



APLICACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA DEL RIO CAUTO EN CUBA

APLICACION DEL MODELO HBV A LA CUENCA DEL RIO CAUTO EN CUBA

Mercedes Rodríguez, SMHI
Barbro Johansson, SMHI
Göran Lindström, SMHI

Eduardo Planos, INRH
Alfredo Remón, INRH

CONTENIDO

	pág
RESUMEN/ SUMMARY	1
AGRADECIMIENTOS	2
1. INTRODUCCION	3
2. CARACTERISTICAS DEL MODELO HBV	4
3. DESCRIPCION DE LA CUENCA	10
3.1 Características de la cuenca	10
3.2 Clima	12
3.3 Escurrimiento superficial	15
3.4 Desarrollo hidráulico de la cuenca	15
3.5 Red de observaciones hidrometeorológicas	15
4. APLICACION DEL MODELO A LA CUENCA DEL RÍO CAUTO	16
4.1 Subdivisión de la cuenca	16
4.2 Base de datos	16
4.3 Influencia del riego	19
4.4 Calibración	20
4.4.a Calibración del modelo en la subcuenca Presa Protesta de Baragua	20
4.4.b Calibración del modelo en la subcuenca Presa Carlos Manuel de Cespedes	24
4.4.c Calibración del modelo en la subcuenca Cauto Cristo	25
4.5 Pronósticos	27
5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	30
BIBLIOGRAFÍA	32
APENDICE 1: Listado de parámetros	34
APENDICE 2: Curvas de duración de caudales calculados y registrados	39

RESUMEN

El trabajo que se expone en el presente reporte, forma parte de un proyecto de colaboración entre el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI) y el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba (INRH), con soporte financiero de la Agencia Sueca para la Cooperación Técnica y Económica (BITS); dicho proyecto contó, además, con la activa colaboración del Comité Estatal de Colaboración Económica de Cuba (CECE).

El objetivo fundamental del proyecto ha sido la aplicación del modelo HBV en la cuenca del río Cauto, con el propósito de

- pronósticar el volumen de agua que reciben los embalses ubicados en la cuenca y
- contribuir al uso racional del agua contenida en dichos embalses.

SUMMARY

The work described in this report, was done in collaboration between the Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) and the Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba (INRH), with financial support from the Swedish Agency for Technical and Economic Cooperation (BITS). The project also received active assistance from the Cuban State Committee for Economic Collaboration (CECE).

The main objective of the project was the application of the HBV model to the Cauto river basin in eastern Cuba, in order to

- forecast the inflow volume to the reservoirs located in the basin and
- contribute to the rational use of water in the reservoirs.

AGRADECIMIENTOS

Resulta obligado para los autores del presente informe expresar nuestro agradecimiento a las autoridades del SMHI, INRH y del CECE por las facilidades que dieron para la ejecución del trabajo. Del mismo modo deseamos manifestar nuestro reconocimiento a las autoridades del BITS por su decisiva contribución al proyecto.

Por otra parte, estamos en el deber de hacer un especial agradecimiento a los señores Arne Forsman (uno de los artífices del proyecto), Jörgen Nilsson, Sten Bergström y Magnus Persson por su activa colaboración durante el proceso de calibración del modelo. Es obligado también agradecer la inestimable ayuda brindada por la señora Gladis Villaverde, Agregada Económica de la Embajada de Cuba en Suecia, durante nuestra etapa de trabajo en el SMHI.

Finalmente, nos sentimos en el deber de mencionar a todas las personas que de una u otra forma contribuyeron con su trabajo en las diferentes etapas de este proyecto:

Torbjörn Jutman	Pedro Dorticós
Martin Häggström	Joaquín Gutiérrez
Bo Holst	Andrés Díaz
	Jesús Franco
	Eduardo Rodríguez
	Hector Solís
	Juan Pita
	Esequiel Morales

Norrköping, La Habana y Bayamo, Enero de 1991

Los autores:

Mercedes Rodríguez	Eduardo Planos
Barbro Johansson	Alfredo Remón
Göran Lindström	

1. INTRODUCCION

Durante los últimos años, el uso de los modelos matemáticos aplicados a las ciencias del agua se ha extendido ampliamente en el mundo, como un instrumento cotidiano en el trabajo de las instituciones encargadas de la gestión de los recursos hídricos.

En el campo de la modelación matemática, los modelos conceptuales de escorrentía ocupan, por su utilización desde la década del 60 y, consecuentemente, por el desarrollo alcanzado, un lugar de vanguardia en el universo de las ciencias aplicadas. Estos modelos son empleados en la actualidad para resolver, prácticamente, todos los problemas vinculados a las aguas interiores; cada año que pasa se incrementa la lista de soluciones que se alcanzan con el uso de estos modelos.

Las ventajas del uso de los modelos conceptuales sobre los métodos tradicionales empleados en la investigación hidrológica son incuestionables, toda vez que con dichos modelos se obtienen resultados basados en la simulación del proceso natural de formación del escurrimiento, de manera que las conclusiones del especialista se fundamentan en el análisis integral de los factores principales responsables del escurrimiento, desproveyendo el estudio hidrológico de la habitual rigidez de los métodos estadísticos convencionales.

2. CARACTERISTICAS DEL MODELO HBV

El modelo HBV, desarrollado en el Instituto Sueco de Meteorología e Hidrología (SMHI), es un modelo conceptual para el cálculo continuo de caudales, que se caracteriza por su sencillez conceptual y fácil manejo.

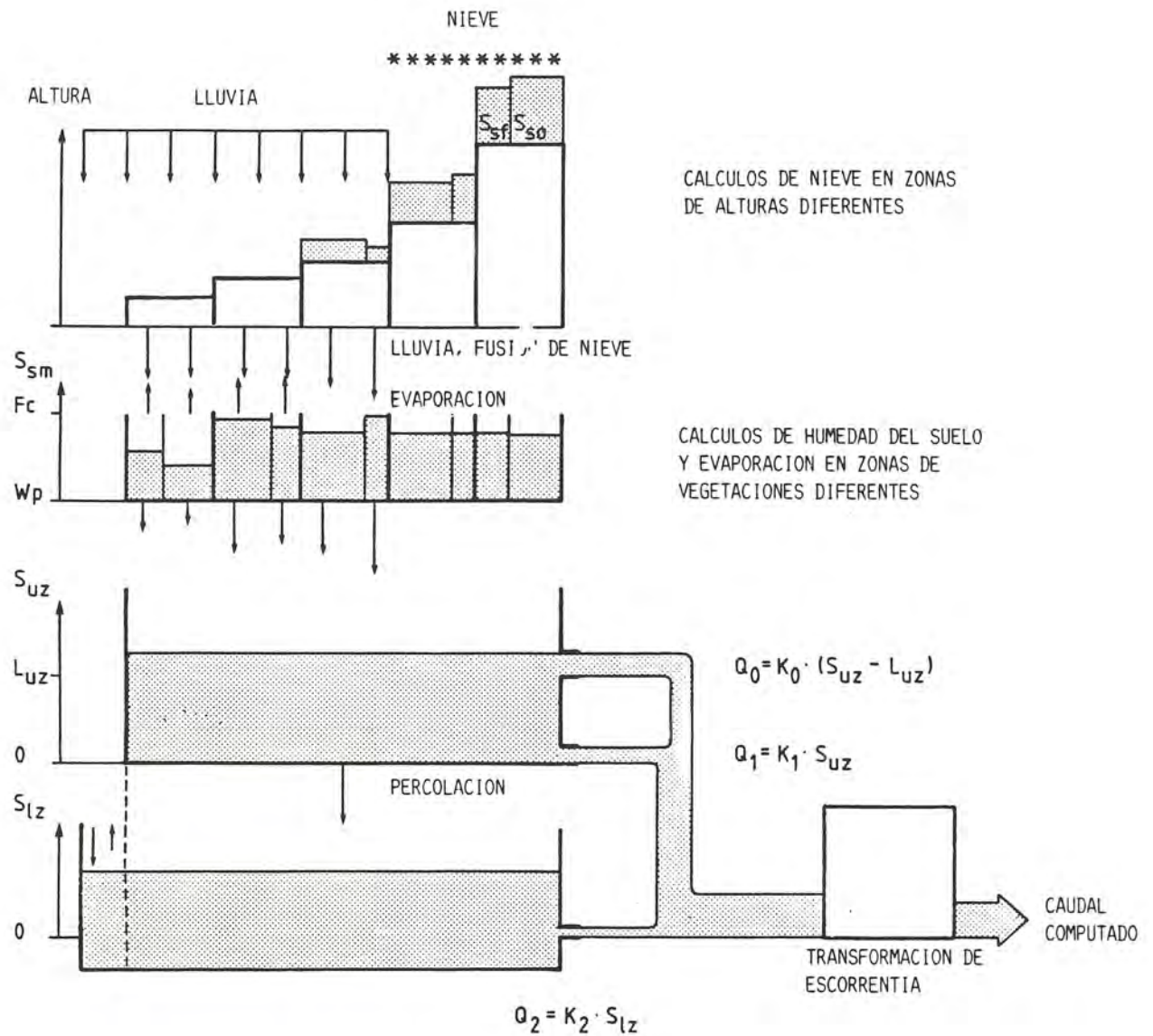
Durante el proceso de calibración se requieren datos diarios de caudal (incluidos en éstos el nivel y la entrega de los embalses), de lluvia y valores promedios mensuales de evaporación. Cuando se utiliza la subrutina de nieve, es necesario incorporar datos de temperatura del aire. Generalmente el modelo trabaja para intervalos de tiempo de 24 horas, aunque pudiera utilizarse para intervalos más cortos.

Este modelo se compone de una serie de subrutinas: a) acumulación y ablación de la nieve, b) evaluación de la humedad en el suelo, c) generación del escurrimiento y d) procedimientos de tránsito del caudal por el cauce.

Por sus características este es considerado un modelo del tipo distribuido, toda vez que resulta posible subdividir la cuenca principal en subcuencas de acuerdo a las características físico-geográficas de la misma. A su vez cada subcuenca puede ser dividida en zonas, sobre la base de la altitud y tipo de vegetación. La estructura del modelo para cada subcuenca se presenta en la Figura 1. Concorde con lo anterior, se puede obtener resultados independientes para cada subcuenca en que ha sido dividida la cuenca principal.

La subrutina de nieve se fundamenta en una aproximación de la temperatura diaria y trabaja separadamente para cada elevación y zona de vegetación. Para considerar la variación de la temperatura con la altitud se utiliza un gradiente de la temperatura. De esta forma la temperatura se corrige teniendo en cuenta el promedio ponderado de las altitudes de las estaciones de temperatura en la subcuenca y la altitud media de cada zona de elevación.

La variación de la precipitación con la altitud puede ser considerada aplicando un gradiente, de la misma forma que para la temperatura. Adicionalmente se cuenta con un parámetro de corrección de la precipitación, con el cual se puede ajustar la precipitación media diaria estimada para la cuenca.

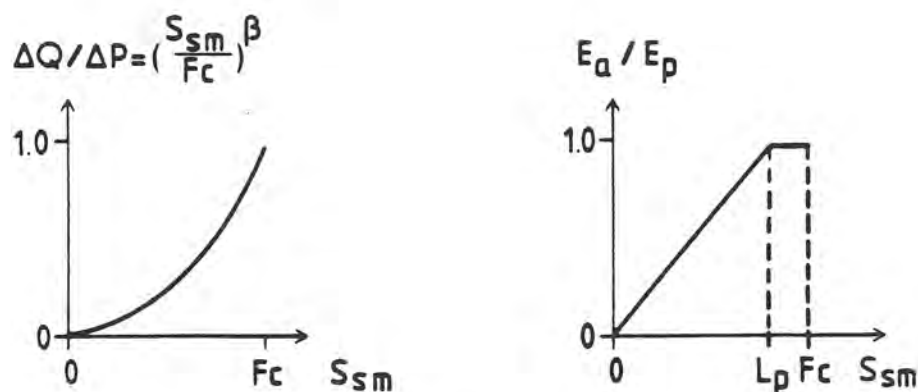


Símbolos

S_{sf} = almacenamiento de nieve en bosques
 S_{so} = almacenamiento de nieve en áreas sin bosques
 S_{sm} = almacenamiento de humedad del suelo
 F_c = capacidad de campo
 S_{uz} = almacenamiento en la zona superior
 L_{uz} = límite de la contribución Q_0 a la escorrentía
 S_{lz} = almacenamiento en la zona inferior
 Q_0, Q_1, Q_2 = contribuciones a la escorrentía
 K_0, K_1, K_2 = coeficientes de recesión

Figura 1. Estructura básica del modelo HBV.
 Figure 1. Basic structure of the HBV model.

La rutina para el cálculo de la humedad del suelo es la parte principal que controla la generación de la esorrentía. Esta opera independientemente en cada subcuena, zona de elevación y de vegetación. El funcionamiento de dicha rutina se basa en tres parámetros empíricos β , F_c y L_p , como se muestra en la Figura 2. β controla la contribución a la rutina respuesta de esorrentía (ΔQ) y el aumento del almacenamiento de la humedad del suelo ($1-\Delta Q$). Con el fin de evitar problemas de no linealidad, la rutina de humedad del suelo es alimentada con fusión de nieve y lluvia milímetro a milímetro. La rutina da como resultado una pequeña contribución a la esorrentía cuando el suelo está seco y un aporte apreciable cuando el humedecimiento del suelo es significativo. F_c es el máximo almacenamiento de humedad del suelo y L_p es el valor de humedad en el suelo por encima del cual la evapotranspiración alcanza su valor potencial.



símbolos	
ΔP	= contribución de la lluvia o nieve
ΔQ	= contribución a la función de respuesta
S_{sm}	= almacenamiento de humedad del suelo
F_c	= capacidad de campo
β	= coeficiente empírico
L_p	= límite de evapotranspiración potencial
E_p	= evapotranspiración potencial
E_a	= evapotranspiración real computada

Figura 2. Representación esquemática de la evaluación de la humedad del suelo en el modelo HBV.

Figure 2. Schematic presentation of the soil moisture accounting in the HBV model.

La rutina de respuesta de escorrentía transforma el agua en exceso de la rutina de humedad del suelo en escorrentía para cada subcuenca (Figura 3). También se incluye el efecto de la precipitación directa y evaporación en lagos y/o embalses en la subcuenca. La rutina consta de dos almacenamientos que distribuyen la escorrentía generada en el tiempo y puede ser usada para obtener las partes rápida y lenta de la curva de recesión normalmente encontradas en el análisis de hidrogramas.

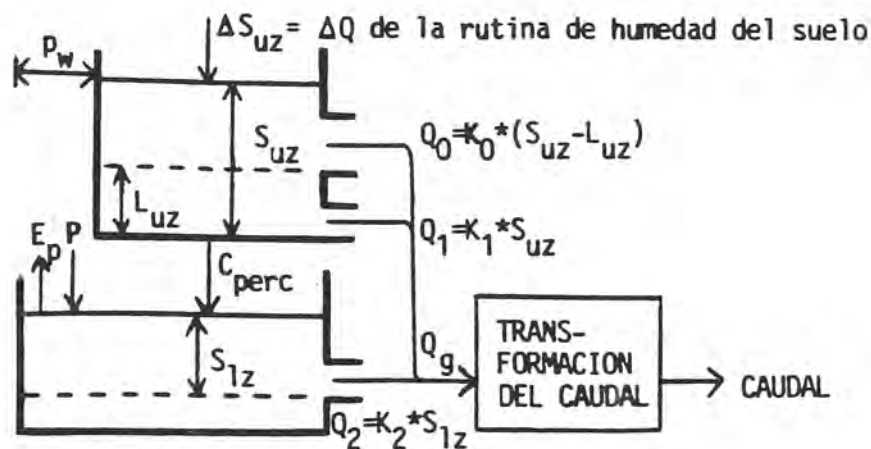


Figura 3. Rutina de respuesta de escorrentía en el modelo HBV.
Figure 3. The runoff response routine of the HBV model.

El almacenamiento inferior puede ser interpretado como la representación de la contribución del agua subterránea y el almacenamiento de lagos al flujo base. El drenaje es controlado por el coeficiente de recesión K_2 . Si la producción (ΔQ) de la rutina de humedad del suelo excede la capacidad de percolación (C_{perc}), el almacenamiento superior se empezará a llenar y será drenado con el coeficiente K_1 . Esto representa el drenaje del agua a lo largo de los canales superficiales. Cuando el almacenamiento excede L_{uz} , comienza el drenaje más rápido de acuerdo a K_0 .

La contribución total de los almacenamientos (Q_g) pasa a través de un filtro simple con una distribución de pesos triangular. Este filtro describe la distribución de los tiempos de concentración en las diferentes subcuencas hasta el punto de descarga.

El almacenamiento en un lago o reservorio, localizado a la salida de una subcuenca, es considerado mediante una rutina de regulación especial. La descarga es controlada por

la relación nivel-caudal que se estipule en las diferentes regulaciones aplicadas. Las variaciones en los límites de regulación durante el año y los vertimientos durante los cambios de estación pueden ser considerados. La descarga también puede ser calculada como una fracción del caudal de entrada que ha sido modificado por el almacenamiento en la cuenca.

La contribución a la escurrimiento de las diferentes subcuencas es adicionada en el mismo orden en que ellas contribuyen al flujo total del curso de agua. El retardo y amortiguamiento del flujo que tiene lugar a la salida de la siguiente subcuenca es considerado mediante la rutina de traslado de Muskingum o mediante un simple tiempo de retardo.

El modelo HBV es calibrado por un procedimiento de tanteo y error mediante el cual los parámetros son ajustados para mejorar la correspondencia entre el hidrograma simulado y el registrado. Usualmente son suficientes de 5 a 10 años de registros diarios de caudal. Para ajustar el modelo se utilizan tres criterios principales:

- 1) Inspección visual de los hidrogramas calculados y observados
- 2) Un gráfico continuo de la diferencia acumulada entre el hidrograma calculado y el observado.
- 3) La relación entre los caudales observado y modelado, según el criterio:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{comp}(t) - Q_{obs}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}}]^2}$$

donde:

Q_{comp} = caudal calculado (m^3/s)

Q_{obs} = caudal observado (m^3/s)

t = variable de tiempo (usualmente días)

n = número de intervalos

$\overline{Q_{obs}}$ = caudal observado medio

Además de estos criterios, la calibración puede ser verificada con las curvas de duración de caudales calculados y observados.

El modelo HBV es generalmente usado para el pronóstico del escurrimiento a corto y largo plazo. Antes de realizar un pronóstico el modelo debe ser corrido con los datos observados hasta el intervalo (día) anterior al que se desea pronosticar. Si existe alguna discrepancia entre el hidrograma calculado y el observado durante los días previos al período de pronóstico, deberá considerarse la posibilidad de actualizar el modelo. Esta actualización se efectúa ajustando los datos de entrada de unos pocos días o las condiciones del estado inicial. La actualización es un procedimiento iterativo manual, en la que generalmente se requiere de pocas corridas del modelo. En este sentido es adecuado señalar que la actualización debe ser muy cuidadosa para evitar introducir errores adicionales.

El pronóstico a corto plazo se utiliza en períodos de crecidas, con el propósito de conocer el comportamiento del escurrimiento máximo durante dicho período. Para esta aplicación el modelo ofrece la posibilidad de diseñar diferentes alternativas de lluvia y obtener el comportamiento del escurrimiento en cada una de ellas.

Los pronósticos a largo plazo se utilizan comúnmente para dos fines: a) predicción del caudal pico y b) predicción del volumen de escurrimiento que llega a un punto cualquiera del río. Este tipo de pronóstico requiere de datos de precipitación y temperatura (cuando se trabaja con la subrutina de nieve) de un período no menor de 10 años, aunque, en dependencia de la calidad de la información y de los propósitos del estudio que se realice, pudieran utilizarse períodos de tiempo más cortos. Con esta aplicación del modelo se puede obtener la probabilidad de excedencia de un valor cualquiera de escurrimiento y una interpretación estadística del resultado.

3. DESCRIPCION DE LA CUENCA

3.1 Características de la cuenca

La cuenca del río Cauto se encuentra ubicada en la región oriental de Cuba, entre los 20 y 21 grados de latitud Norte y los 75 y 77 grados de longitud Este (Figura 4). El Cauto, el mayor de los ríos de Cuba, abarca un área de unos 8970 km² que comprende a las provincias de Las Tunas, Holguín, Granma y Santiago de Cuba. En este territorio viven aproximadamente 880 mil personas, de las cuales el 38% constituyen poblaciones urbanas. La densidad de población alcanza 1.8 habitantes por km².

La actividad económica más extendida en la región es la agrícola; la caña de azúcar y el cultivo del arroz son los primeros renglones de producción; también muestran un elevado grado de desarrollo la producción industrial destinada a la gestión agrícola, el cultivo de pastos, plátano, cítrico, viandas y hortalizas y lógicamente la actividad hidráulica.

El relieve de la cuenca se caracteriza por un pronunciado contraste entre el macizo montañoso de la Sierra Maestra, donde alcanza alturas máximas del orden de 1800 msnm, y la Gran Llanura del Cauto, que es una amplia llanura aluvial que ocupa el 70% de área total de la cuenca; la altura media de la cuenca es 160 m.

La red fluvial del Cauto es la más extensa del país. El río principal recorre en dirección Este-Oeste 343 km desde su cabecera hasta desembocar en el Golfo de Guacanayabo. Su caudal depende, fundamentalmente, de las aguas drenadas de la parte septentrional de la Sierra Maestra y de algunas corrientes procedentes del Norte de la cuenca.

La vegetación original de este territorio estuvo constituida por árboles de madera dura, de los cuales se observan vestigios en las márgenes del río. Actualmente en la llanura predomina la vegetación característica de las sabanas tropicales y bosques en la región montañosa.

Desde el punto de vista geológico la cuenca se desarrolla sobre dos sistemas estructurales: el valle ocupa un extenso sinclinal y la parte alta de la cuenca la Orogenía de la Sierra Maestra.

En la cuenca han sido descritas cuatro formaciones geológicas fundamentales:

- a) Formación Charco Redondo: integrada por calizas de edad Eoceno medio.
- b) Formación Datil: un conglomerado polimítico de edad probable Plioceno.
- c) Formación Cauto: compuesta por sedimentos de arenas arcillosas de edad Holoceno.
- d) Formación Bayamo: constituida por arcillas y areniscas de edad Mioceno-superior-Plioceno.



Figura 4. Localización geográfica de la cuenca del Río Cauto.

Figure 4. Geographical location of the Río Cauto basin.

Los suelos predominantes en la región son los Oscuros Plásticos Gleysados con Carbonatos y los Aluviales. También se observan suelos rojos-amarillentos hacia la parte media de la cuenca y suelos escabrosos en la parte alta.

3.2 Clima

Los vientos Alisios constituyen la fuente principal de humedad en la cuenca. El ascenso vertiginoso de este aire húmedo por las laderas de la Sierra Maestra provoca una lluvia orográfica que representa el sostén del escurrimiento en esta área.

El acentuado contraste entre la llanura y la sierra produce un marcado efecto sobre la distribución de la lámina de lluvia media anual. Esta lámina varía, desde la costa hacia la zona montañosa, de 1000 a 2000 mm (Figura 5). En la zona montañosa la lluvia anual fluctúa entre 1400 y 2000 mm, siendo el gradiente promedio del incremento de la lámina de lluvia con el aumento de la altura (alturas superiores a los 200 msnm) del orden del 6% por cada 100 m de elevación. La Sierra Maestra funciona como una barrera que impide que la lámina de lluvia anual en la parte central del valle sea superior a los 1000 mm.

La distribución interanual de la lámina de lluvia refleja claramente un período seco (noviembre-abril) y un período húmedo (mayo-octubre). La lámina de lluvia media anual (serie 1970-1989) en la cuenca es 1230 mm, de los cuales 30 % caen durante el período seco y 70% precipitan durante los meses más lluviosos.

Entre los meses de agosto a noviembre la cuenca puede ser frecuentada por depresiones tropicales, perturbaciones ciclónicas y huracanes; organismos capaces de producir, en pocas horas, la lámina de lluvia equivalente a un año. Por ejemplo, en octubre de 1963, el Huracán Flora arrojó sobre la cuenca una lámina de lluvia máxima, acumulada en cuatro días, cercana a los 1900 mm y la lámina de lluvia media en la cuenca alcanzó los 2100 mm. Estos potentes organismos tropicales, conjuntamente con las tormentas de verano (mayo-octubre) son las principales causas de crecidas e inundaciones en la región del Cauto.

La temperatura en este territorio se mantiene alta durante todo el año; el valor medio anual de esta variable climatológica, expresados en grados celsius, es de 26 grados. Por su parte la humedad relativa del aire alcanza un valor promedio anual de 83%.

Del mismo modo que la lluvia, la distribución espacial de la lámina media anual de evaporación (medida en evaporímetros standard Clase "A") muestra un pronunciado contraste entre la llanura y la montaña. En la región central del valle se registran valores promedios anuales algo superiores a los 2300 mm mientras que en el área montañosa esta variable alcanza los 1800 mm (Figura 6). La lámina de evaporación media anual (serie 1970-1989) en la parte llana de la cuenca (70% del área total) es 2200 mm y en la montaña 1850 mm.

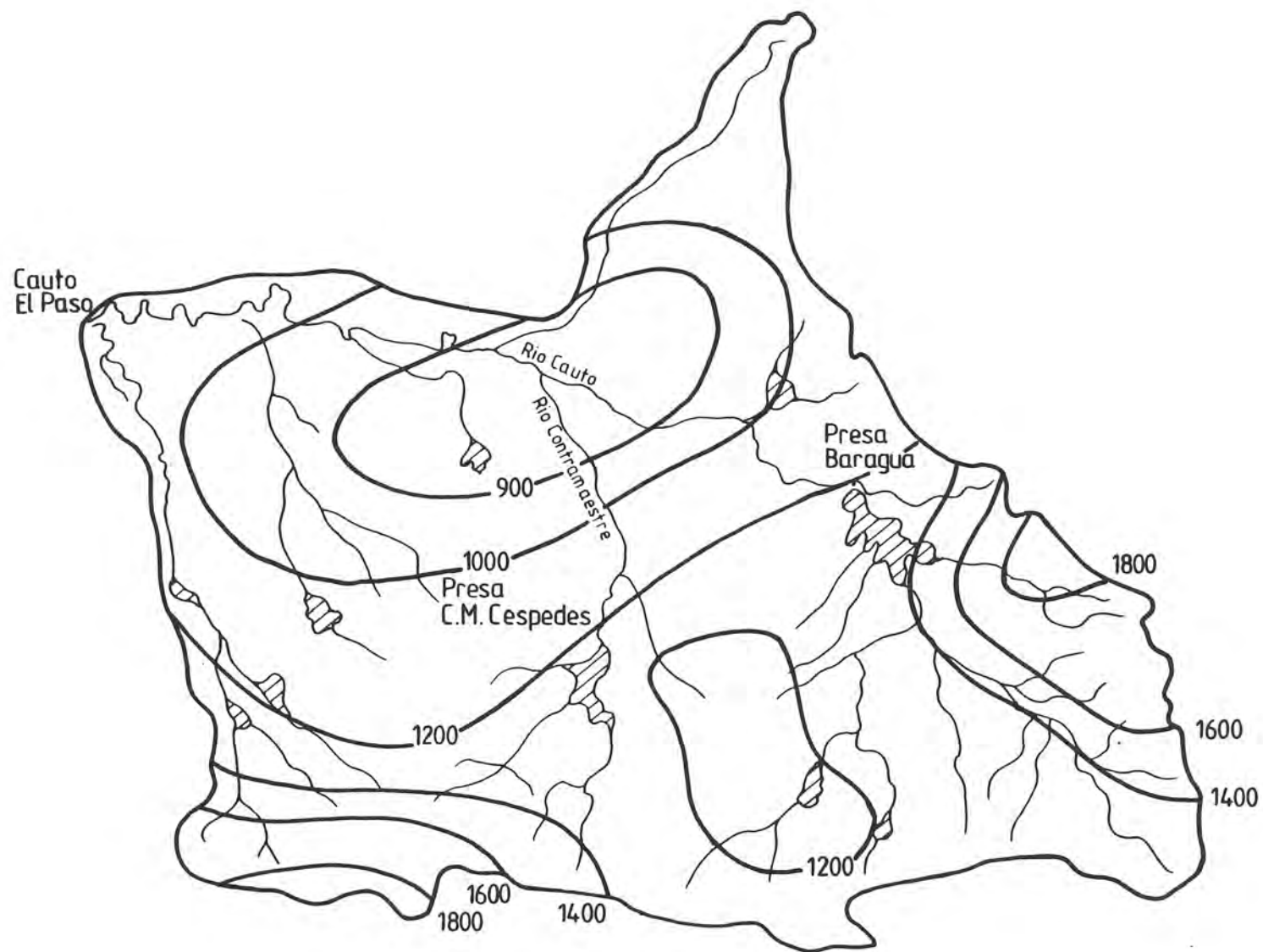


Figura 5. Precipitación media anual en la cuenca del Río Cauto para el período 1970-1989.

Figure 5. Average annual precipitation in the Rio Cauto basin (1970-1989).

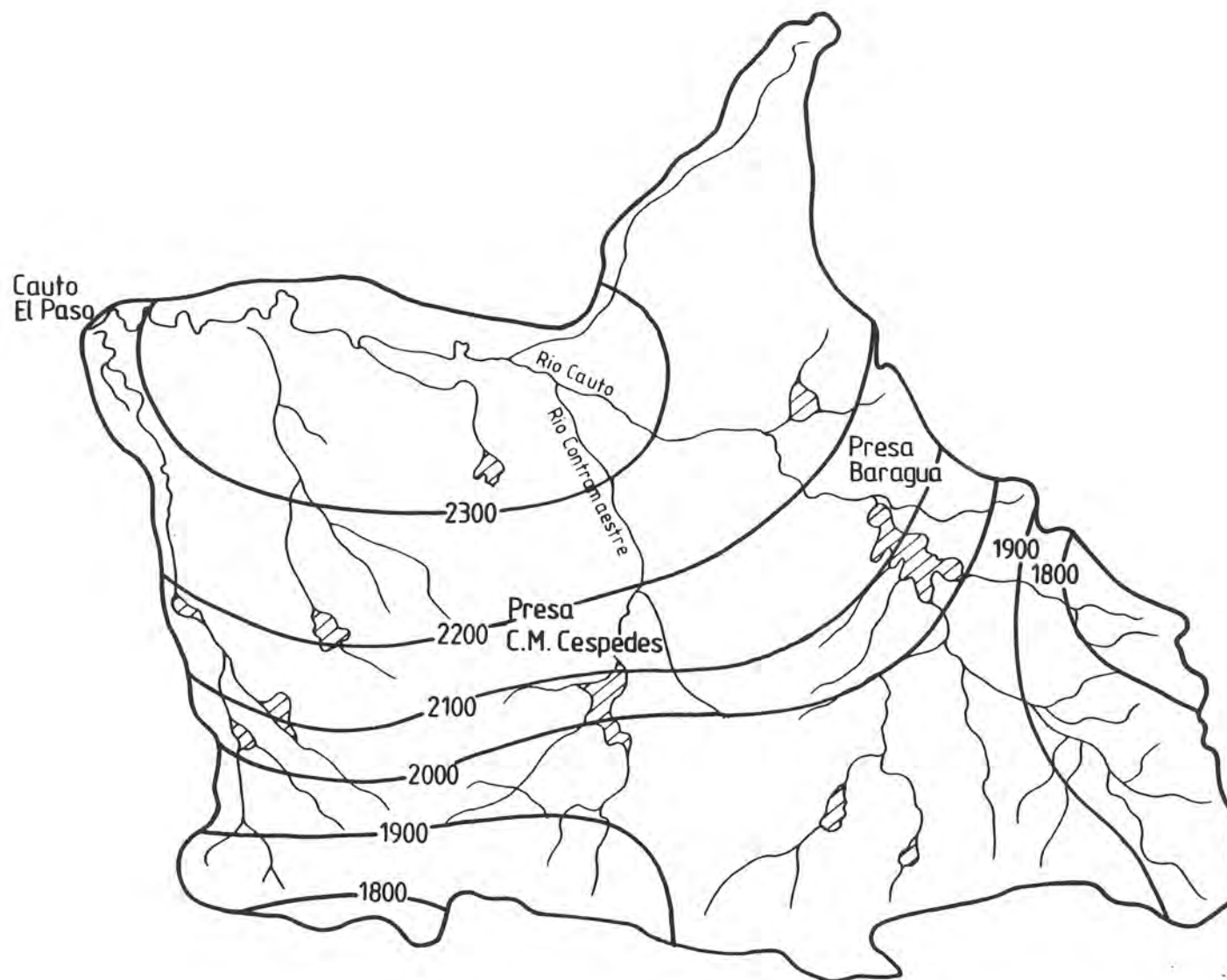


Figura 6. Lámina media anual de evaporación en la cuenca del Río Cauto para el período 1970-1989.

Figure 6. Average annual evaporation in the Río Cauto basin (1970-1989).

3.3 Escurrimiento superficial

El volumen anual de escurrimiento natural estimado en la estación hidrométrica Cauto Cristo (4683 km²) es de 1038 millones de m³ de agua. El 80% de este volumen es aportado por el río Contramaestre (200 millones de m³) y por la cabecera del propio río Cauto en el punto donde actualmente se ubica la Presa Protesta de Baragua (600 millones de m³).

La mayoría de los ríos tributarios del Cauto pueden considerarse de régimen torrencial, toda vez que en los mismos se observa una rápida respuesta a las lluvias intensas y de corta duración, generándose picos de caudal muy altos y repentinos, mientras que durante la mayor parte del tiempo se registran caudales relativamente bajos.

3.4 Desarrollo hidráulico de la cuenca

La cuenca del río Cauto es la más intensamente explotada en el país. En la actualidad existen nueve presas que almacenan 812 millones de m³ de agua, de las cuales las dos más grandes, Carlos Manuel de Céspedes (situada en el río Contramaestre, con una capacidad de embalse de 245 millones de m³) y la presa Protesta de Baragua (situada en el Cauto, con una capacidad de embalse de 250 millones de m³) regulan aproximadamente el 80% del escurrimiento que pasa por la estación hidrométrica Cauto Cristo. Otras dos presas se encuentran en construcción, y una de ellas, que se construye en la localidad Cauto-El Paso, aguas abajo de la estación Cauto Cristo, almacenará alrededor de 400 millones de m³ de agua. De este modo casi todo el escurrimiento del río será regulado por la actividad humana.

3.5 Red de observaciones hidrometeorológicas

El régimen hidrológico de la cuenca es controlado por una red de estaciones hidrológicas que abarca a todos los ambientes físico-geográficos de la misma. Un total de 200 pluviómetros, de ellos 18 con facilidad de comunicación en tiempo real, registran conjuntamente con 15 pluviógrafos la lluvia diaria. En cinco estaciones climatológicas se observan diariamente la temperatura y humedad del aire, la velocidad y dirección del viento, la lámina de lluvia y de evaporación, y en 10 estaciones hidrométricas se obtienen registros diarios de caudal y nivel fluvial, mientras que en otras 12 se observa sólo el nivel y se realizan aforos esporádicos.

4. APLICACION DEL MODELO A LA CUENCA DEL RIO CAUTO

4.1 Subdivisión de la cuenca

Debido a la intensa explotación hidráulica de la cuenca y a los actuales requerimientos existentes en la misma, se estimó necesario aplicar el modelo en tres subcuencas principales. La primera aplicación consistió en calibrar el modelo hasta la presa Protesta de Baragua, la segunda en la presa Carlos Manuel de Céspedes y la tercera en la estación hidrométrica Cauto Cristo (Figura 7).

4.2 Base de datos

Para calibrar el modelo se utilizaron los datos de 32 estaciones pluviométricas, cuatro estaciones de evaporación y 7 estaciones de caudal (incluidas en éstas las entregas y niveles de las presas Protesta de Baragua y Carlos Manuel de Céspedes). La serie cronológica seleccionada abarcó el período 1970-1989. Pero, concorde con las características del desarrollo hidráulico de la región, el modelo se calibró para dos períodos independientes: 1970-1978, que es representativo de las condiciones naturales de la cuenca hasta la estación hidrométrica El Salto Travesía y el período 1980-1989, que refleja las condiciones actuales de intensa regulación hidráulica en el territorio.

La red de estaciones seleccionadas para el trabajo posee una distribución espacial que permite describir adecuadamente el comportamiento del ciclo hidrológico en la cuenca (Figura 7).

La base de datos con que se contó fue, en sentido general, bastante completa, fundamentalmente en el período 1980-1989. La mayor dificultad confrontada con las observaciones disponibles fue la existencia de datos faltantes durante los primeros años del período 1970-1978 y al inicio de la operación de la presa Protesta de Baragua. La Tabla 1 muestra, tomando como ejemplo el caso de la cuenca de la citada presa, el porcentaje de datos disponibles para las series 1970-1979 y 1980-1989. Los datos faltantes fueron reemplazados utilizando las facilidades que brinda el modelo para ello.

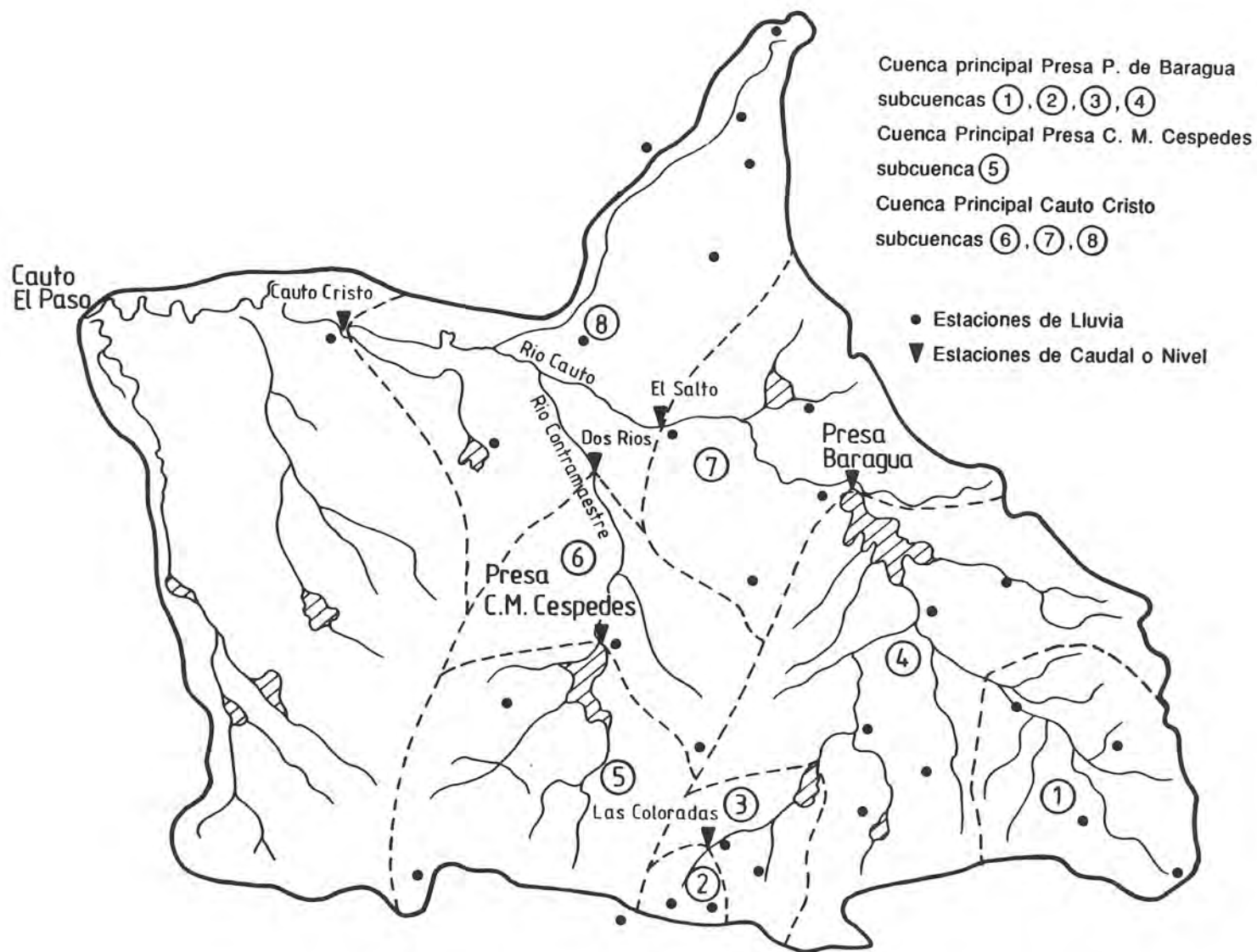


Figura 7. Subcuencas utilizadas para calibrar el modelo HBV en la cuenca del Río Cauto.

Figura 7. Subbasins in the application of the HBV model to the Rio Cauto basin.

Estación	% serie 1970-79	% serie 1980-89
288	100	94
442	63	97
488	75	98
513	86	99
515	100	99
830	100	100
889	88	100
1111	99	98
1206	93	86
1323	92	100
1421	73	100
1510	67	100
1511	60	100
1580	50	100
1586	70	99
1587	74	99
1626	100	100
Las Coloradas	100	100
P.Baragua	(a)	99
Guayabero	99	(b)

Tabla 1. Porciento de datos diarios disponibles en la serie 1970-1989. Cuenca de la presa Protesta de Baragua.

(a) la presa se terminó de construir en 1980

(b) el Guayabero dejó de observar el escurrimiento natural en 1979.

Table 1. Percentage of daily data available in 1970-1989 period. Protesta de Baragua basin.

(a) the construction of the dam was completed in 1980

(b) the Guayabero station was closed in 1979.

La comprobación de la representatividad de las estaciones seleccionadas se estudió con el método de doble masas, utilizando el programa DMASS que forma parte del paquete de programas auxiliares del modelo. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en el 95% de los casos. Unicamente dos pluviómetros, el 1206 y el 513, no guardaban relación con el comportamiento general de la lluvia en la cuenca; no obstante, ambos equipos fueron usados en la calibración, toda vez que describían el comportamiento local de la lluvia en un área importante para la formación del escurrimiento aguas arriba de la presa Protesta de Baragua.

Los pesos de las estaciones pluviométricas utilizadas en cada subcuenca para calcular la lámina de lluvia media fueron determinados sobre la base de la variación espacial de la lámina de lluvia anual (mapa isoyético del período 1964-1983), mapas isoyéticos de las tormentas más importantes ocurridas en la cuenca, el gradiente de la lluvia en función de la altura en la región montañosa y la relación de esta variable con las crecidas registradas en las estaciones hidrométricas existentes en el río. En este caso se

utilizó el método de doble masa para comprobar cuán representativos eran los pluviómetros escogidos en cada subcuenca y para delimitar el área de cada subcuenca en función de las características de la lluvia. En el caso de la evaporación se analizaron los datos de las cinco estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca y el mapa de evaporación promedio anual del período 1964-1983. Para calibrar el modelo se escogieron los datos de las estaciones Babiney (en la llanura) y Gilbert (en la montaña).

Los datos de escurrimiento medio diario fueron tomados de las estaciones de aforos Las Coloradas, Guayabero, Dos Ríos, El Salto Travesía, Cauto Cristo y de las entregas y vertimientos en las presas Protesta de Baragua y Carlos Manuel de Céspedes. El análisis cualitativo de la información de caudal se basó en la relación lluvia escurrimiento, pues el alto grado de regulación de la cuenca impidió emplear el método de doble masa.

4.3 Influencia del riego

El agua disponible en el sistema hidráulico del Cauto es principalmente destinada al riego. A lo largo de los cauces hay múltiples estaciones de bombeo, pequeñas obras de toma y derivadoras que sustraen diariamente un volumen considerable de agua.

El riego implica un incremento en las pérdidas de agua en la cuenca, como consecuencia del aumento de la evapotranspiración (en el caso del Cauto se eleva mucho la evaporación en las áreas arroceras) conjuntamente con la influencia negativa directa que produce la sustracción del agua del río y el trasvase de este líquido hacia el exterior de la cuenca.

Aunque en el momento de calibrar el modelo no se contaba con los datos de riego en la cuenca, resultó posible simular el efecto del riego tomando como base la relación entre las entregas de agua desde las presas y la cantidad observada en las estaciones hidrométricas aguas abajo de éstas.

De este modo, durante el período 1980-1989 el aporte conjunto de las áreas que tributan sus aguas a la estación hidrométrica Cauto Cristo alcanzó un valor promedio de 606 millones de m^3 , de los cuales solamente se registraron en dicha estación 473 millones de m^3 . Lo anterior indica que en el área existente entre las estaciones hidrométricas El Salto Travesía, Dos Ríos y Cauto Cristo fueron sustraídos alrededor de 132 millones de m^3 de agua, es decir, el 22 % del escurrimiento proveniente de la parte alta de la cuenca del Cauto.

4.4 Calibración

La cuenca del Cauto se dividió en tres subcuencas principales: a) Presa Protesta de Baragua, b) Presa Carlos Manuel de Céspedes y c) Estación hidrométrica Cauto Cristo. En cada caso la calibración se realizó de manera independiente, es decir, cada subcuenca contó con su propia base de datos (Figura 7).

4.4 a) Calibración del modelo en la subcuenca Presa Protesta Baragua

De acuerdo a las características del escurrimiento y la lluvia en el área, y teniendo en cuenta las instalaciones hidráulicas existentes en la misma, éste territorio se dividió en cuatro subcuencas (numeradas de 1 a 4 en Figura 7):

- 1) localidad La Borgita
- 2) estación hidrométrica Las Coloradas
- 3) presa Gilbert y
- 4) presa Protesta de Baragua.

El modelo fue calibrado de forma independiente para tres situaciones en la cuenca:

- a) Período 1970-1978: representativo de las condiciones naturales en el territorio. Aquí fueron utilizados los datos de 17 pluviómetros, la evaporación observada en la estación climática de la presa Gilbert y los registros de escurrimiento diarios de las estaciones hidrométricas Las Coloradas y El Guayabero (estación muy cercana a la localidad que actualmente ocupa la presa Protesta de Baragua). Las presas Gilbert y Charco Mono estaban construidas y funcionando en este período, pero se comprobó que la influencia de éstas sobre el régimen natural del escurrimiento en la cuenca de la presa Protesta de Baragua no es notable. Al no disponerse de los datos de operación de Gilbert y Charco Mono se asumió que la cantidad de agua que éstas aportan es igual a la que entra más la lluvia sobre el embalse menos la evaporación desde éste.
- b) Período 1980-1989: representativo de las condiciones actuales en la cuenca con la operación de la presa Protesta de Baragua. En ésta aplicación fueron utilizados los datos de 17 pluviómetros, la evaporación observada en la estación climática de la presa Gilbert (corregida sobre la base del gradiente de la evaporación en función del incremento de la altura), el registro del escurrimiento diario en la estación hidrométrica Las Coloradas y los datos diarios de entrega y vertimientos en la presa Protesta de Baragua.
- c) Período 1984-1989 utilizando estaciones de telecorreo: el modelo fue calibrado con la red reducida de pluviómetros con facilidad de comunicación en tiempo real para los últimos seis años de operación de la presa Protesta de Baragua. Los datos de nivel y entrega de la presa fueron cuidadosamente revisados y las 5 estaciones que reportan la lluvia vía telégrafo en la parte alta de la cuenca fueron utilizadas. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

El año 1979 fue eliminado de la serie de datos disponibles, toda vez que los datos registrados en la estación hidrométrica El Guayabero no eran confiables, como consecuencia de estar en fase de construcción la presa Protesta de Baragua, situada a unos siete kilómetros aguas arriba de la mencionada estación de aforos. Dicho año también fue excluido en el caso de la estación Las Coloradas por presentar información de caudales dudosa. En todas las aplicaciones del modelo en esta cuenca se obtiene como resultado el modelado del escurrimiento de la forma siguiente:

- a) modelado del escurrimiento en la localidad La Borgita, sobre la base de la relación entre la lluvia caída y los parámetros responsables de la formación del escurrimiento. En este caso el hidrograma obtenido no se compara con registros reales por no haber estaciones de caudal en esta área del río,
- b) modelado del escurrimiento en la subcuenca Las Coloradas. En este caso el escurrimiento modelado se compara con los registros reales de la estación hidrométrica. La aplicación del modelo en esta subcuenca permitió obtener los valores característicos de los parámetros que intervienen en la formación del escurrimiento en las áreas montañosas,
- c) modelado del escurrimiento en la presa Gilbert. Esta subcuenca tuvo un tratamiento similar al de la localidad La Borgita, por no contarse con la información de la operación del embalse,
- d) modelado del escurrimiento en el área complementaria entre las subcuencas La Borgita, Gilbert y El Guayabero y
- e) modelado del escurrimiento en la cuenca principal Presa Protesta de Baragua. En este caso el escurrimiento modelado durante el primer período 1970-78 es comparado con el real observado en la estación El Guayabero. En el período 1980-1989 el escurrimiento modelado es comparado con el caudal afluente a la presa Protesta de Baragua, que fue estimado sobre la base de los datos de nivel del agua en el embalse, entregas y vertimientos de la forma siguiente:

$$Q_a = Q_e + Q_v + \Delta H \cdot A / \Delta t$$

donde:

Q_a : caudal afluente al embalse

Q_e : entregas desde el embalse

Q_v : vertimientos en el embalse

ΔH : diferencia de nivel diaria en el embalse

A : área del embalse

Δt : tiempo entre las observaciones de nivel en el embalse

La mayor dificultad confrontada para calibrar el modelo en esta primera aplicación fue lograr un resultado aceptable en el modelado de las crecidas provocadas por lluvias locales, fenómeno muy común en ésta área. En la calidad del resultado alcanzado intervino de manera decisiva la selección de los pluviómetros para estimar la lluvia media en cada subcuenca y, en particular, los pesos atribuidos a cada equipo para la ponderación de la lámina de lluvia. La decisión tomada en este sentido estuvo fundamentada en una zonificación de la lluvia basada en el método de doble masa y en corridas independientes del modelo, utilizando cada vez el equipo que de acuerdo al estudio de los datos tenía mayor probabilidad de diseñar las crecidas de origen local, es decir a cada equipo se le fue dando un peso del 100% en el modelado del escurrimiento.

En la Figura 8 se muestran los resultados de la calibración para la cuenca de la Presa Protesta de Baragua en el año 1988 utilizando todos los pluviómetros disponibles. La discrepancia obtenida para el mes de julio se debió a falta de precisión en la curva de vertimiento utilizada. Los resultados obtenidos en esta primera aplicación pueden considerarse valiosos especialmente en el pronóstico de volúmenes. Esto permitirá operar más eficientemente el embalse de la presa Protesta de Baragua.

La calibración con las estaciones de telecorreo permitirá hacer pronóstico en tiempo real. En la Figura 9 se muestran los resultados de la calibración para el año 1988 utilizando las estaciones de telecorreo. Puede apreciarse que los resultados fueron muy similares a los obtenidos al utilizar todos los pluviómetros.

Los valores de los parámetros que se determinaron finalmente para esta aplicación del modelo aparecen en las figuras A.1.1 y A.1.2 del Apéndice 1.

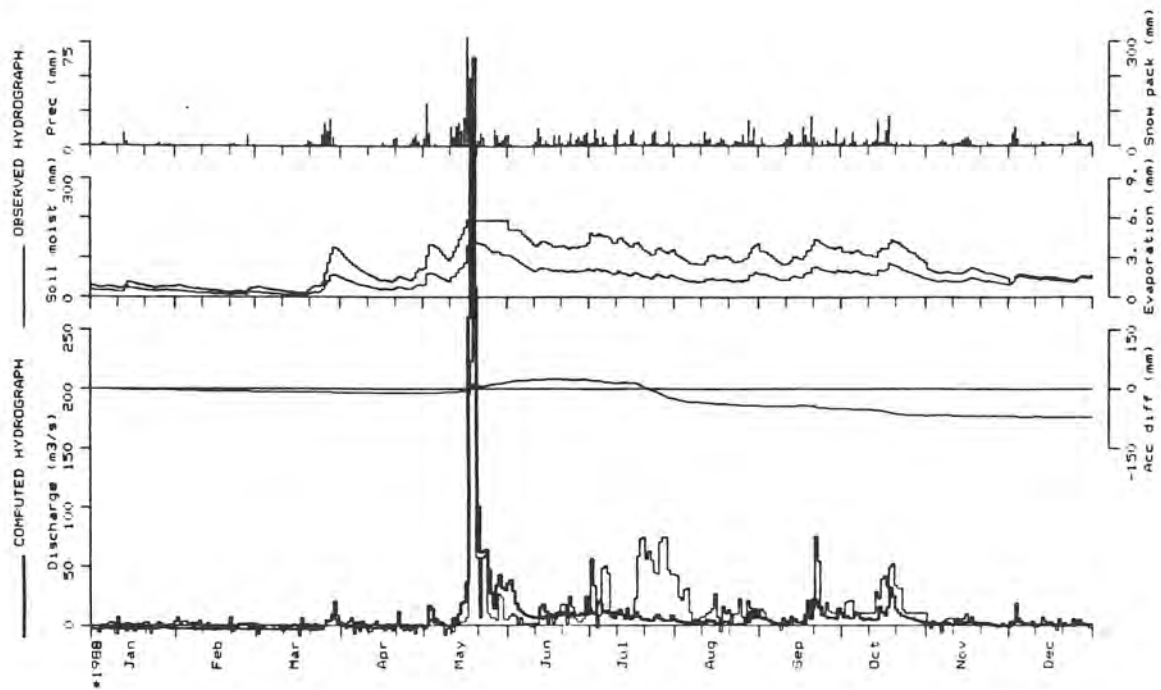


Figura 8. Calibración del modelo para Baragua en 1988 utilizando todos los pluviómetros disponibles.

Figure 8. Model calibration for Baragua in 1988 based on precipitation data from all available stations.

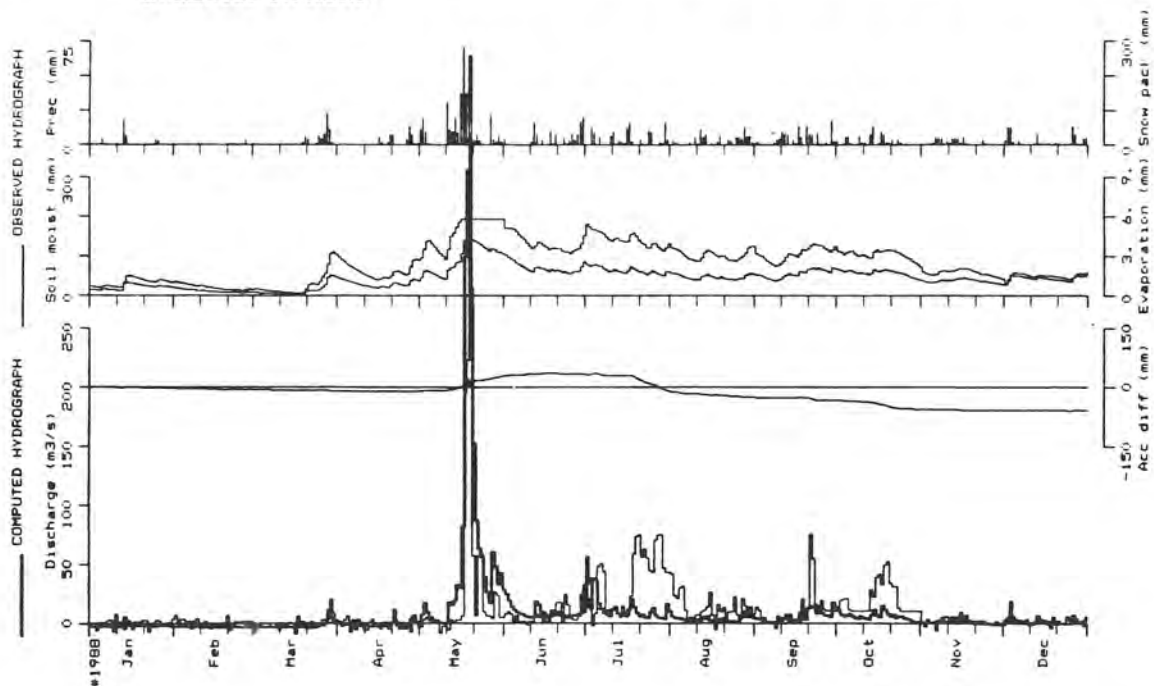


Figura 9. Calibración del modelo para Baragua en 1988 utilizando las estaciones de telecorreo.

Figure 9. Model calibration for Baragua in 1988 based on precipitation data from the telecorreo stations.

4.4 b) Calibración del modelo en la subcuenca Presa Carlos Manuel de Cespedes

En esta aplicación, el modelo fue calibrado para el período 1980-1989, que corresponde al de explotación de la presa Carlos Manuel de Cespedes.

Los resultados obtenidos fueron relevantes (Figura 10), tanto en la simulación de los picos de las crecidas como en el caso del volumen, lo cual estuvo determinado por la calidad de la información con que se contó, fundamentalmente, la concerniente a la operación de la presa. El valor obtenido de R^2 fue de 0.81.

Al igual que en el caso de la presa Protesta de Baragua la calibración obtenida permitirá pronósticar los caudales afluentes al embalse de la presa Carlos Manuel de Céspedes y contribuir al uso racional del recurso.

En el Apéndice 1 aparece el listado del archivo de parámetros que resultó de esta calibración.

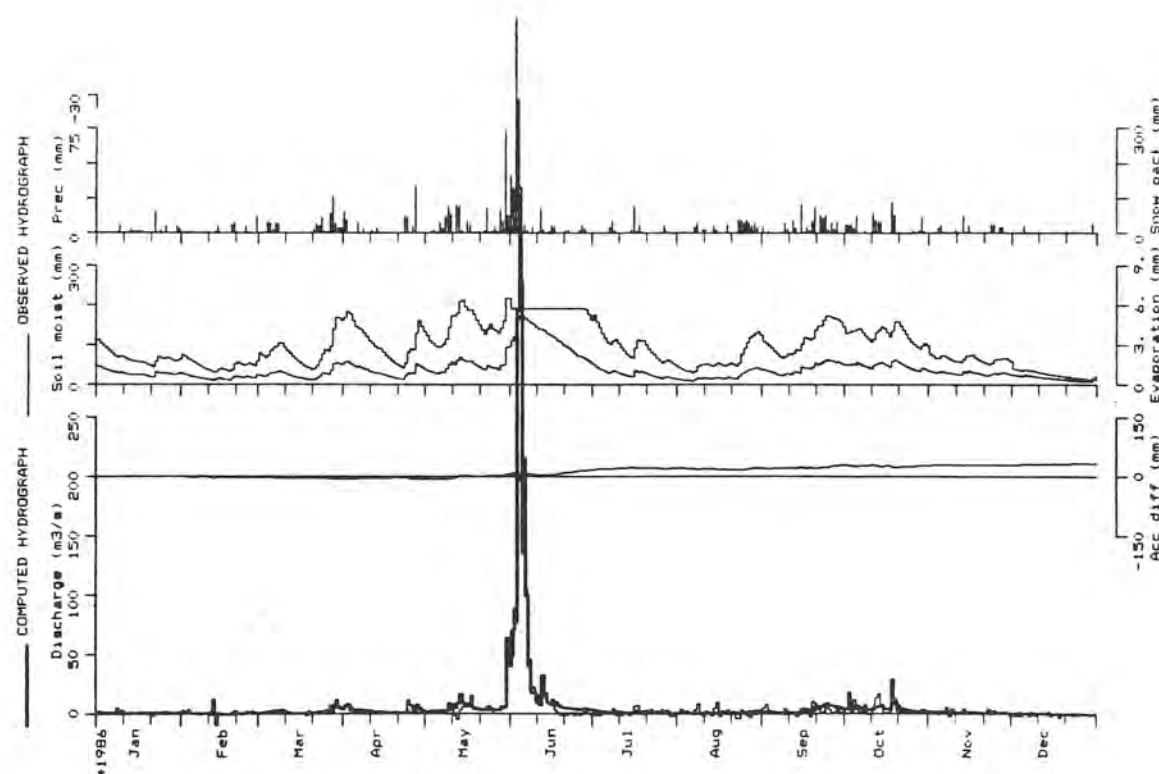


Figura 10. Calibración del modelo para Carlos Manuel de Céspedes en 1986.
Figure 10. Model calibration for Carlos Manuel de Cespedes in 1986.

4.4 c) Calibración del modelo en la subcuenca Cauto Cristo

En el área complementaria existente entre las presas Protesta de Baragua, Carlos Manuel de Céspedes y la estación de aforos Cauto Cristo se efectúan importantes sustracciones de agua destinadas al riego. Por ello, en la aplicación del modelo para ésta zona resulta de interés mantener un control de la relación entre las entregas de agua desde las presas y su consumo a lo largo del río.

Tal como se muestra en la Figura 7, esta subcuenca fue subdividida en 3 zonas (áreas 6, 7 y 8):

- 1) Estación hidrométrica El Salto Travesía.
- 2) Estación hidrométrica Dos Ríos.
- 3) Estación hidrométrica Cauto Cristo.

Durante la calibración, las entregas y los vertimientos de las presas Protesta de Baragua y Carlos Manuel de Céspedes fueron considerados como aportes (entradas) a la subcuenca. De esta forma la simulación pudo ser comparada con los caudales registrados en las estaciones hidrométricas situadas aguas abajo de las mismas.

La calibración se realizó para el período 1984-1988, que es representativo de las condiciones actuales de intensa explotación de los recursos hídricos de la subcuenca. Se utilizaron los datos de 12 pluviómetros, la evaporación observada en la estación climática Babiney, el registro diario de caudal en las estaciones hidrométricas El Salto Travesía, Dos Ríos y Cauto Cristo y los datos diarios de entrega y nivel de las presas Protesta de Baragua y Carlos Manuel de Céspedes.

Como resultado de esta calibración se obtiene el modelado del escurrimiento en cada una de las subcuencas indicadas anteriormente, comparado con los registros reales de cada estación hidrométrica. En los tres casos el escurrimiento modelado es representativo de toda el área tributaria a cada estación de aforos.

La calidad de la información de que se dispuso para esta aplicación del modelo fue buena, toda vez que se contó con el 100% de los datos del período trabajado y la comprobación realizada a través del método de doble masa conjuntamente con el análisis visual de los datos.

La mayor dificultad para lograr una adecuada calibración en esta aplicación fue la carencia (durante esa etapa de trabajo) de los datos de sustracciones de agua del río con fines de riego, razón por la cual se realizó un detallado estudio de la relación existente entre las entregas de agua en las presas y los caudales registrados en las estaciones de aforos situadas aguas abajo de las mismas, con el objetivo de definir las pérdidas de riego existentes. Con esta información se diseñó una relación caudal aportado-caudal registrado, que se utilizó para modelar, las supuestas pérdidas de agua por irrigación en cada tramo del río.

En las Figuras 11 y 12 se muestran los resultados de la calibración para Cauto Cristo en 1984 y 1985 respectivamente. En el Apéndice 1 se presenta el listado de parámetros finales.

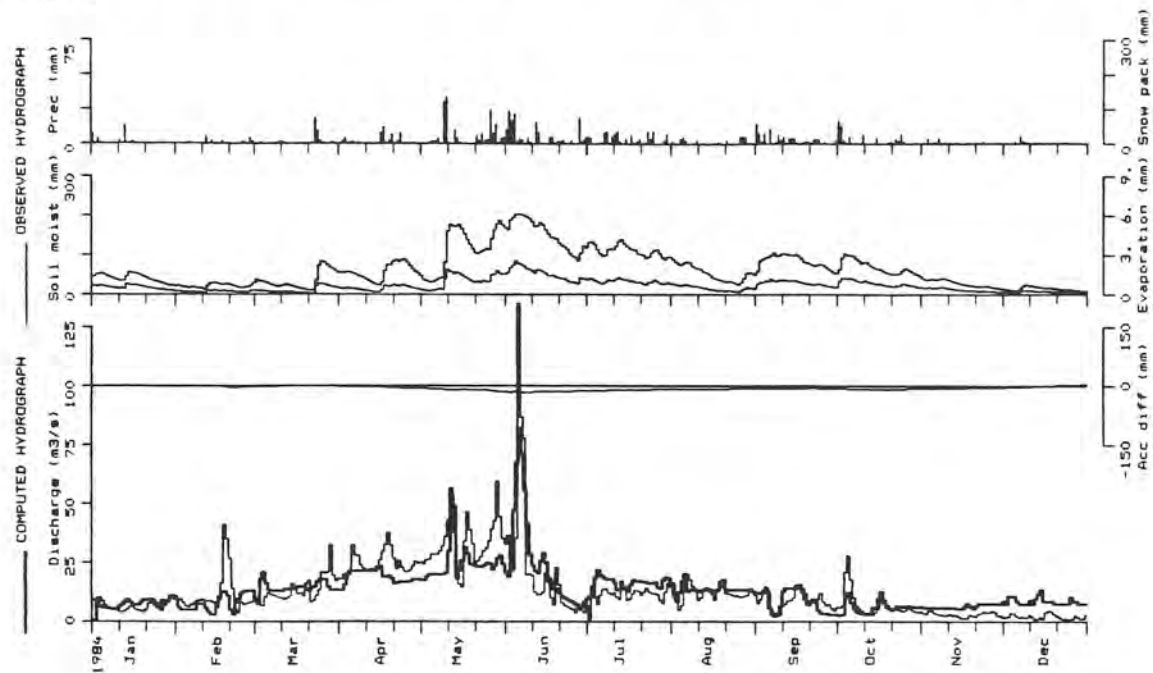


Figure 11. Calibración del modelo para Cauto Cristo en 1984 considerando las pérdidas por irrigación.

Figure 11. Model calibration for Cauto Cristo in 1984 considering irrigation losses.

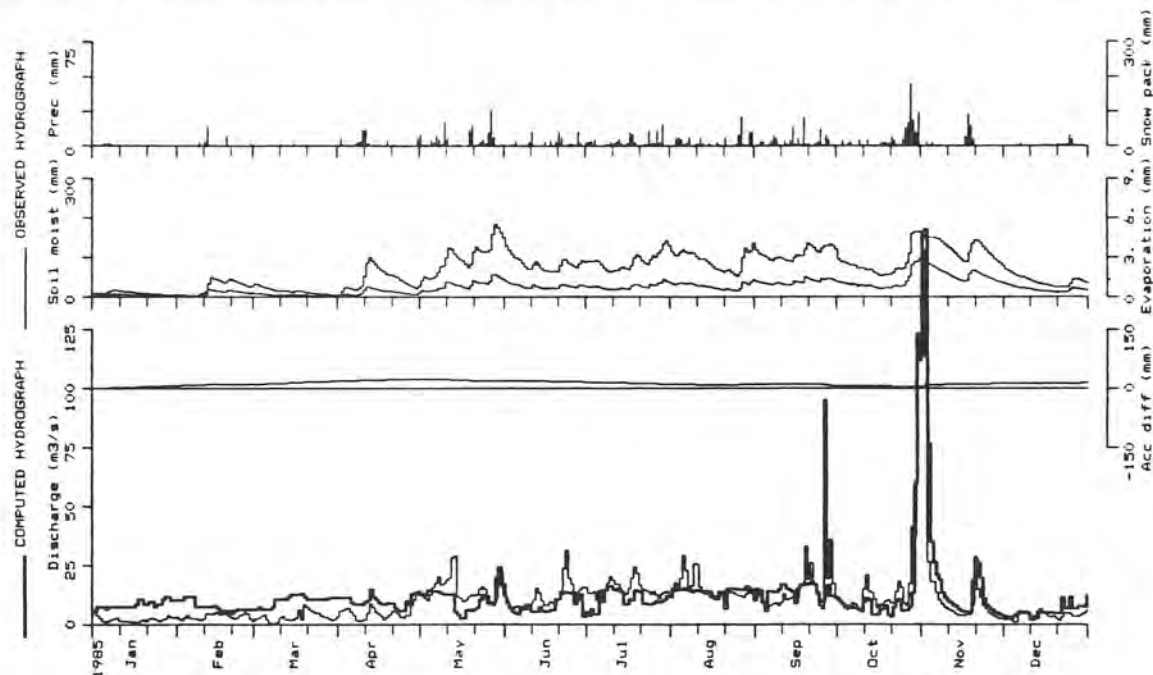


Figure 12. Calibración del modelo para Cauto Cristo en 1985 considerando las pérdidas por irrigación.

Figure 12. Model calibration for Cauto Cristo in 1985 considering irrigation losses.

La Tabla 2 es un resumen de los valores de R^2 obtenidos para las diferentes calibraciones practicadas en la cuenca del Río Cauto. El Apendice 2 muestra las curvas de duración de caudales calculados y registrados para las tres subcuencas principales.

<u>Estación</u>	<u>Todos los pluviómetros</u>			<u>Telecorreos</u>		
	<u>1970-78</u>	<u>1980-89</u>	<u>1984-89</u>	<u>1970-78</u>	<u>1980-89</u>	<u>1984-89</u>
Las Coloradas	0.61	0.64				
El Guayabero	0.58			0.52		
P. de Baragua		0.57	0.73		0.53	0.71
C. M. Céspedes		0.81				
Cauto Cristo			0.59			

Tabla 2. Valores de R^2 obtenidos en las diferentes calibraciones del modelo en la cuenca del Río Cauto.

Table 2. R^2 values for the different model calibrations in the Rio Cauto basin.

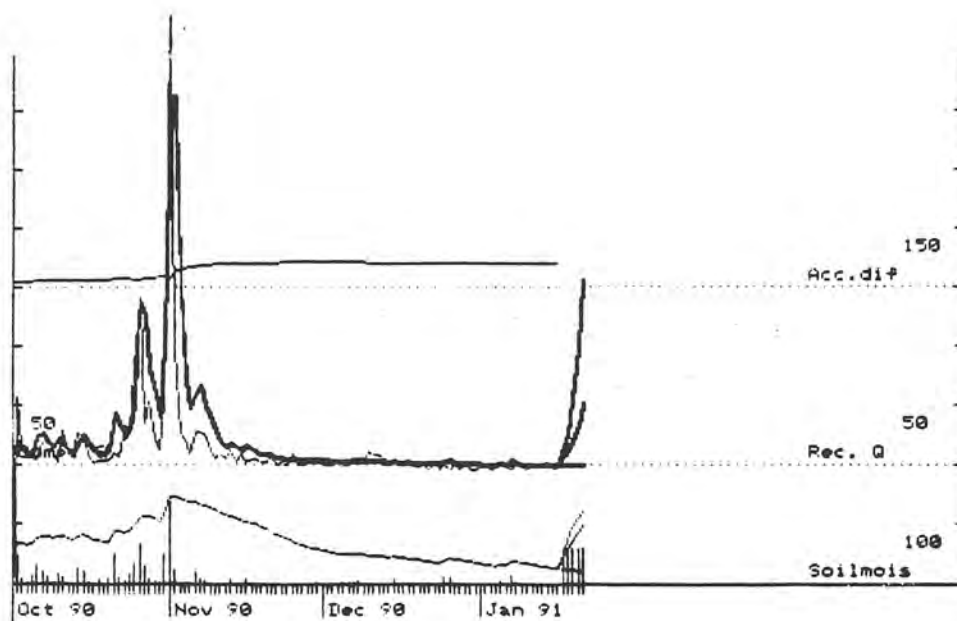
En el caso de la presa P. de Baragua, el valor de R^2 resultó más bajo para el período 1980-89 debido principalmente a que los datos faltantes en esta estación se concentran en los primeros años de operación de la presa.

4.5 Pronósticos

En la segunda visita a Cuba por la parte sueca, se comprobó la factibilidad de realizar pronósticos en tiempo real en la cuenca de la presa Protesta de Baragua, aprovechando la existencia de las estaciones de telecorreo para obtener información de lluvia.

En la Figura 13 se muestra un ejemplo de pronóstico a corto plazo de la entrada de agua al embalse. El ejemplo cubre el período del 17 al 22 de enero de 1991 y fue hecho con tres diferentes alternativas de pronóstico de lluvia tal como se muestra en la figura. Para la prueba se usó la versión del modelo que utiliza sólo las estaciones de telecorreo.

En el manejo de embalses, puede también resultar de interés hacer pronósticos a largo plazo, por ejemplo prediciendo el balance entre la entrada al embalse, la lluvia y la evaporación de la superficie del lago. En un período seco la evaporación puede exceder la entrada, resultando en el balance un valor negativo. Un ejemplo de esto se aprecia en la Figura 14 el cual es un ejemplo de pronóstico a largo plazo en la cuenca de la Presa Protesta de Baragua a partir del 17 de enero. Para el pronóstico se usaron los datos de lluvia correspondientes a las mismas fechas en los años 1970-1989.



BASIN: BARAGUA MONTH: Jan 1991

FORECAST 1

DATE	Precip.	Soilmois	Upp.zone	Low.zone	Comp. Q	Rec. Q	Acc.dif	Evap.	Pcorr
910117	0.0	24.0	0.0	0.8	-1.5			1.1	
910118	0.0	22.9	0.0	0.7	-1.5			1.1	
910119	0.0	21.9	0.0	0.7	-1.6			1.0	
910120	0.0	21.0	0.0	0.7	-1.6			1.0	
910121	0.0	20.0	0.0	0.6	-1.7			0.9	

BASIN: BARAGUA MONTH: Jan 1991

FORECAST 2

DATE	Precip.	Soilmois	Upp.zone	Low.zone	Comp. Q	Rec. Q	Acc.dif	Evap.	Pcorr
910117	20.0	42.8	0.0	1.4	7.6			1.6	
910118	20.0	58.7	0.6	2.1	11.1			2.4	
910119	20.0	72.8	1.7	2.8	18.4			3.2	
910120	20.0	85.3	3.2	3.4	33.4			3.7	
910121	20.0	96.1	4.9	3.9	50.5			4.1	

BASIN: BARAGUA MONTH: Jan 1991

FORECAST 3

DATE	Precip.	Soilmois	Upp.zone	Low.zone	Comp. Q	Rec. Q	Acc.dif	Evap.	Pcorr
910117	30.0	51.8	0.4	1.6	13.7			1.8	
910118	30.0	74.9	2.4	2.3	24.8			3.1	
910119	30.0	94.4	5.4	3.0	54.4			3.9	
910120	30.0	110.6	8.4	3.5	97.0			4.2	
910121	30.0	124.2	10.7	4.1	154.6			4.2	

Figura 13. Simulación de la entrada de agua al embalse de Baragua seguida de 5 días de pronóstico a partir del 17 de enero de 1991. Para el ejemplo se utilizaron tres secuencias distintas de datos de entrada.

Figure 13. Model simulation of the inflow to Baragua reservoir followed by a 5-day forecast commencing 1991-01-17. Three alternatives of input data were used for the example.

BASIN: BARAGUA

Forecast 1991 1 17 using data from the 21 previous years

VOLUME UNIT: accumulated daily mean discharge in m3/s

DATE	MIN	75%	50%	25%	MAX	DIFF (50%)
1 20	-6	-6	-5	3	7	-2
1 25	-15	-15	-1	5	14	4
1 30	-24	-22	-5	7	20	-0
2 4	-36	-32	-8	9	24	-1
2 9	-47	-39	-0	10	29	2
2 14	-59	-47	2	14	52	1
2 19	-68	-58	0	17	65	-1
2 24	-80	-59	-6	22	73	-2
3 1	-90	-67	12	29	414	0
3 5	-102	-76	14	31	524	1
3 10	-117	-83	19	44	589	1
3 15	-131	-96	25	48	650	2
3 20	-146	-110	27	50	722	0
3 25	-156	-120	28	54	744	0
3 30	-160	-117	28	71	752	NORMAL VOLUME: 6

ACCUMULATED VOLUME LAST DAY

CRONOLOGICAL ORDER		ORDER OF MAGNITUDE	
Year	Volume	Year	Volume
1970	43	1983	752
1971	42	1989	240
1972	226	1972	226
1973	165	1973	165
1974	37	1978	75
1975	18	1979	71
1976	54	1976	54
1977	28	1970	43
1978	75	1971	42
1979	71	1974	37
1980	-160	1977	28
1981	-95	1975	18
1982	-117	1986	-48
1983	752	1987	-72
1984	-152	1981	-95
1985	-155	1982	-117
1986	-48	1990	-130
1987	-72	1988	-141
1988	-141	1984	-152
1989	240	1985	-155
1990	-130	1980	-160

Figura 14. Pronóstico a largo plazo en Baragua para el período 1991-01-17--1991-03-30.

Figure 14. Long range forecast in Baragua for the period 1991-01-17--1991-03-30.

5. DISCUSION Y CONCLUSIONES

Alrededor del 80% del escurrimiento superficial anual registrado en el Valle del río Cauto se origina en la región montañosa de la Sierra Maestra. La lluvia que da lugar a este fenómeno tiene un carácter torrencial y, además, una ocurrencia local durante el verano. Como consecuencia de estas condiciones, el hidrograma registrado en las estaciones hidrométricas se caracteriza por una gran cantidad de picos que reflejan las crecidas súbitas provocadas por las tormentas de verano, del mismo modo que se observan grandes crecidas provocadas por eventos pluviales de alcance regional.

Caracterizar lo anteriormente expresado resultó una de las dificultades principales en el proceso de calibración del modelo, toda vez que modelar todos los picos de caudal registrados en las estaciones de aforo exigiría de la utilización de una gran cantidad de pluviómetros y de un minucioso estudio del peso de la lluvia precipitada en cada localidad sobre la estimación de la lámina de lluvia media diaria en la cuenca. Sin embargo, los resultados obtenidos fueron satisfactorios, debido a que en la selección de los pluviómetros y sus pesos prevaleció el criterio de que describieran fundamentalmente los eventos pluviales con importancia relevante en la formación del volumen de escurrimiento en la cuenca. Por otra parte, para lograr una mejor modelación del escurrimiento (forma y volumen) fue necesario subdividir la cuenca, aguas arriba del cierre principal, en subcuencas concorde a las peculiaridades del proceso de formación del escurrimiento en cada área.

En los resultados de la calibración del modelo se observó que en la representación de la curva de recesión del hidrograma (parámetros K_0 , K_1 y K_2), el volumen de agua proveniente de las componentes subsuperficial y subterránea del escurrimiento superficial, principalmente en las áreas montañosas, no siempre resultó posible modelarla, sobretodo en los períodos de altas crecidas, lo que está relacionado con el papel que desempeña la intensidad de la lluvia en las regiones tropicales.

Los resultados obtenidos en la calibración, utilizando la red de estaciones pluviométricas con facilidades de comunicación que existe en la cuenca de la Presa Protesta de Baragua, demostraron la factibilidad de emplear el modelo para el pronóstico en tiempo real, aunque es necesario, antes de implementar el modelo para este fin, revisar la base de datos de que se disponen para suplir la deficiencia que tiene la información de la citada presa. Concorde con lo anterior, es importante estudiar con mayor detenimiento la posibilidad de implementar el modelo en toda la cuenca del Cauto empleando exclusivamente la red de estaciones pluviométricas que actualmente brindan, en tiempo real, la información diaria de la lluvia; lo cual permitiría incorporar el pronóstico diario del caudal en la operación de los hidroconjuntos ubicados en este territorio.

Por otra parte, teniendo en cuenta que, durante el proceso de calibración, el modelo realiza un balance diario del contenido de humedad en el suelo, esto podría ser utilizado para el pronóstico de la necesidad de riego en las áreas de cultivo; para lo que se requeriría implementar las facilidades de software necesarias para procesar dicha información como parte del paquete de programas del modelo y adecuar a tal propósito la subdivisión de la cuenca, de acuerdo a los tipos de cultivo existentes en la misma.

El modelo resulta muy útil para la depuración de la calidad de los datos, toda vez que brinda la oportunidad de relacionar directamente las variables hidrológicas utilizadas comunmente para los estudios de la escorrentía superficial y a partir de ésto identificar si la respuesta de la cuenca ante los impulsos exteriores del ambiente son correctos o viceversa.

BIBLIOGRAFIA

- Academia de Ciencias de Cuba (1989)
Atlas Nacional de Cuba
Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografía, Cuba
- Anderson, L. (1988)
Hydrological analysis of basin behaviour from soil moisture data.
Nordic Hydrology, Vol. 19, No 1
- Bergström, S. (1976)
Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments.
SMHI Report No. RHO 7, Norrköping
- Bergström, S. and Sandberg, G. (1983)
Simulation of groundwater response by conceptual models.
Nordic Hydrology, Vol. 14, No 2
- Bhatia, P.K., Bergström, S. and Persson M. (1984)
Application of the distributed HBV-6 model to the upper Narmada basin in India.
SMHI Report No. RHO 35, Norrköping
- Brandt, M., Bergström, S. and Gardelin, M. (1988)
Modelling the effects of clearcutting on runoff -Examples from central Sweden.
Ambio, Vol. 17, No. 5
- Boughton, W. C. (1966)
A mathematical model for relating runoff to rainfall with daily data.
Trans. Inst. Engrs., 7:83, Australia
- Crespo, E. (1984)
Mapa de la lámina de evaporación anual del período 1964-1983.
Instituto de Hidroeconomía, Cuba
- Dawdy, D.R., and O'Donnell, T. (1965)
Mathematical models of catchment behavior.
Proc. ASDE, Journal of Hydraulics Division, HY 4,91:123
- Franco Abreu, J. A. (1988)
Sistema de alarma del Cauto.
Reporte Técnico del Instituto de Hidroeconomía, Cuba
- Häggström, M., Lindström, G., Sandoval, L.A. y Vega, M. E. (1989)
Aplicación del modelo HBV a la cuenca superior del Río Cauca.
SMHI Hidrología, No 24, Norrköping

Häggström, M., Lindström, G., Cobos C., Martínez, J.R., Merlos, L., Dimas Alonso, R., Castillo, G., Sirias, C., Miranda, D., Granados, J., Alfaro, R., Robles, E., Rodríguez, M. and Moscote, R. (1990)

Application of the HBV model for flood forecasting in six Central American rivers.
SMHI Hydrology No. 27, Norrköping

Izquierdo, A. (1984)

Mapa isoyético anual del período 1964-1983
Instituto de Hidroeconomía, Cuba

Johansson, B., Persson, M., Aranibar, E. and Llobet, R. (1987)

Application of the HBV model to Bolivian basins.
SMHI Hydrology, No. 10, Norrköping

Johansson, B., Persson, M., Sandberg, G. and Robles, E. (1985)

Aplicación del modelo HBV a la cuenca del Lago Arenal en Costa Rica.
SMHI, HO 28, Norrköping

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., (1970)

River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles.
Journal of Hydrology, No. 10.

OMM (1986)

Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II. Análisis, Predicciones y otras publicaciones.
OMM No. 168

Planos Gutiérrez, E. (1982)

Diseño de una red hidrológica de explotación en la cuenca del Cauto.
Reporte Técnico del Instituto de Hidroeconomía, Cuba

Planos Gutiérrez, E. (1984)

Aproximación a las características hidrológicas de las cuencas que vierten a los golfos de Guacanayabo y de Ana María.
Reporte Técnico del Instituto de Hidroeconomía, Cuba

WMO (1986)

Intercomparison of models of snowmelt runoff.
WMO, Operational Hydrology Report, No. 23, Geneva

Trusov, I. I., Izquierdo, A., Díaz, L. R. (1983)

Características espaciales y temporales de las precipitaciones atmosféricas en Cuba.
Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geografía, Cuba

APENDICE 1

BASIN: BARAGUA

PARAMETERFILE

VALID DATE: 03-05-1991

TIME: 13:26:06

Nr	Name	Valid from														
1	AREA	1970	1	1	270.00	0.01	0.01	1299.00								
2	ELEV	1970	1	1	384.00	494.00	325.00	150.00								
3	VEG	1970	1	1	1.00	1.00	1.00	1.00								
4	LAKE	1970	1	1	0.00	0.00	0.00	0.00								
5	PELEV	1970	1	1	310.00	180.00	140.00	360.00	140.00	200.00	150.00	500.00	180.00	520.00	1000.00	100.00
					140.00	200.00	160.00	200.00	70.00	0.00	0.00	0.00				
7	QFACT	1970	1	1	0.10	0.01	0.01	0.10	0.10	0.01						
8	CP	1970	1	1	0.00	0.00	0.32	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00
					0.00	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
					0.03	0.12	0.04	0.08	0.00	0.10	0.07	0.00	0.14	0.00	0.00	0.13
					0.14	0.08	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00				
10	CQ	1970	1	1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00						
11	EVAP	1970	1	1	4.30	5.00	5.80	5.80	5.90	5.20	6.10	5.80	5.20	4.80	4.10	3.00
13	PREPL	1970	1	1	14.00	6.00	5.00	5.00	6.00	1.00	17.00	11.00	17.00	5.00	6.00	17.00
					6.00	6.00	1.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
14	PREPC	1970	1	1	1.26	0.95	1.07	1.07	1.01	0.78	0.98	1.03	1.08	1.15	1.20	0.85
					0.86	1.01	0.96	1.12	0.00	0.00	0.00	0.00				
16	SUBQR	1970	1	1	0.00000	1.00000	0.00000	0.00000								
20	PCORR	1970	1	1	1.00000	1.00000	1.10000	1.00000								
27	FC	1970	1	1	150.00000	150.00000	150.00000	200.00000								
28	LP	1970	1	1	50.00000	50.00000	50.00000	100.00000								
29	BETA	1970	1	1	1.50000	1.50000	1.50000	2.00000								
36	PERC	1970	1	1	0.50000	0.50000	0.50000	1.00000								
37	UZL	1970	1	1	5.00000	5.00000	5.00000	10.00000								
38	K0	1970	1	1	0.60000	0.60000	0.60000	0.80000								
39	K1	1970	1	1	0.20000	0.20000	0.20000	0.40000								
40	K2	1970	1	1	0.03000	0.03000	0.03000	0.10000								
43	CEVP	1970	1	1	0.90000	1.00000	1.00000	1.00000								
46	MAXBAS	1970	1	1	1.00000	1.00000	1.00000	2.00000								
49	PATH	1970	1	1	4.00000	3.00000	4.00000	0.00000								
1	AREA	1980	1	1	270.00	0.01	0.01	1267.00								
7	QFACT	1980	1	1	0.10	-1.00	0.01	0.10	0.10	-2.00						
10	CQ	1980	1	1	0.00	0.00	1.00	-1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50
18	QRES	1980	1	1	0.00000	0.00000	0.00000	-1.00000								
44	LAREA	1980	1	1	0.00000	0.00000	0.00000	32.00000								

Figura A.1.1 Lista de parámetros para la aplicación del modelo HBV en la subcuenca Presa Protesta de Baragua.

Figure A.1.1 Parameter list for the Presa Protesta de Baragua application of the HBV model.

Basin: BARAGUA
 Number of stations for precipitation: 20
 Precip. weights Valid date: 03-05-1991
 Time: 13:27:59

Total weights corrected by multiplication with PCORR

Subcatment nr:

Nr Name	1	2	3	4	Total (%)
1 288	0	0	0.30	0.03	2.48
2 442	0	0	0	0.12	9.93
3 488	0.32	0	0	0.04	8.82
4 513	0	0	0	0.08	6.62
5 515	0.22	0	0	0	3.79
6 830	0	0	0	0.10	8.28
7 889	0	0	0	0.07	5.80
8 1111	0	0.40	0.30	0	0.00
9 1206	0	0	0	0.14	11.59
10 1323	0.12	0	0	0	2.06
11 1421	0	0	0	0	0
12 1510	0	0	0	0.13	10.76
13 1511	0	0	0	0.14	11.59
14 1580	0	0	0.40	0.08	6.62
15 1586	0	0.60	0	0	0.00
16 1587	0.34	0	0	0	5.85
17 1626	0	0	0	0.07	5.80
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0

Figura A.1.2 Coeficientes de ponderación (CP) de las estaciones de precipitación en la subcuenca Presa Protesta de Baragua.

Figure A.1.2 Weight coefficients of precipitation stations (CP) for the Baragua application of the model.

BASIN: C.M. CESFEDES

PARAMETERFILE

VALID DATE: 03-05-1991

TIME: 13:33:04

Mr Name Valid from

1	AREA	1970	1	1	417.20													
2	ELEV	1970	1	1	240.00													
3	VEG	1970	1	1	1.00													
5	PELEV	1970	1	1	210.00	310.00	800.00	800.00	160.00									
7	QFACT	1970	1	1	-1.00	-2.00	0.01	0.00										
8	CP	1970	1	1	0.10	0.25	0.25	0.25	0.15									
10	CR	1970	1	1	1.00	-1.00	0.50	0.50	1.00	0.00	0.00	0.00						
11	EVAP	1970	1	1	4.30	5.00	5.80	5.80	5.90	5.20	6.10	5.80	5.20	4.80	4.10	3.00		
13	PREPL	1970	1	1	5.00	1.00	4.00	2.00	2.00									
14	PREPC	1970	1	1	0.96	1.34	1.22	0.95	0.77									
20	PCORR	1970	1	1	1.00000													
27	FC	1970	1	1	200.00000													
28	LP	1970	1	1	70.00000													
29	BETA	1970	1	1	1.20000													
36	PERC	1970	1	1	1.20000													
37	UZL	1970	1	1	5.00000													
38	K0	1970	1	1	0.60000													
39	K1	1970	1	1	0.30000													
40	K2	1970	1	1	0.10000													
43	CEVP	1970	1	1	1.10000													
46	MAXBAS	1970	1	1	1.00000													

Total weights corrected by multiplication with PCORR

Subcatcaent nr:

Mr Name	1	Total (%)
1 263	0.10	10.00
2 288	0.25	25.00
3 1113	0.25	25.00
4 1198	0.25	25.00
5 1579	0.15	15.00

Figura A.1.3. Lista de parámetros para la aplicación del modelo HBV en la subcuenca de la presa Carlos Manuel de Céspedes. Los parámetros CP aparecen en la tabla inferior.

Figure A.1.3. Parameter list for the Presa Carlos Manuel de Céspedes application of the HBV model. The CP parameters are given in the lower table.

BASIN: CAUTO CRISTO

PARAMETERFILE

VALID DATE: 03-05-1991

TIME: 13:30:58

Mr Name Valid from

1	AREA	1970	1	1	560.00	375.00	1601.00										
2	ELEV	1970	1	1	90.00	120.00	70.00										
3	VEG	1970	1	1	1.00	1.00	1.00										
4	LAKE	1970	1	1	0.00	0.00	0.00										
5	PELEV	1970	1	1	310.00	90.00	110.00	80.00	150.00	46.00	160.00	55.00	50.00	180.00	290.00	40.00	
					76.00	70.00	115.00	160.00	70.00								
7	QFACT	1970	1	1	0.01	0.10	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	
					1.00												
8	CP	1970	1	1	0.00	0.05	0.00	0.20	0.05	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	
					0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	
					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	
					0.00	0.00	0.00										
10	CQ	1970	1	1	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
					0.00												
11	EVAP	1970	1	1	4.30	5.10	6.20	6.90	6.10	5.70	6.20	6.10	5.30	4.60	4.20	4.00	
13	PREPL	1970	1	1	16.00	9.00	7.00	17.00	16.00	12.00	11.00	0.00	0.00	17.00	7.00	0.00	
					3.00	0.00	0.00	5.00	0.00								
14	PREPC	1970	1	1	1.29	0.97	0.96	0.98	0.90	1.00	1.05	0.00	0.00	0.95	0.95	0.00	
					0.75	0.00	0.00	1.10	0.00								
16	SUBQR	1970	1	1	2.00000	3.00000	4.00000										
17	QADD	1970	1	1	11.00000	12.00000	0.00000										
19	FELEV	1970	1	1	0.00000												
20	PCORR	1970	1	1	1.00000	1.00000	1.00000										
21	PCALT	1970	1	1	0.00000												
27	FC	1970	1	1	150.00000	150.00000	150.00000										
28	LP	1970	1	1	70.00000	70.00000	70.00000										
29	BETA	1970	1	1	2.00000	2.00000	2.00000										
36	PERC	1970	1	1	1.00000	1.00000	1.00000										
37	UZL	1970	1	1	10.00000	10.00000	10.00000										
38	K0	1970	1	1	0.60000	0.60000	0.60000										
39	K1	1970	1	1	0.30000	0.30000	0.30000										
40	K2	1970	1	1	0.10000	0.10000	0.10000										
43	CEVP	1970	1	1	1.20000	1.20000	1.00000										
44	LAREA	1970	1	1	0.00000												
46	MAXBAS	1970	1	1	2.00000	2.00000	3.00000										
47	BLAG	1970	1	1	1.00000	1.00000	0.00000										
49	PATH	1970	1	1	0.00000	0.00000	0.00000										
50	QRED	1970	1	1	2.00000	3.00000	1.00000										

Figura A.1.4. Lista de parámetros para la aplicación del modelo HBV en la subcuenca de Cauto Cristo.

Figure A.1.4. Parameter list for the Cauto Cristo application of the HBV model.

Basin: CAUTO CRISTO

Number of stations for precipitation: 17

Precip. weights Valid date: 03-05-1991

Time: 13:32:03

Total weights corrected by multiplication with PCORR

Subcatment nr:

Nr Name	1	2	3	Total (%)
1 288	0	0.25	0	3.70
2 295	0.05	0	0	1.10
3 306	0	0	0	0
4 327	0.20	0	0	4.42
5 889	0.05	0.25	0	4.80
6 1013	0	0	0	0
7 1124	0	0	0	0
8 1196	0	0.25	0.40	28.95
9 1197	0.05	0	0	1.10
10 1206	0.05	0	0	1.10
11 1250	0	0	0	0
12 1394	0	0	0	0
13 1405	0	0	0	0
14 1407	0	0	0.60	37.88
15 1508	0	0	0	0
16 1579	0	0.25	0	3.70
17 1626	0.60	0	0	13.25

Figura A.1.5. Coeficientes de ponderación (CP) de las estaciones de precipitación en la subcuenca Cauto Cristo.

Figure A.1.5. Weight coefficients of precipitation stations (CP) for the Cauto Cristo application of the model.

APENDICE 2

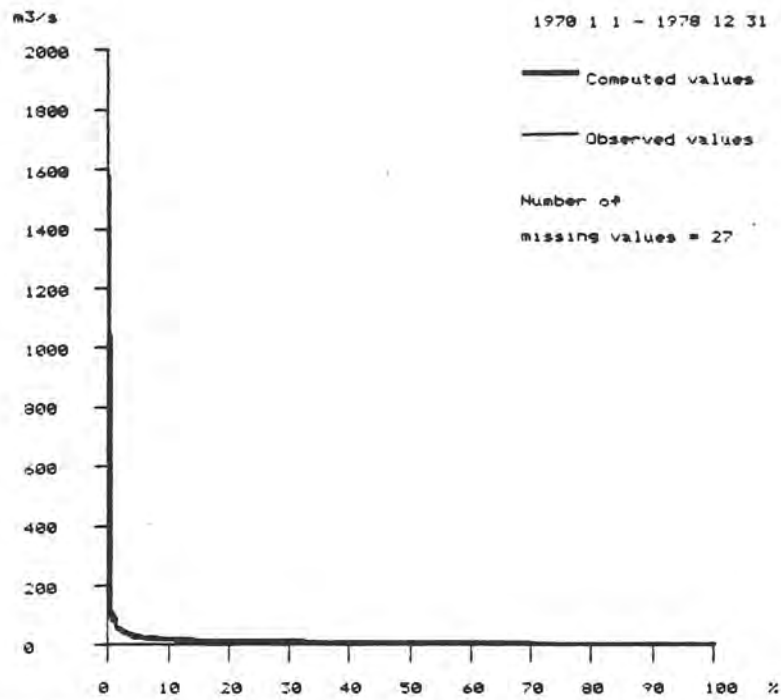


Figura A.2.1. Curva de duración de caudales calculados y registrados en el período 1970-1978 para El Guayabero.

Figure A.2.1. Duration curves 1970-1978 of computed and recorded hydrographs for El Guayabero.

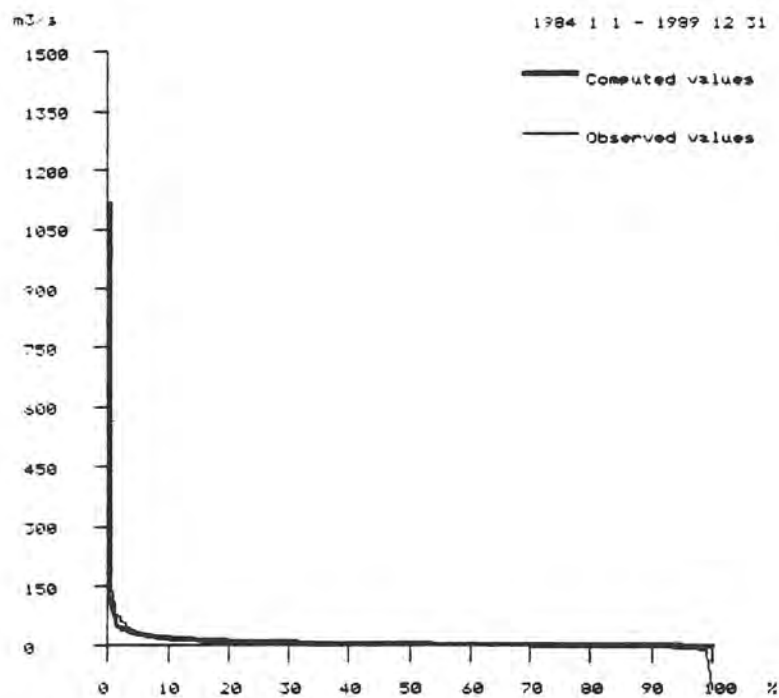


Figura A.2.2. Curva de duración de caudales calculados y registrados en el período 1984-1989 para Baragua.

Figure A.2.2. Duration curves 1984-1989 of computed and recorded hydrographs for Baragua.

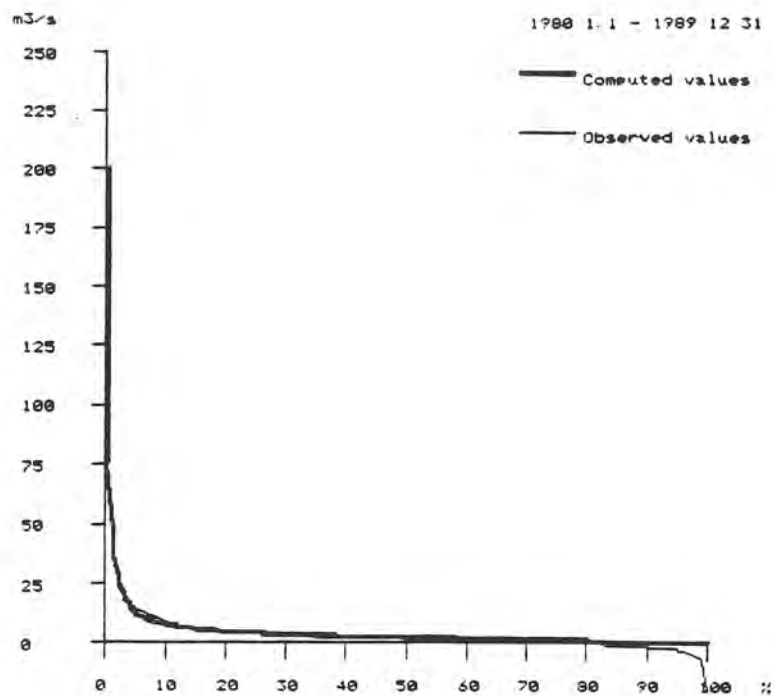


Figura A.2.3. Curva de duración de caudales calculados y registrados en el período 1980-1989 para C. M. Céspedes.

Figure A.2.3. Duration curves 1980-1989 of computed and recorded hydrographs for C. M. Céspedes.

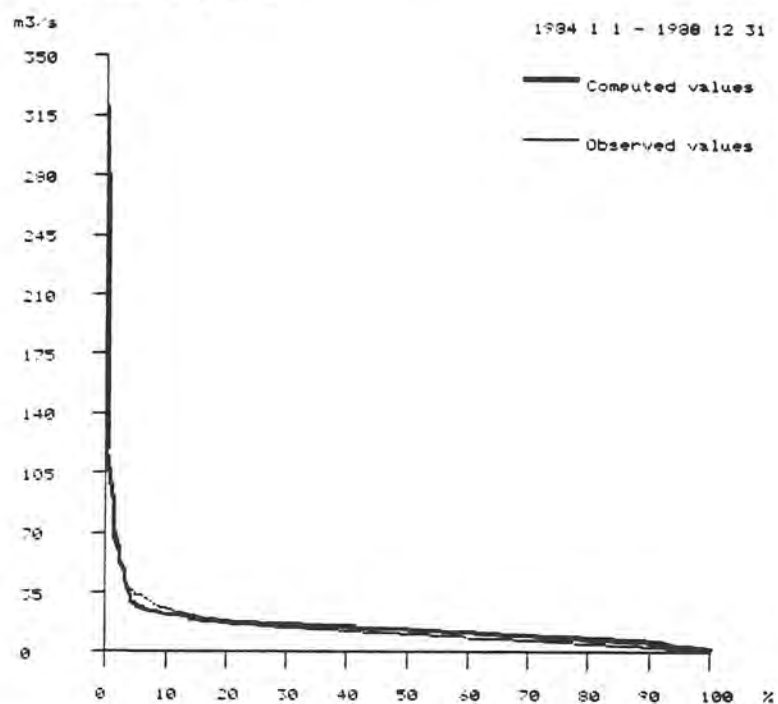


Figura A.2.4. Curva de duración de caudales calculados y registrados en el período 1984-1988 para Cauto Cristo.

Figure A.2.4. Duration curves 1984-1988 of computed and recorded hydrographs for Cauto Cristo.

REPORTES HIDROLÓGICOS

Nr Titel

HYDROLOGISKA RAPPORTER

- 1 Hydrokemiska data från de svenska fältforsknings-
 områdena
 av Bengt Carlsson
 Norrköping 1985

- 2 Utvärdering av 1985 års vårflödesprognoser
 av Martin Häggström och Magnus Persson
 Norrköping 1986

- 3 Riktlinjer och praxis vid dimensionering av utskov och
 dammar i USA. Rapport från en studieresa i oktober
 1985
 av Sten Bergström, Ulf Ehlin, SMHI, och Per-Eric
 Ohlsson, VASO
 Norrköping 1986

- 4 Skåneprojektet - Hydrologisk och Oceanografisk
 information för vattenplanering - ett pilotprojekt
 av Barbro Johansson, Erland Bergstrand och Torbjörn
 Jutman
 Norrköping 1986

- 5 Översiktlig sammanställning av den geografiska
 fördelningen av skador främst på dammar i samband med
 septemberflödet 1985
 av Martin Häggström
 Norrköping 1986

- 6 Vattenföringsberäkningar i Södermanlands län - ett
 försöksprojekt
 av Barbro Johansson
 Norrköping 1986

- 7 Areella snöstudier
 av Maja Brandt
 Norrköping 1986

- 8 PULS-modellen: Struktur och tillämpningar
 av Bengt Carlsson, Sten Bergström, Maja Brandt och
 Göran Lindström
 Norrköping 1987

- 9 Numerisk beräkning av vågor i kraftverksdammar
 av Lennart Funkquist
 Norrköping 1987

- 10 Application of the HBV-Model to Bolivian Basins
 av Barbro Johansson, Magnus Persson, Enrique Aranibar
 och Roberto Llobet
 Norrköping 1987

Nr	Titel
11	Monthly streamflow simulation in Bolivian Basins with a stochastic model av Cecilia Ambjörn, Enrique Aranibar och Roberto Llobet Norrköping 1987
12	De svenska huvudvattendragens namn och mynningspunkter av Kurt Ehlert, Torbjörn Lindkvist och Todor Milanov Norrköping 1987
13	Analys av avrinningsserier för uppskattning av effektivt regn av Göran Lindström Norrköping 1987
14	Modellberäkning av extrem effektiv nederbörd av Maja Brandt, Sten Bergström, Marie Gardelin och Göran Lindström Norrköping 1987
15	Sjökarte- och sjöuppgifter. Register 1987 av Håkan Danielsson och Torbjörn Lindkvist Norrköping 1987
16	Utvärdering av 1986 års vårflödesprognoser av Martin Häggström och Magnus Persson Norrköping 1987
17	Skogsskador - klimat av Bertil Eriksson, Barbro Johansson, Katarina Losjö och Haldo Vedin Norrköping 1987
18	Bestämning av optimalt klimatstationsnät för hydrologiska prognoser av Maja Brandt Norrköping 1987
19	Utvärdering av 1987 års vårflödesprognoser av Martin Häggström och Magnus Persson Norrköping 1988
20	Frysförluster av vatten av Todor Milanov Norrköping 1988

- | Nr | Titel |
|----|---|
| 21 | Application of the HBV model to the upper Río Cauca basin
av Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval och Maria Elvira Vega
Norrköping 1988 |
| 22 | Snökartläggning med satellitdata i Kultsjöns avrinningsområde
av Mats Moberg och Ma'ia Brandt
Norrköping 1988 |
| 23 | Hydrologiskt stationsnät
Svenskt Vattenarkiv
av Martin Gotthardsson och Sten Lindell
Norrköping 1989 |
| 24 | Aplicacion del modelo HBV a la cuenca superior del Río Cauca
av Martin Häggström, Göran Lindström, Luz Amelia Sandoval, Maria Elvira Vega
Norrköping 1989 |
| 25 | Svåra islossningar i Torneälven. Förslag till skadeförebyggande åtgärder
av Gun Zachrisson
Norrköping 1989 |
| 26 | Anpassning av HBV-modellen till Torneälven
av Martin Häggström
Norrköping 1989 |
| 27 | Application of the HBV model to six Centralamerican rivers
av Martin Häggström och Göran Lindström
Norrköping 1990 |
| 28 | Parametervärden för HBV-modellen i Sverige
Erfarenheter från modellkalibreringar under perioden 1975 - 1989
av Sten Bergström
Norrköping 1990 |
| 29 | Spridningsstudier i Glan
av Urban Svensson och Ingemar Holmström
Norrköping 1990 |
| 30 | Analys av avrinningens trender i Sverige
av Torbjörn Jutman
Norrköping 1991 |
| 31 | Aplicacion del modelo HBV a la cuenca del Río Cauto en Cuba
av Mercedes Rodriguez, Barbro Johansson, Göran Lindström, Eduardo Planos och Alfredo Remont
Norrköping 1991 |



Instituto Nacional Meteorológico e Hidrológico de Suecia
S-601 76 Norrköping, Suecia. Tel. + 46 11 15 80 00. Telex 64400 smhi s.