

# **MODELOS DE PREDICCIÓN DE CAUDALES PARA EL SECTOR ELÉCTRICO COLOMBIANO. PARTE II: MODELOS DIARIOS.**

**Oscar J. Mesa, Ricardo A. Smith, José E. Salazar,  
Luis F. Carvajal y Juan D. Velásquez**  
**Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos**  
**Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia**

## **1. PROCEDIMIENTO DE PREDICCIÓN EXTENDIDA DE CAUDALES (ESP)**

El modelo de predicción extendida ESP (Extended Streamflow Prediction), utiliza las realizaciones de la serie de precipitaciones en el mismo período de interés (comprendidas entre las mismas fechas), ocurridas durante los años anteriores del registro histórico. Cada una de las trazas se pondera de acuerdo a la similitud que presenta el régimen de caudales de la época de la traza y la traza de caudales actual. La evaluación de esta similitud se hace considerando la realización de una variable macroclimática relacionada con el régimen de caudales. Es decir que se da más importancia a las trazas ocurridas en condiciones climáticas más parecidas a las que están ocurriendo (UN-ISA, 1995).

El método de ponderación utilizado se basa en lo siguiente:

- Se realiza una regresión entre los caudales mensuales estandarizados y la serie

estandarizada de la variable macroclimática que posea la máxima correlación con ellos. De esta manera se obtiene una ecuación que relaciona los caudales con la variable climática y por consiguiente es posible obtener el valor esperado del caudal dada la ocurrencia de un valor de la variable macroclimática. Además la correlación entre la serie de caudales y la serie macroclimática hace que la distribución condicionada tenga una varianza menor a la de la distribución no condicionada. Se supondrá que esta distribución es normal, por lo tanto al tener la media y la desviación estándar, la función de probabilidad queda definida.

- Con esta función de probabilidad se ponderan las series históricas de precipitación, calculando la ponderación proporcionalmente al valor de la función de densidad de probabilidad del caudal mensual que se presentó en cada traza histórica. Es decir que para cada valor mensual de caudal del período de la traza, se evalúa la densidad de probabilidad (dada por una distribución normal) y con ella se pondera. A consecuencia de esto, la traza

en la que se presentó un caudal igual al predicho por la ecuación de regresión, tendrá el mayor peso. Lo cual da mayor importancia a las trazas que ocurrieron en condiciones similares a las actuales.

Las ecuaciones de regresión obtenidas son:

#### JAGUAS:

$$Q_{t+1} = 0.0529 - 0.561 \text{ NI4-SST}_{t-2}, \\ R = -0.518 \quad (1)$$

#### CHIVOR:

$$Q_{t+1} = 0.0368 - 0.2247 \text{ NI4-SST}_{t-6}, \\ R = -0.202 \quad (2)$$

#### SALVAJINA:

$$Q_{t+1} = 0.0110 - 0.4471 \text{ NI4-SST}_t, \\ R = -0.46 \quad (3)$$

Con las anteriores ecuaciones se determina el valor esperado del caudal en el mes siguiente (tiempo  $t+1$ ) y la nueva varianza luego de tener en cuenta la correlación. Con estos valores se tiene la distribución normal con la que se realiza la ponderación.

Observése que para el embalse de Chivor, debido a la poca correlación de la regresión, la distribución de probabilidad tiene varianza sólo ligeramente menor a la de la variable no condicionada, por lo cual la ponderación de las distintas trazas da menor importancia a las trazas cercanas al pronóstico de lo que lo haría si la correlación fuera alta.

Con las distintas trazas de precipitación se alimentan los modelos de Sacramento y regresión lineal, para la generación de caudales. Cada una de las trazas de caudales resultantes se pondera con el valor correspondiente y se obtiene la traza de caudal promedio predicha. Se presenta ahora una

descripción de los modelos lluvia-escorrentía utilizados a nivel diario.

## 2. MODELOS LLUVIA-ESCORRENTIA

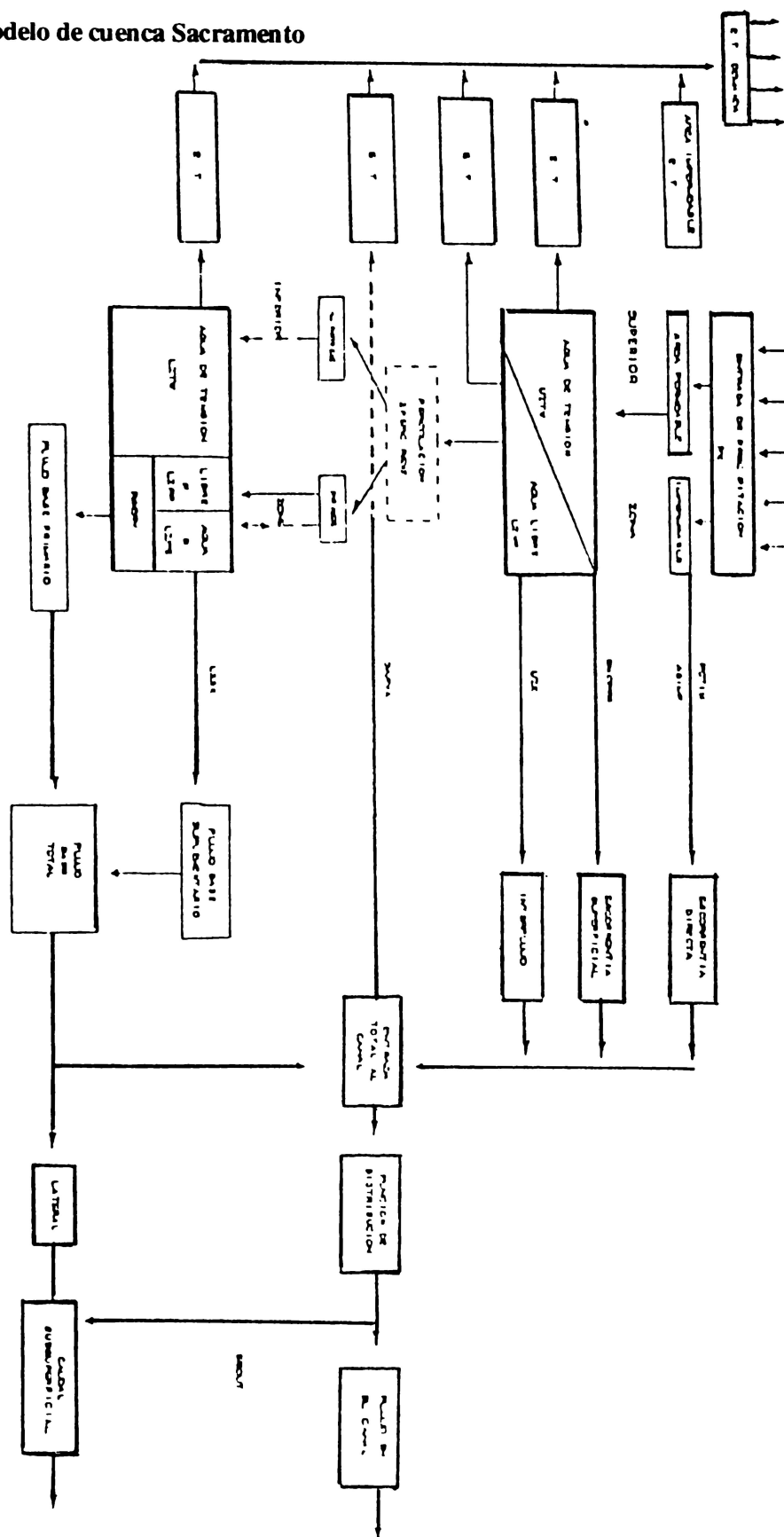
### 2.1 Modelo de Humedad del Suelo de Sacramento

Se presenta a continuación una breve descripción de las características fundamentales del Modelo de Sacramento. Una descripción general del modelo se presenta en la figura 1. El lector interesado en tener más detalles sobre este modelo puede referirse al informe final del proyecto realizado para ISA (UN-ISA, 1995).

En el modelo se definen dos zonas: una superior y una inferior. La zona superior representa la frontera superior del suelo y la intercepción del almacenamiento mientras que la zona inferior representa la masa de humedad del suelo y el almacenamiento de agua.

Cada una de las zonas actúa como un almacenamiento de humedad en dos formas: agua capilar y agua libre. Agua capilar es aquella que está encerrada por las partículas del suelo en contraste con el agua que está libre de moverse. Para cualquier zona, la máxima cantidad de agua capilar y agua libre que puede ser almacenada, está definida como un parámetro del suelo. La cantidad de agua que se encuentra almacenada en cualquier momento es una variable del modelo. El mecanismo básico de almacenamiento es que la humedad entrante en una zona se almacena como agua capilar hasta que la capacidad máxima de almacenamiento se alcanza y el excedente se pasa al depósito de agua libre. En la zona inferior, sin embargo, una porción del agua entrante pue-

Figura 1: Modelo de cuenca Sacramento



de pasar al almacenamiento como agua libre, antes de que la máxima capacidad de agua capilar se alcance. Una vez se ha alcanzado la máxima capacidad de agua capilar, la humedad adicional es almacenada como agua libre. La salida del agua libre ocurre verticalmente como percolación, horizontalmente como entrada de flujo al canal y otras salidas de agua o como evapotranspiración. El agua capilar sale únicamente como evapotranspiración.

Además del mecanismo de almacenamiento de humedad descrito el modelo tiene otros componentes que se describen a continuación.

#### 2.1.1 *Flujo del Canal proveniente de aguas subterráneas*

En este modelo, se definen dos almacenamientos de agua libre en la zona inferior: el primario que tiene un drenaje lento y una larga duración, y el suplementario que tiene un drenaje rápido. El flujo de salida de cada uno de ellos, en cada período computacional de tiempo, es el producto de los contenidos y un parámetro constante de liberación. Los parámetros relacionados con los almacenamientos primario y suplementario no son iguales. Mientras las funciones de vaciado son simples, el flujo total de salida de aguas subterráneas es gobernado por estas funciones en combinación con algunos mecanismos, los cuales reparten el flujo de entrada a la zona inferior entre los dos almacenamientos de agua y balancean los almacenamientos de agua libre y capilar. El modelo incluye entonces el concepto de dos almacenamientos de aguas subterráneas separados, lo cual tiene algunas bases físicas y se ha identificado en registros de flujos observados.

#### 2.1.2 *Percolación*

El flujo de agua de la zona superior a la zona inferior se expresa por una fórmula considerada como el corazón del modelo. En esta fórmula, la velocidad de percolación se define como la máxima velocidad de flujo continuo de la zona inferior. Esta es numéricamente igual al flujo de salida de la zona inferior bajo condiciones saturadas.

Bajo condiciones de una humedad disponible ilimitada en la zona superior, la velocidad de percolación actual varía entre "PBASE" cuando la zona inferior esta llena, y un máximo valor el cual podría ocurrir si la zona inferior está seca. La máxima velocidad está definida por un parámetro de percolación, "ZPERC", tal que ella es igual al producto de "PBASE" y "1+ZPERC".

La variación de la velocidad de percolación entre los valores máximo y mínimo así definidos, ocurre como una función de la relación de deficiencia de la zona inferior. Esta relación "DEFR" es simplemente la diferencia entre el contenido de la zona inferior y la capacidad, dividida por la capacidad. Esta relación puede variar de cero (zona inferior llena), a la unidad (zona inferior seca). En los cálculos, tanto el agua capilar como la libre son consideradas. Para poder permitir el efecto de variación de la relación, que es no lineal y se encuentra acotado entre límites, un parámetro "REXP", el cual depende del tipo de suelo, se aplica a la relación como un exponente. Así, la velocidad actual de percolación sobre condiciones de humedad disponible ilimitada en la zona superior esta dada por:

$$RATE = PBASE (1 + ZPERC * DEFR^{REXP}) \quad (4)$$



en donde RATE es la velocidad de percolación definida arriba, y DEFR es la relación de deficiencia en la zona inferior.

La verdadera velocidad de percolación es igual al producto de "RATE" y la "fuerza conductora de la zona superior", la cual es la relación del contenido de agua libre en la zona superior a la capacidad de agua libre en la zona superior. De este modo, la percolación será cero si la zona superior de agua libre está seca e igual a "RATE" si la zona superior está llena.

El agua que sale como percolación se reparte en los almacenamientos de agua libre y agua capilar mediante el parámetro PFREE que indica el porcentaje de agua que entra directamente a los almacenamientos de agua libre de la zona inferior. La cantidad de agua libre que debe ser almacenada en cada uno de los almacenamientos primario y secundario se obtiene como una función de sus capacidades totales y de sus volúmenes vacíos. Para mantener el equilibrio se tiene como regla que la cantidad de agua almacenada en la zona primaria es siempre menor o igual a la almacenada en la zona secundaria.

La fórmula involucra ocho parámetros del modelo. Dos de ellos, ZPERC y REXP, aparecen únicamente en esta fórmula. Los restantes seis son también utilizados en otras partes del modelo. Cuatro variables en el modelo, relacionadas con los almacenamientos en ambas zonas, también se consideran. La fórmula interactúa con otros componentes del modelo controlando el movimiento del agua en todas las partes del perfil del suelo, tanto arriba como abajo de la interface de percolación.

### 2.1.3 *Area Impermeable Variable*

Una porción del agua que entra en la cuenca se deposita en áreas impermeables directamente conectadas o adyacentes al sistema de canales y así de este modo, pasan a ser parte del flujo del canal. Esta porción se define por dos parámetros que representan sus valores máximo y mínimo. El área real que se usa en los cálculos varía entre estos límites de acuerdo con la cantidad de agua en el almacenamiento.

### 2.1.4 *Componentes del Flujo*

El modelo reconoce y genera las siguientes componentes del flujo :

1. Escorrentía directa, resultante de la humedad entrante al área impermeable variable.
2. Escorrentía superficial. Cuando la humedad entrante a la zona superior es mayor que la que puede absorber. Este exceso es la Escorrentía superficial.
3. Interflujo, o drenaje lateral del almacenamiento de agua libre en la zona superior.
4. Flujo base suplementario, drenaje lateral del almacenamiento secundario de agua libre en la zona inferior.
5. Flujo base primario, o drenaje lateral del almacenamiento de reserva de agua libre de la zona inferior.

### **2.1.5 Evapotranspiración**

La velocidad de evapotranspiración se estima usando estaciones meteorológicas, y las pérdidas provocadas por ella en los distintos almacenamientos y en el canal son evaluadas en función de las cantidades de agua disponible. El modelo asume que la evapotranspiración ocurre de arriba hacia abajo, contribuyendo las capas superiores con un mayor porcentaje, deteniéndose el proceso cuando se alcanza la cantidad diaria de humedad perdida.

### **2.1.6 Hidrógrafa Unitaria**

El modelo original de Sacramento aplica la hidrógrafa unitaria a los tres componentes superiores del flujo. Las dos componentes de la zona inferior son sumadas al flujo del canal en el período de tiempo en el cual ellas son liberadas de la zona inferior. En la versión NWSRFS, la hidrógrafa unitaria se aplica a todas las cinco componentes.

### **2.1.7 Ciclo del agua en el modelo**

Al inicio del ciclo, se evalúan las pérdidas de humedad en los distintos almacenamientos debidas a la evapotranspiración de acuerdo con metodologías muy conocidas y en una cantidad tal que se cubra la demanda diaria. La precipitación entrante se reparte entre las áreas permeable e impermeable; el porcentaje de precipitación captada por estas áreas impermeables corresponde a la Escorrentía directa, y el captado por áreas permeables es el que pasa a los almacenamientos de la zona superior; cuando hay un exceso de humedad entrante de tal forma que se supera la capacidad de la zona superior, se produce una Escorrentía superficial.

El flujo lateral del almacenamiento superior de agua libre contribuye al flujo del canal como interflujo. Así mismo de la precipitación entrante debe descontarse aquella que cae directamente sobre la red de drenaje.

El agua drenada verticalmente como percolación se reparte como ya se dijo, entre los distintos almacenamientos de la zona inferior de acuerdo con los mecanismos ya descritos. El drenaje lateral de la zona inferior de almacenamiento primario de agua libre corresponde al flujo base primario, mientras que el drenaje lateral de la zona inferior de almacenamiento secundario corresponde al flujo base suplementario. Estos drenajes laterales se asumen como porcentajes constantes de los volúmenes diarios almacenados.

En la tabla 1 se muestran los parámetros del modelo. Como se puede ver, éste es un modelo de 17 parámetros que deben ser estimados por procedimientos de calibración, comparando los caudales simulados con los observados. El modelo implementado tiene una opción de calibración automática que define los parámetros del modelo minimizando las diferencias entre los caudales observados y calculados. Sin embargo, debido al complejo problema de optimización por el gran número de parámetros este proceso de calibración automática se puede quedar en un óptimo local y se debe usar sólo como valor inicial.

Una vez calibrado el modelo está listo para ser usado en el procedimiento de predicción diaria como modelo de lluvia-esco-rrentía.

El modelo de Sacramento se calibró para las tres cuencas objeto de este estudio. Para ello inicialmente se calculó el valor de evapotranspiración mensual en la cuenca mediante el siguiente procedimiento:

**Tabla 1.**  
**Parámetros para el modelo Sacramento**

<b>Escorrentía directa</b>	
<b>PCTIM:</b>	Porcentaje de área impermeable cercana al canal.
<b>ADIMP:</b>	Porcentaje de la cuenca que se vuelve impermeable cuando se llena el requerimiento de agua de tensión
<b>SARVA:</b>	Porcentaje de la cuenca cubierto por canales, lagos y vegetación riparia
<b>Humedad de la zona superior del suelo</b>	
<b>UZTWM:</b>	Máxima capacidad de agua de tensión en la zona superior.
<b>UZFWM:</b>	Máxima capacidad de agua libre en la zona superior (mm.)
<b>UZK:</b>	Tasa de drenaje lateral del agua libre de la zona superior expresada como un porcentaje por día.
<b>Percolación</b>	
<b>ZPERC:</b>	Factor que define el incremento proporcional en la percolación.
<b>REXP:</b>	Exponente que determina la tasa de cambio de la tasa de percolación
<b>Zona inferior</b>	
<b>LZTWM:</b>	Máxima capacidad de agua de tensión en la zona inferior.
<b>LZFSM:</b>	Máxima capacidad de almacenamiento de agua libre en la zona inferior suplementaria
<b>LZSK:</b>	Tasa lateral de drenaje de la zona
<b>LZFPM:</b>	Máxima capacidad de almacenamiento de agua libre de la zona inferior primaria.
<b>LZPK:</b>	Tasa de drenaje lateral de de agua libre de la zona inferior primaria.
<b>PFREE:</b>	Porcentaje de agua de percolación que entra directamente al agua libre de la zona baja.
<b>RSERV:</b>	Porcentaje de agua libre de la zona inferior no disponible para transpiración.
<b>SIDE:</b>	Relación entre el flujo base observado y el no observado.
<b>SSOUT:</b>	Tasa fija de descarga del canal.

- Haciendo el balance de agua en la cuenca (considerando como entrada la precipitación y como salida el caudal en el punto de aforo) se calculó el valor promedio de evapotranspiración anual utilizando los datos históricos mensuales disponibles.
- Con base en los valores mensuales de evaporación registrados en una estación de la zona se distribuye mensualmente el valor anual calculado en el paso anterior.

Los resultados de este proceso para cada cuenca se muestran en las tabla 2.

Los parámetros del modelo producto de esas calibraciones se presentan en las tablas 3, 4 y 5 para cada cuenca. En las figuras 2, 3 y 4 se muestra el ajuste entre los caudales simulados con los parámetros de calibración y los datos históricos de caudales observados. Como se puede ver en las figuras, la calibración del modelo en las tres cuencas es bastante aceptable.

**Tabla 2.**  
**Valores de evapotranspiración en la cuencas de Jaguas, Chivor y Salvajina (mm/día).**

Mes	Jaguas	Chivor	Salvajina
enero	6.50	0.98	2.50
febrero	6.80	1.00	2.30
marzo	6.50	1.19	2.70
abril	7.50	1.09	2.50
mayo	7.50	1.07	2.50
junio	7.00	1.07	2.70
julio	6.40	1.06	2.90
agosto	6.60	1.06	3.00
septiembre	8.00	0.93	2.70
octubre	6.60	0.90	2.50
noviembre	6.40	0.95	2.20
diciembre	6.10	0.95	2.20

**Tabla 3.**  
**Parámetros calibrados para la cuenca Jaguas**

UZTWM=	30	LZFPM=	500
UZFWM=	80	LZPK=	0.02
UZK	0.5	LZFSM=	500
PCTIM	0.4	LZSK	0.045
		LZTWM	10
SARVA	0.01	PFREE	0.3
AREA	432		
SIDE	0	ZPERC=	20
ADIMP	0.01		REXP=1.5
RSERV	0.3		

**Tabla 4.**  
**Parámetros calibrados para la cuenca de Chivor**

UZTWM=	35	LZFPM=	450
UZFWM=	75	LZPK=	0.02
UZK	0.5	LZFSM=	500
PCTIM	0.4	LZSK	0.045
		LZTWM	10
SARVA	0.01	PFREE	0.35
AREA	2432		
SIDE	0	ZPERC=	19
ADIMP	0.01		REXP=1.5
RSERV	0.3		

**Tabla 5:**  
**Parámetros calibrados para la cuenca de Salvajina**

UZW=	19.89	LZFW=	93.64
UZFWM=	33.41	LZPK=	0.0022
UZK	0.340	LZFSM=	394.26
PCTIM	0.0017	LZSK	0.0273
		LZTWM	207.10
SARVA	0.01	PFREE	0.7711
AREA	3652		
SIDE	0	ZPERC=	9.35
ADIMP	0.01		REXP= 0.227
RSERV	0.3		

## 2.2. Modelo de Regresión Lineal para la Predicción de Caudales Diarios

Los modelos lineales son la forma más simple de relacionar distintas variables. En este trabajo se exploró el uso de un modelo de regresión lineal para la predicción de caudales diarios. Este modelo utiliza la información de caudales y precipitación promedia en la cuenca de los días anteriores para el pronóstico del caudal en un día cualquiera.

La relación entre el caudal diario que se presenta en una cuenca y la lluvia y caudales de los días anteriores no es lineal. Sin embargo, estos modelos permiten tener una respuesta aproximada del comportamiento de la cuenca.

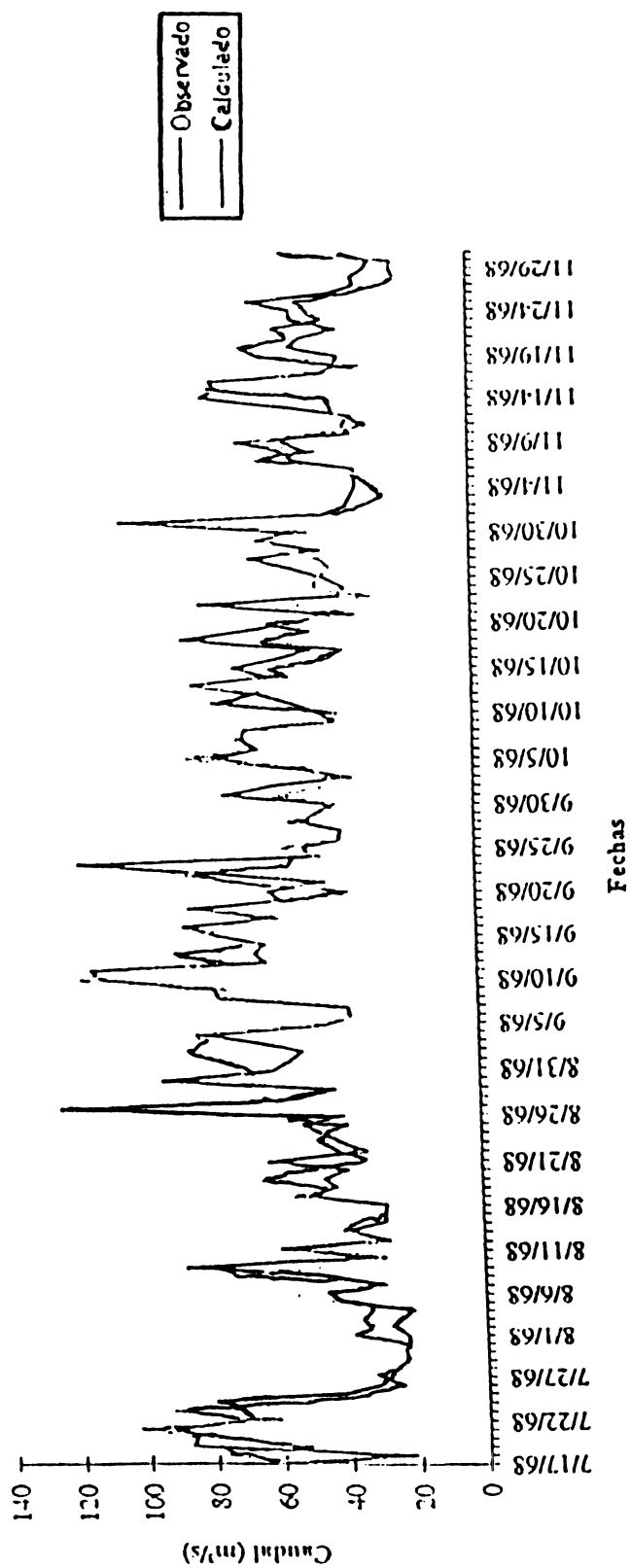
En este estudio (UN-ISA, 1995) se evaluaron diferentes alternativas para la escogencia final de las ecuaciones de regresión. En un principio se integró el grupo de variables independientes con las lluvias y los caudales ocurridos en los tres días anteriores al de pronóstico, mediante procedimientos estadísticos estándares se seleccionaron las variables que tienen más importancia para el modelo lineal. En general se obtuvo que con la inclusión de los caudales y las lluvias del

día anterior se consigue una predicción similar a la obtenida incluyendo los datos con mayor rezago. Este resultado tiene explicación en que todas las cuencas estudiadas tienen área relativamente pequeña y son de pendiente fuerte, por lo cual la respuesta de flujo superficial a un evento de lluvia es bastante rápida.

Con el ánimo de permitir la comparación entre distintas ecuaciones de regresión se incluyeron varias de ellas para cada una de las cuencas.

Si bien el enfoque principal fue la determinación de una ecuación que relacionara los caudales de un día dado con la información de los días anteriores, es decir una ecuación de la forma  $Q_{t+1} = f(Q_t, P_t, Q_{t-1}, P_{t-1}, \dots)$  también se calculó la ecuación que relaciona el caudal con la información de lluvias de ese día y los anteriores, es decir un modelo de la forma  $Q_{t+1} = f(P_{t+1}, Q_t, P_t, Q_{t-1}, P_{t-1}, \dots)$  con el fin de comparar las ecuaciones y observar el cambio en la correlación, es decir, analizar el aporte adicional de información brindada por esta variable. Cabe anotar que en caso de que se cuente con la predicción de lluvia se puede hacer uso de una ecuación de este tipo.

Figura 2. Simulación de caudal con los parámetros calibrados, Cuenca Jaguas



**Figura 3. Simulación de caudal con los parámetros calibrados, Cuenca Chivor**

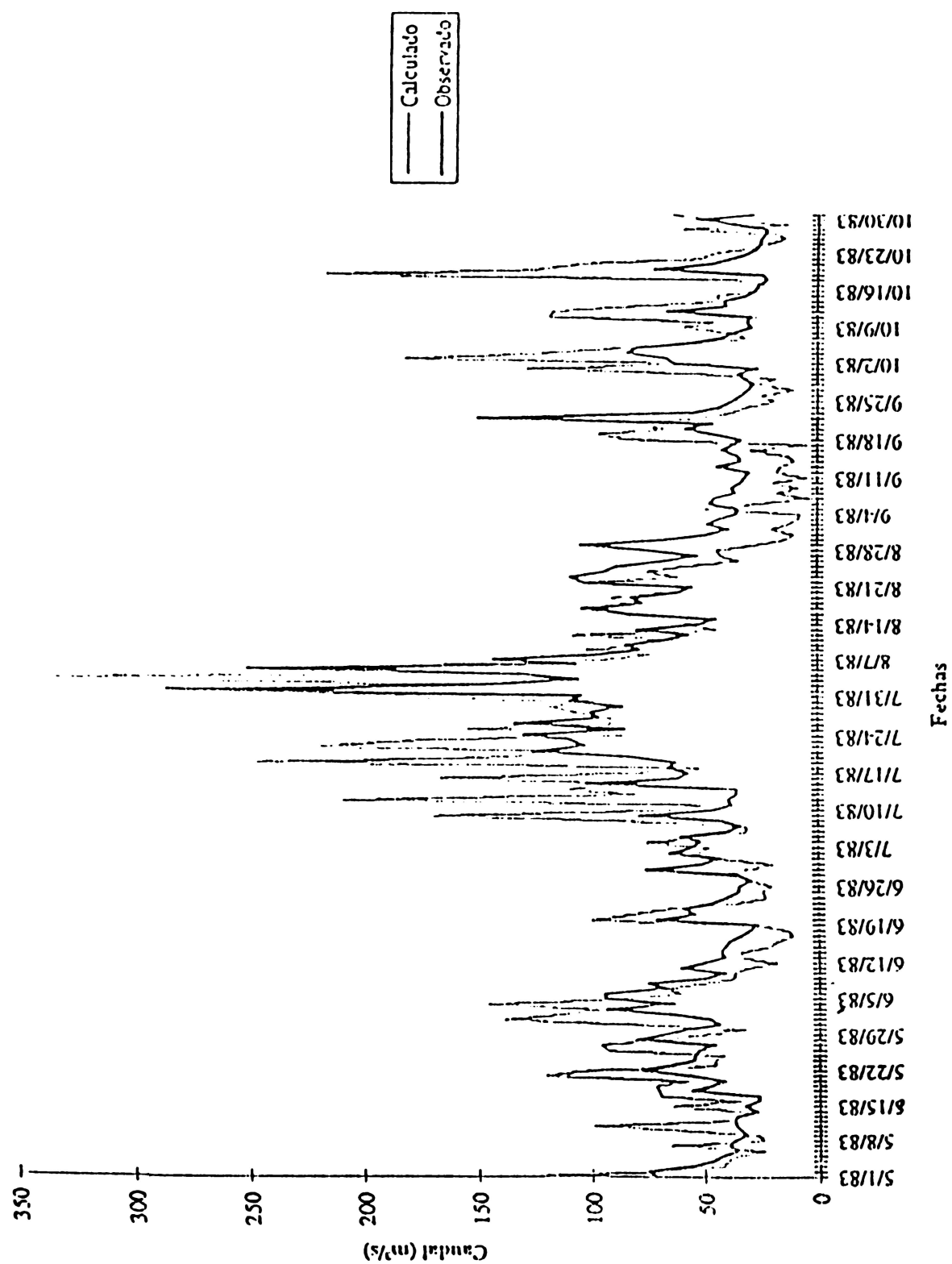
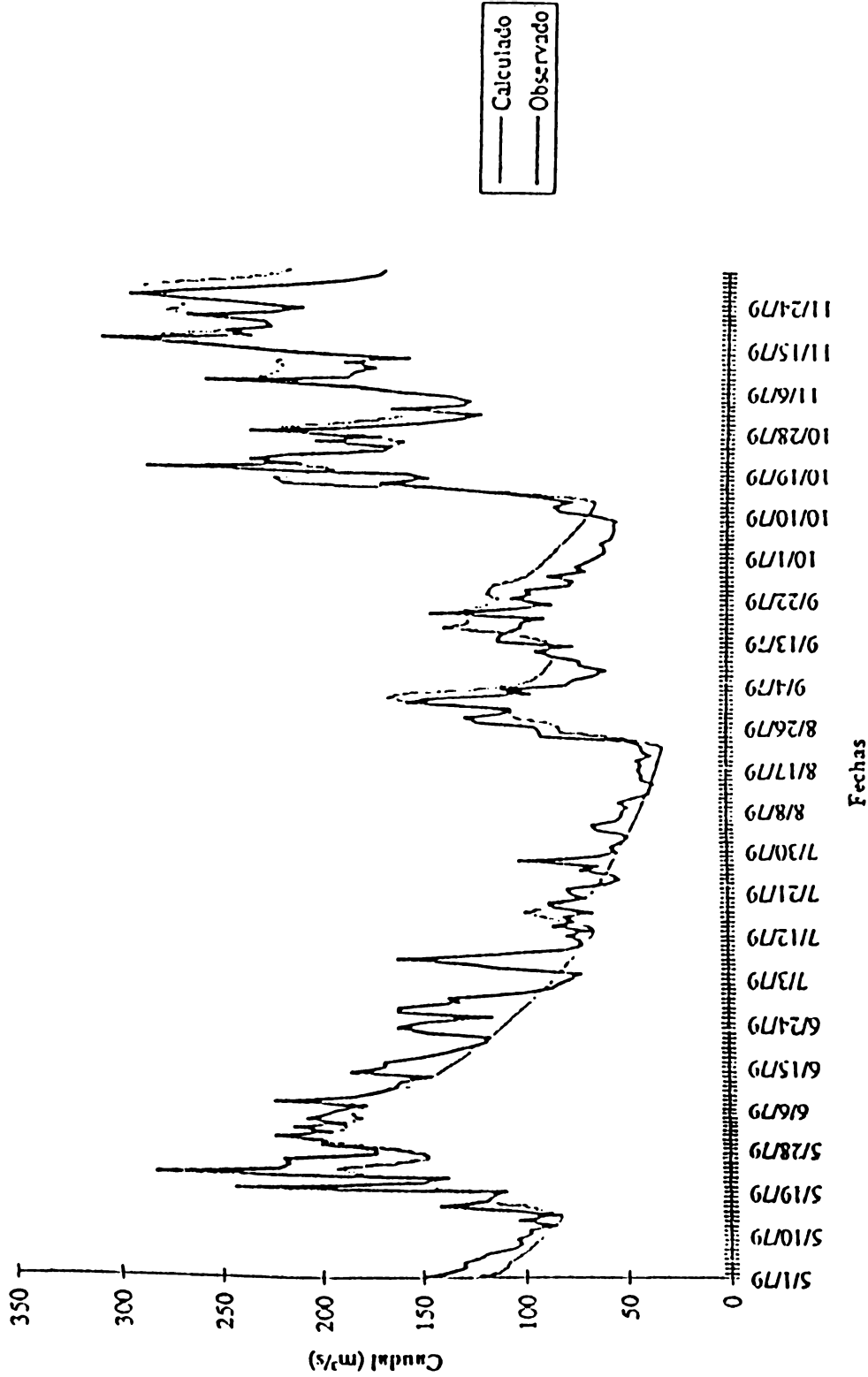


Figura 4. Simulación de caudal con los parámetros calibrados, Cuenca Salvajina





Algunas de las ecuaciones de regresión obtenidas se presentan a continuación para cada cuenca. En cada caso se señala la ecuación que fue incluida en el programa de computador para la predicción.

#### EMBALSE DE JAGUAS:

Para la regresión se utilizaron los datos de caudal diario y de precipitación diaria promedio entre las fechas 1/I/1968 y 31/XII/1975.

##### Ecuación 1

$$Q_{t+1} = 8.293 + 0.215 Q_t + 0.237 Q_{t-1} + 0.609 P_{t+1} + 0.802 P_t, \\ R = 0.807 \quad (5)$$

en donde  $Q_{t+1}$  es el caudal en m<sup>3</sup>/s del día t+1,  $P_{t+1}$  es la precipitación en mm/día del día t+1 y  $t$  es el indicador del día (1,2,...n).

##### Ecuación 2

$$Q_{t+1} = 11.282 + 0.234 Q_t + 0.259 Q_{t-1} + 0.982 P_t, \\ R = 0.763 \quad (6)$$

##### Ecuación 3

$$Q_{t+1} = 15.098 + 0.4545 Q_t + 0.9363 P_t - 0.147 P_{t-1} \\ R = .739 \quad (7)$$

Ecuación 4 (incluida en el programa de predicción)

$$Q_{t+1} = 15.409 + 0.4107 Q_t + 0.9333 P_t \\ R = 0.737 \quad (8)$$

Se escogió incluir esta ecuación en el modelo de predicción debido a que no requiere valores de la precipitación del período t+1, que son imposibles de usar en predicción a menos que también se tenga predicciones de esa variable y porque la inclusión de varia-

bles adicionales como  $Q_{t-1}$  y  $P_{t-1}$  no incrementaban significativamente el valor de la correlación total.

#### EMBALSE DE CHIVOR:

Para la regresión se utilizaron los datos de caudal diario y precipitación promedio diaria en la cuenca del período comprendido entre 18/IV/1971 a 30/IV/1991. Con los siguientes resultados.

##### Ecuación 1

$$Q_{t+1} = -1.178 + 0.4647 Q_t + 0.2389 Q_{t-1} + 0.6645 P_{t+1} + 3.6014 P_t, \\ R = 0.889 \quad (9)$$

##### Ecuación 2

$$Q_{t+1} = 2.3515 + 0.7428 Q_t + 4.0290 P_t - 1.363 P_{t-1} \\ R = 0.886 \quad (10)$$

Ecuación 3 (incluida en el programa de predicción)

$$Q_{t+1} = 1.783 + 0.6694 Q_t + 3.8038 P_t \\ R = 0.976 \quad (11)$$

Se escogió incluir esta ecuación en el modelo debido a que la inclusión de variables adicionales como  $Q_{t-1}$  y  $P_{t-1}$  no incrementaba significativamente el valor del coeficiente de correlación.

#### EMBALSE DE SALVAJINA:

Para la regresión se utilizaron los datos diarios de caudal y de lluvia promedio sobre la cuenca en el período comprendido entre el 1/VI/1979 y el 1/XI/1993.

#### Ecuación 1

$$Q_{t+1} = 5,3388 + 0,7391 Q_t + 0,111 Q_{t-1} + 0,2851 P_{t+1} + 2,658 P_t, \\ R=0.946 \quad (12)$$

#### Ecuación 2

$$Q_{t+1} = 7,026 + 0,8463 Q_t + 2,687 P_t \\ R = 0.945 \quad (13)$$

Con fines comparativos, se realizó la regresión excluyendo de la ecuación la precipitación, con lo cual se obtuvo:

Ecuación 3 (incluida en el programa de predicción)

$$Q_{t+1} = 10,336 + 0,9206 Q_t \\ R = 0.921 \quad (14)$$

Se observa que al incluir la precipitación se obtiene un ligero aumento en el coeficiente de correlación. Si bien este aumento no es muy grande, se seleccionó la ecuación 2 para el modelo. En este caso la inclusión de variables adicionales como  $Q_{t-1}$  y  $P_{t-1}$  no tienen prácticamente ningún efecto en el coeficiente de correlación.

La comparación de las distintas ecuaciones permite concluir que el aporte adicional de información que brindan los datos de lluvia y caudal con rezago mayor a un día es poco significativa. Por esto y además por ser el modelo más sencillo, en todos los casos se eligió la ecuación que incluye sólo la lluvia y caudal del día anterior.

También es interesante resaltar que el dato de lluvia en el tiempo  $t+1$  no significa una mejora sustancial en la capacidad de predicción del modelo.

En las cuencas estudiadas es suficiente con la información del caudal y la lluvia del día

anterior para la realización del pronóstico. El rezago de los términos que se incluyen en la ecuación está estrechamente relacionado con el tiempo que tarda el agua en llegar al punto de aforo; es decir con aspectos como el área de la cuenca, la pendiente, etc.

Los valores de correlación obtenidos en las cuencas son relativamente altos. Este modelo reproduce en forma relativamente adecuada los caudales medios, sin embargo, tiene deficiencias en el pronóstico de caudales altos y de caudales bajos en épocas secas.

El modelo utiliza la información de lluvias, por lo cual sus resultados son mejores que los de un modelo simplemente autorregresivo o que sólo utilice la información de caudales. Esto es consecuencia de que la serie de caudales diarios es fuertemente variable (lo que incentivó a que en este mismo trabajo se analizara como fractal) y la lluvia explica en gran parte esta variabilidad.

### 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se presentan ahora algunas conclusiones y recomendaciones sobre los modelos de predicción implementados.

- Los resultados de los modelos de regresión para la predicción diaria se pueden considerar como muy buenos en todos los casos. En estos modelos se relaciona el caudal en un período de tiempo con el caudal en el período de tiempo anterior y la lluvia en el período de tiempo anterior. Las correlaciones obtenidas son del orden de 0,8 a 0,9. Este modelo tan sencillo del proceso lluvia-escorrentía puede dar entonces resultados muy aceptables.

En el procedimiento de predicción extendida de caudales (ESP) para predicciones de caudales a nivel diario se asumió una estructura de ponderación basada en las relaciones de los caudales con la variable macroclimática más significativa. Con esa relación se define una función de probabilidades (normal) que sirve de base para la estructura de ponderación de las series históricas de precipitación. Podría valer la pena mirar otros esquemas de ponderación y ver cual es su efecto sobre la predicción. Con el esquema propuesto, y dado que las correlaciones entre caudales y variables macroclimáticas fueron poco significativas, la estructura de ponderación es muy distribuida, esperándose en el caso de Chivor de que sea muy similar a la condición de que todas las trazas de precipitación son igualmente probables.

- El modelo ESP es una metodología que hace uso de las series ocurridas en el pasado, tratando de incluir la similitud a las condiciones actuales mediante la función de ponderación.
- El modelo de lluvia-escorrentía a nivel diario de humedad del suelo de Sacramento tiene un proceso de optimización para definir los parámetros del modelo. Este proceso de optimización debe ser utilizado con precaución y sus resultados deben ser constantemente probados. Ocurre con frecuencia, que dado el gran número de parámetros y la complejidad de las relaciones involucradas en el modelo, que el procedimiento de optimiza-

ción escoge óptimos locales. Los resultados del proceso de optimización de este modelo debe entonces usarse como indicativos, como guías y no como resultados finales.

- Se recomienda siempre en las predicciones a cualquier nivel de tiempo usar varios procedimientos. Las relaciones que se pretenden modelar para realizar las predicciones son tan complejas, que el uso de varios modelos permitiría tener un conocimiento de lo que pueda estar sucediendo. El involucrar las variables macroclimáticas en las predicciones de más largo plazo (3 meses) tiene mucho sentido en la representación de la dependencia del clima de nuestro país con los fenómenos tipo ENSO. El uso de modelos lluvia-escorrentía en los procesos de predicción diaria reconoce el carácter corto placista de este tipo de predicciones, pero las amarra al comportamiento general del clima mediante una estructura de ponderación de las posibles realizaciones asociada con ese comportamiento.

#### 4. REFERENCIAS

UN-ISA, 1995. Metodología de pronóstico de caudales en los ríos con aprovechamiento actual o futuro del Sector Eléctrico Colombiano. Informe final presentado a ISA, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Marzo de 1995.

