	3.97	0.59	0.04	0.00	0.64	0.06	43.26	34.76	0.00	0.00	0.00
12/09/2001	0.00	2.02	0.43	0.04	0.00	0.48	0.05	26.60	5.35	0.00	0.00	16.55
19/09/2001	14.00	1.61	0.32	0.02	0.00	0.35	0.03	70.63	0.00	0.00	0.00	44.11
26/09/2001	134.60	45.97	0.24	0.00	15.92	16.17	0.00	49.14	0.21	0.00	0.00	18.24
03/10/2001	176.00	62.43	0.30	0.00	115.86	116.17	0.01	8.75	6.86	0.00	0.00	0.00
10/10/2001	55.00	70.77	0.53	0.03	22.03	22.59	0.04	9.59	9.45	0.00	0.00	0.00
17/10/2001	0.00	10.01	0.44	0.04	6.41	6.90	0.05	17.29	17.29	0.00	0.00	0.00
24/10/2001	77.60	6.99	0.35	0.04	31.74	32.14	0.06	15.75	14.77	0.00	0.00	0.75
31/10/2001	60.00	4.97	0.34	0.05	29.80	30.31	0.07	27.65	23.80	0.00	0.00	0.00

Figura 6: Pantalla para la visualización de resultados en forma tabular.

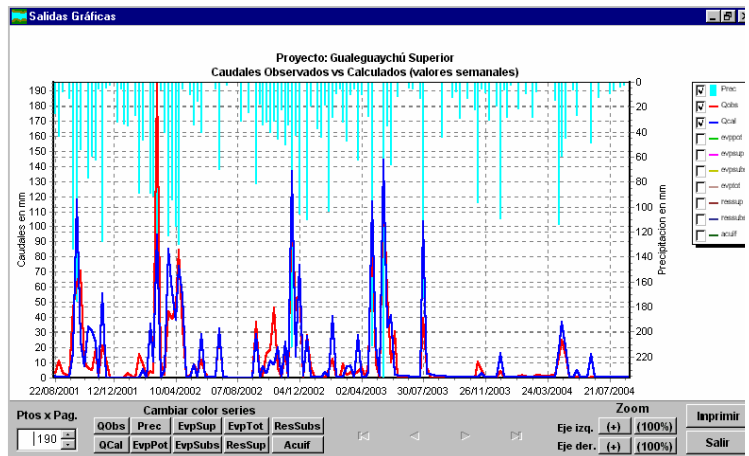


Figura 7: Pantalla para la visualización de resultados en forma gráfica

Verificación

Parámetros de verificación: **optimización 5**

Parámetros optimizados:

- CC: 999.000000
- HSMIN: 0.350000
- RSM: 85.000000
- RHSM: 255.000000
- KRHS: 0.044000
- RSUBM: 755.000000
- EX: 5.397000
- IB: 2.840000
- R: 0.001000
- KRSUB: 0.000085
- EVSUB: 0.779000
- KEBL: 0.000110

Período verificación:

- Inicio: 31/12/1997
- Final: 30/01/2002

Período optimización:

- Desde: 22/08/2001
- Hasta: 25/08/2004

Identificación: **optimización 5**

Figura 8: Pantalla utilizada para la verificación de parámetros.

- Visualizar datos observados del proyecto
- Seleccionar un período para la verificación. En esta opción el sistema permite seleccionar un período de cálculo distinto al utilizado en la operación de *Ajuste de parámetros*, para de esta manera de verificar si el juego de parámetros ajustado, puede ser utilizado para extender series de caudal
- Calcular el balance hídrico para el período de verificación.
- Visualizar balance diario
- Visualizar Resultados

#### 5.4 Extensión de series de caudal

Con esta operación, el usuario puede utilizar parámetros verificados para extender series de caudal en períodos en los que no se cuentan con registros de caudal. Para poder utilizar esta operación se requiere contar con datos de precipitaciones y evapotranspiración en el período de cálculo.

Las opciones que permite la pantalla de *Extensión de series de caudal*, son similares a las que brinda la pantalla de Verificación (Figura 8). La diferencia entre estas dos operaciones es que al no contar con caudales observados, no se realizan cálculos estadísticos, por lo tanto, estos valores no se muestran en las salidas.

### 6. Aplicación a la cuenca superior del Río Gualeguaychú

Con el objeto de validar el modelo desarrollado, se adoptó la cuenca superior del río Gualeguaychú. La cuenca del río Gualeguaychú se ubica en la zona centro - este de la Provincia de Entre Ríos. (Figura 9). Tiene una superficie de 470,3 km<sup>2</sup> y presenta orientación general Norte-Sur. Su curso principal se extiende desde sus nacientes hasta su intersección con el puente de la Ruta Nacional N ° 130. En general la cuenca muestra suelos con muy baja capacidad de infiltración, lo que unido a su geomorfología y al buen régimen de lluvias (más de 1000 mm anuales), origina períodos con altos volúmenes de escorrentía superficial seguidos de otros muy escasos, que se tornan casi nulos en épocas de estiaje prolongado.

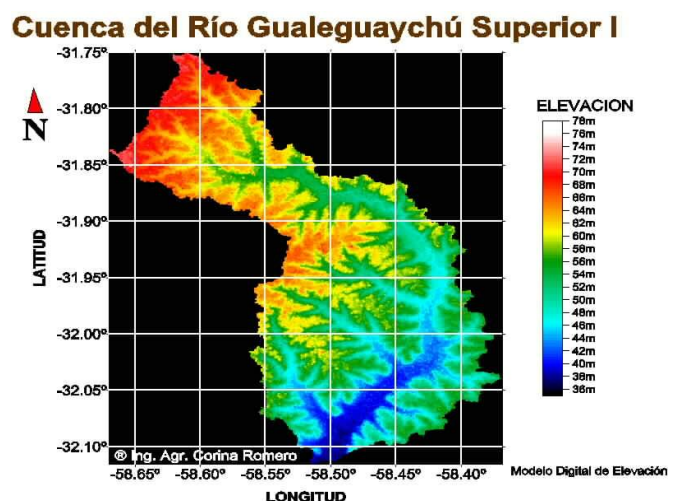


Figura 9: Cuenca superior del Río Gualeguaychú

Para la aplicación del modelo, se adoptó el período 16/10/2002 al 23/11/2004 para el ajuste de parámetros, mientras que para la verificación, se consideraron dos etapas, desde el 10/10/2001 al 15/10/2002 verificación con existencia de registros continuos de caudal y, desde el 05/01/1994 al 09/10/2001, sin registros continuos de caudal. Los valores de los parámetros obtenidos por optimización se muestran en la tabla 3. La tabla 4 compara los caudales observados en cada período con los caudales calculados por el modelo y muestra el coeficiente de determinación R<sup>2</sup> obtenido. Las Figura 10 y 11 permiten ver gráficamente el contraste entre caudales calculados y observados en el período de ajuste y en el período de verificación con registros continuos de caudal.

Parámetros optimizados												
CC	HSMIN	RSM	RHSM	KRHS	RSUBM	EX	IB	R	KRSUB	EVSUB	KEBL	EX2
999	0,35	44 mm	288 mm	0,0001	688 mm	0,016	4,6 mm	0,002	0,000055	0,35	0,0001	6,2

Tabla 3: Conjunto de parámetros optimizados.

**Contraste de caudales, componentes del caudal calculado y coeficiente R<sup>2</sup>**

Período	P(mm)	Qo(mm)	Qc(mm)	Qo/P	Qc/P	ES(mm)	EBS(mm)	EBB(mm)	EBL(mm)	EBL Anual	Dif. Esc.	R2
<b>Ajuste</b>	2531,00	844,32	842,86	0,33	0,33	804,47	12,29	26,11	-0,17%	47,47	23,00	0,95
<b>Verificación</b>	1480,00	622,18	619,39	0,42	0,42	600,39	8,17	10,83	-0,45%	19,69	21,00	0,92
Períodos de verificación sin registros continuos de caudal												
Período	P(mm)	Qo(mm)	Qc(mm)	Qo/P	Qc/P	ES(mm)	EBS(mm)	EBB(mm)	EBL(mm)	EBL Anual	Dif. Esc.	R2
05/01/94-06/12/95	2191,40	240,70	390,36	0,11	0,18	354,14	10,72	25,50	46,36	23,93	62,18%	0,68
13/12/95-07/01/98	2554,90	349,34	362,41	0,14	0,14	333,34	3,71	25,36	46,10	22,01	3,74%	0,79
14/01/98-01/09/99	1841,50	699,59	494,50	0,38	0,27	464,42	8,67	21,41	38,93	23,60	-29,32%	0,56
08/09/99-03/10/01	3190,20	1146,46	1095,09	0,36	0,34	1056,67	12,85	25,57	46,50	22,24	-4,48%	0,81

Tabla 4: Comparación de caudales, coeficientes de escurrimiento y valor de R<sup>2</sup> en los períodos de ajuste y verificación

En las verificaciones correspondientes a la etapa sin registros continuos de caudal, los períodos 1 y 3 presentan resultados calculados muy diferentes de los observados. Se analizaron los hidrogramas obtenidos con agregación de 24 semanas. De la observación surge que los caudales observados presentan errores sistemáticos (error de lectura por exceso en los estiajes indicando un escurrimiento de base mayor a las respuestas observadas en los demás períodos además de la pérdida de algunos picos).

Los períodos 2 y 4 manifiestan un buen ajuste entre caudales calculados y observados con diferencias de escurrimientos que varían entre  $\pm 5\%$ . Estos períodos carecen de errores sistemáticos de observación. Existen errores puntuales de no registro de algunos picos. Problema debido a que las lecturas se efectuaban una sola vez en el día y la cuenca presenta un tiempo de concentración pequeño.

Los resultados de las verificaciones efectuadas en distintos períodos permiten validar la aplicación del modelo a la extensión de series de caudal a partir de series de precipitación y evaporación.

En este sentido, se generó para la cuenca de estudio, la serie de caudales correspondiente al período 01/06/1983 – 04/01/1994. La tabla 5 informa los resultados obtenidos en la extensión. Se presentan los totales en mm correspondientes a precipitaciones, escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial, escurrimiento subterráneo, caudal calculado, escurrimiento subterráneo lateral, evapotranspiración potencial, evapotranspiración de cada uno de los reservorios y evapotranspiración real calculada. El escurrimiento subterráneo lateral medio anual calculado alcanza un valor de 22,4 mm / año.

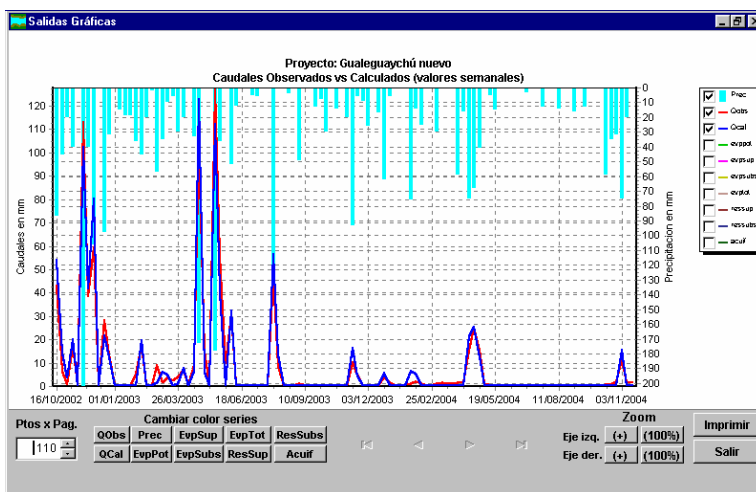


Figura 10: Contraste de caudales en el período de ajuste

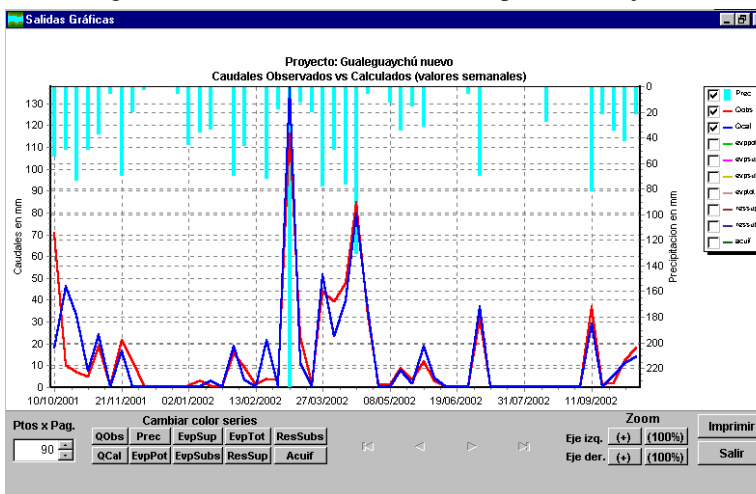


Figura 11: Contraste de caudales en el período de verificación.

Resultados de la extensión de series de caudal										
Lluvia (mm)	ES (mm)	EBS (mm)	EBB (mm)	Qc (mm)	EBL (mm)	Evppot (mm)	Evpsup (mm)	Evpsubs (mm)	Evpsubt (mm)	Evptot (mm)
12255,20	2475,25	39,32	131,10	2645,68	238,36	10010,72	5869,53	2083,14	361,56	9339,25

Tabla 5: Resultados generados en la extensión de series de caudal

Del análisis de la aplicación completa, se puede afirmar que el modelo no presenta incoherencias en sus respuestas. En años con lluvias menores a 1250 mm, el coeficiente de escurrimiento varía entre 0.05 y 0.23, mientras que para precipitaciones superiores a 1250 mm anuales, los coeficientes de escurrimiento varían entre 0.25 y 0.46. El coeficiente de escurrimiento es más alto ante precipitaciones de magnitud similar cuando los períodos anteriores presentaron precipitaciones anuales importantes.

### Conclusiones:

La validación del modelo desarrollado posibilita una mayor comprensión del comportamiento de una cuenca; consecuentemente, beneficiará la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico superficial y el análisis de riesgo asociado.

La implementación del modelo respondió adecuadamente a la problemática que se pretendía resolver. Se logró un sistema de manejo simple, que le brinda al usuario distintas formas de ayuda.

Una herramienta de gran importancia para la aplicación del modelo a diferentes cuencas es la rutina de optimización de parámetros incluida en el sistema. Un usuario que conozca el comportamiento general de una cuenca puede establecer con facilidad rangos de viabilidad para los parámetros que intervienen en el modelo o incluso, dejar sin efecto algunos de ellos. De esta forma es posible determinar los parámetros en tiempo reducido

Los resultados del modelo dependen en gran medida de la confiabilidad de los datos observados. Es preciso que en cada sector se tome conciencia de la importancia de la recolección y registro sistemático de datos de precipitación, evapotranspiración y caudal en cada embalse a fin de poder aplicar esta metodología.

### Bibliografía:

1. ROSENBROCK, H., (1960). An automatic method for finding the greatest or best value of a function, Computer Journal 3 (1960)
2. ZAMANILLO, E.; CAAMAÑO NELLI, G.; DASSO, C. M.; DA PORTA, A. W.; 1991, Modelo matemático hidrológico para extensión de series de caudales, Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídrica, Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida asociado al CONICET, Villa Carlos Paz, mayo de 1991
3. CHOW, MAIDMENT, MAYS, Hidrología aplicada, Editorial Mc Graw Hill, Colombia, 1994
4. TUCCI, C. E. M., Modelos hidrológicos. Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Editora da Universidade, Porto Alegre, 1998.
5. TUCCI, C. E. M, Hidrología, Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Editora da Universidade, Porto Alegre, 1997
6. SAN MIGUEL, S.; ALVEZ, C.; ZAMANILLO, E.; Informe de avance del proyecto PID UNER 2098; Facultad de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias de la Administración, Facultad de Ciencias de la Alimentación; UNER; Diciembre de 2004.
7. DÍAZ, EDUARDO et al; Primer informe de avance proyecto PID UNER 2098, "Evaluación agrohidrológica de represas de almacenamiento con destino a riego en Entre Ríos", Facultad de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias de la Administración, Facultad de Ciencias de la Alimentación, UNER; Marzo de 2005.