

Modelación hidrológica y de la gestión hidráulica en el sistema automático de información hidrológica: modelos PLU y CREM

ANGEL LUIS ALDANA VALVERDE (*); FEDERICO ESTRADA LORENZO (**); FRANCISCO CABEZAS CALVO-RUBIO (***)

RESUMEN En este artículo se presentan el modelo PLU, para la representación espacial de la evolución de tormentas sobre una cuenca y estimación de histogramas de precipitación areal, y el modelo CREM, para la previsión y gestión de crecidas en embalses. Estos modelos han sido desarrollados conjuntamente por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y la Confederación Hidrográfica del Segura en el marco de un Convenio con la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Han sido distribuidos a todas las confederaciones hidrográficas y en la actualidad se encuentran operativos en las cuencas del Segura y del Sur de España, en conexión, respectivamente, con el sistema SAIH-Segura y con la red HIDROSUR. Ello ha permitido su empleo, recientemente, en situaciones reales de avenidas en la cuenca del Sur de España, donde ambos modelos se han mostrado especialmente útiles.

HYDROLOGICAL AND HYDRAULIC ADMINISTRATION MODELLING IN THE AUTOMATIC HYDROLOGICAL INFORMATION SYSTEM: PLU AND CREM MODELS

ABSTRACT This article presents the PLU model for the spatial representation of the evolution of storms over a basin and an estimation of area precipitation hystographs, and the CREM model for forecasting and administering high waters in reservoirs. These models have been jointly developed by the Centre of Hydrographic Studies of the CEDEX and the Hydrographic Confederation of the River Segura, within the framework of an Agreement with the Hydraulic Works and Water Quality Administration. They have been distributed to all the hydrographic confederations and are currently operational in the Segura and South of Spain basins, in conjunction with the SAIH-Segura system and the HIDROSUR network respectively. This has permitted their use recently in real flood situations in the South of Spain basin, where both models proved particularly useful.

Palabras clave: Tiempo real; Previsión; Gestión de crecidas.

1. INTRODUCCIÓN

Se presentan en este artículo los modelos PLU y CREM, desarrollados de forma conjunta por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y la Confederación Hidrográfica del Segura en el marco de un Convenio con la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Ambos modelos forman parte de un amplio proyecto cuyo objetivo es la creación e instalación operativa de una biblioteca básica de modelos hidrológicos y de gestión hidráulica para su utiliza-

ción en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)⁽¹⁾.

En líneas generales, el modelo PLU (Procesador de Lluvias) permite disponer de una representación espacial de la evolución temporal de una tormenta sobre una cuenca hidrográfica y de la estimación de los histogramas de precipitación areal en aquellas subcuencas que se consideren de interés. Por su parte, el modelo CREM (Crecidas en Embalses) tiene como objetivo facilitar la toma de decisiones en la operación de los órganos de desagüe de un embalse en situación de crecida.

Las primeras versiones de los modelos fueron distribuidas en 1994 a las diversas confederaciones hidrográficas. Actualmente se encuentran operativos en las cuencas del

[*] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de Programa del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. (M^o de Fomento).

[**] Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Técnico del Programa de Recursos Hidráulicos del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. (M^o de Fomento).

[***] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Subdirector General de Planificación Hidrológica. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas.

(1) En este Proyecto han participado, además de los autores de este artículo, Teodoro Estrella Monreal, del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y Javier Ferrer Polo, de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Segura y del Sur de España, en conexión, respectivamente, con el sistema SAIH-Segura y con la red HIDROSUR, lo que ha permitido su empleo, recientemente, en situaciones reales de avenidas (Aldana et al. 1996).

Desde el punto de vista de la modelación, el desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo de acuerdo con los siguientes planteamientos básicos (Perrer y Estrada, 1995):

- Utilidad inmediata de las aplicaciones informáticas, escalando las posteriores mejoras mediante sucesivas versiones que incluyeran nuevas opciones.
- Difusión de los aspectos teóricos y prácticos de las aplicaciones informáticas desarrolladas, mediante la elaboración de manuales de uso y la realización de cursos de formación con participación de los técnicos del SAIH de las distintas confederaciones hidrográficas².
- Utilización de herramientas gráficas en el desarrollo de las aplicaciones informáticas que hicieran su empleo sencillo y amigable para el usuario.
- Uniformidad en cuanto a bases teóricas, hardware y software, con objeto de posibilitar la coordinación de futuros trabajos y la transferencia de la experiencia adquirida por los distintos usuarios en el análisis de episodios reales de crecidas.

La aplicabilidad de los modelos en el conjunto de los SAIH ha condicionado el diseño del software y la elección del hardware y del modo de funcionamiento. La enorme variedad de soluciones informáticas existentes en el mercado, reflejada en la consiguiente falta de uniformidad existente en los distintos SAIH, contrasta con la elevada compatibilidad conseguida en el entorno de los ordenadores personales (PC). Este hecho ha conducido a adoptar un software desarrollado en dicho entorno con la información almacenada en ficheros ASCII.

La utilización en tiempo real en cada uno de los SAIH solo requiere la conexión del PC dedicado a la ejecución de las aplicaciones con el ordenador que gestiona los datos en tiempo real procedentes de los sensores, permitiendo la transferencia periódica de ficheros ASCII con la evolución temporal del episodio.

2. ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

El conjunto de información empleada por los modelos se organiza mediante una estructura de directorios lo suficientemente flexible como para ser aplicada en la generalidad de los casos. Un fichero de configuración general controla dicha estructura, permitiendo al usuario definir los nombres asignados a los directorios básicos en los que se encuentran tanto los propios programas como los datos. Estos datos se almacenan en los siguientes tipos de ficheros:

- Fichero de episodio: almacena la información sobre la evolución temporal del episodio hidrológico. Está asociado al instante de la previsión y recoge los datos recibidos por los sensores de la red SAIH en un cierto número de perio-

dos de tiempo pasado: series temporales de lluvia en pluviómetros y niveles y caudales desaguados en embalses.

- Ficheros vectoriales con la divisoria y red fluvial de la cuenca, así como las divisorias de las distintas subcuencas analizadas.
- Fichero de características hidrológicas de las distintas subcuencas vertientes a embalses donde se desea realizar una previsión hidrológica de crecidas. Los datos incluidos se refieren a la superficie de la cuenca vertiente y al hidrograma unitario característico de dicha subcuenca.
- Fichero con las características de los embalses en los que desea estudiar la gestión óptima de sus órganos de desagüe. La información correspondiente a cada embalse se refiere a su curva batimétrica y a los valores mínimo y máximo de capacidad de desagüe para cada nivel de lámina de agua.

3. MODELO PLU (PROCESADOR DE LLUVIAS)

3.1. OBJETIVOS

Este modelo permite disponer de una representación espacial de la evolución temporal de una tormenta sobre la cuenca hidrográfica y estimar los histogramas de precipitación areal en una serie de subcuencas previamente seleccionadas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Confederación Hidrográfica del Segura, 1996a).

Para lograr estos objetivos, la aplicación parte de la información captada por la red pluviométrica del SAIH y a partir de ella realiza una interpolación que permite generar la malla de precipitaciones en la cuenca y representar gráficamente las correspondientes isoyetas. El cálculo puede realizarse para diversos intervalos de tiempo, lo que permite conocer la evolución temporal de la tormenta en la cuenca. También realiza el cálculo de las precipitaciones areales en aquellas subcuencas cuyos límites se hayan definido previamente. Para ello se integran las mallas de precipitación correspondientes a los diversos intervalos considerados, obteniendo los histogramas resultantes en cada una de las subcuencas y su representación gráfica.

3.2. DATOS BÁSICOS

La aplicación requiere para su ejecución, básicamente, la siguiente información:

- Datos suministrados por la red pluviométrica SAIH correspondientes a un determinado episodio, que incluyen el identificador de la estación, sus coordenadas UTM y la secuencia temporal de precipitaciones. Esta información constituye parte del denominada fichero de episodio.
- Divisoria de la cuenca hidrográfica y de su red fluvial. Esta información viene determinada por las coordenadas UTM de los vértices de la poligonal de la cuenca y de las líneas que constituyen la red fluvial.
- Divisorias de las subcuencas seleccionadas para el cálculo de los histogramas de precipitación areal. Esta información viene determinada por las coordenadas UTM de los vértices que constituyen las poligonales de las subcuencas.

3.3. FUNDAMENTOS

3.3.1. Interpolación de precipitaciones

El procesador PLU, a partir de la información captada por la red pluviométrica del SAIH para un instante de tiempo, realiza una interpolación que permite generar la malla de

(2) De acuerdo con este planteamiento, en febrero de 1994 y en junio de 1996 se celebraron, en el Centro de Estudios Hidrográficos, sendos cursos sobre Empleo de modelos hidrológicos y de gestión hidráulica en el SAIH, con participación de todas las confederaciones hidrográficas, Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Junta de Aguas de Cataluña e Instituto Nacional de Meteorología.

precipitaciones en la cuenca y representar gráficamente las correspondientes isoyetas.

Entre los diferentes métodos de interpolación existentes se ha seleccionado el inverso de la distancia elevado a un exponente, cuyos fundamentos se describen a continuación:

- Se asume que la precipitación en cualquier punto (x, y) interior de la cuenca sin estación de medida, se puede determinar a partir de los valores de precipitación en las N estaciones situadas en las cercanías de ese punto.
- La precipitación en el punto designado (x, y) es proporcional a la precipitación en las N estaciones de medida e inversamente proporcional a las distancias, elevadas a un exponente, entre el punto de cálculo y aquellas. Por tanto, la precipitación P en cualquier punto (x, y) se puede expresar como:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i / D_i^a)}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i^a}}$$

donde

P : precipitación en el punto (x, y).

P_i : precipitación media en i.

D_i : distancia entre el punto (x, y) y la estación de medida i.

N : número de estaciones de medida utilizadas para la determinación de la precipitación en el punto (x, y).

a : exponente al cual se eleva la distancia D_i.

- Se admite limitar la búsqueda de pluviómetros a un círculo de radio determinado.

3.3.2. Cálculo de precipitaciones areales

La aplicación PLU, a partir de los resultados obtenidos en la fase de interpolación, realiza el cálculo de precipitaciones areales, para los intervalos de tiempo seleccionados, en aquellas subcuencas cuyos límites se hayan definido previamente. Para ello integra las mallas de precipitación correspondientes a esos intervalos y obtiene los histogramas resultantes de cada subcuenca y los representa gráficamente.

Los fundamentos del método de cálculo son los siguientes:

- Se define una malla de mejor resolución que la utilizada para la interpolación de precipitaciones, de manera que englobe a todas las subcuencas seleccionadas.
- Se determinan las celdas interiores en cada subcuenca.
- Para cada subcuenca se realiza la integración de lluvias interiores a la poligonal que la define, para cada intervalo del episodio, proporcionando los resultados en un fichero en formato ASCII tanto en mm como en hm³.

Como resultados se muestran los histogramas de lluvias areales y los valores acumulados para cada subcuenca (en mm y en hm³).

La aplicación permite construir una escala cromática, para la visualización de las mallas, fijando los extremos con los valores máximos y mínimos de lo que en el momento se muestre en pantalla. Se puede elegir además entre un escalado fijo independiente del episodio y un escalado dado por los valores extremos encontrados en el episodio. En cualquier momento se puede avanzar o retroceder por los intervalos calculados, o acceder directamente a las primeras o úl-

timas mallas, presionando las teclas "AvPág", "RePág", "Inicio" o "Fin", respectivamente.

3.3.3. Interpoladores utilizables desde la aplicación

La aplicación dispone de la posibilidad de utilizar algunos de los módulos del paquete de programas SURFER, pero además se incluye un interpolador propio, basado en la técnica de la inversa de la distancia elevada a un exponente, con las siguientes características:

- Permite la introducción de cualquier exponente mayor que uno.
- Admite como variable el número máximo de pluviómetros a usar en la interpolación.
- Se marca un radio de búsqueda de pluviómetros para cada celda. Esto se toma como condición restrictiva de forma que se opera calculando en función de los pluviómetros interiores más próximos sin superar en número el valor al que se refiere el punto anterior. En el caso de no encontrarse para una determinada celda ningún pluviómetro dentro del círculo de dicho radio, se le asigna la precipitación en el pluviómetro más cercano, con lo que queda solventada la limitación de SURFER a este respecto.
- Se crea una máscara de cálculo de forma que no calcula en celdas exteriores a la cuenca, asignando a las celdas exteriores el valor nulo, aunque sí utiliza pluviómetros exteriores a esta poligonal cerrada, con lo que se salva otra de las limitaciones del empleo de SURFER. Esto proporciona tiempos de ejecución más breves y mejoras en la visualización de resultados.

3.3.4. Funcionamiento en modo incremental

Cada vez que se elige la opción de arrancar con nuevos datos, la aplicación comprueba si los nuevos datos aportados incluyen los utilizados en los cálculos anteriores, en cuyo caso se ofrece la opción de no recalcular, con lo que solo se realizan cálculos con los nuevos datos aportados. Este modo de cálculo incremental es especialmente útil cuando se usa la aplicación en tiempo real.

3.4. USO Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN

El uso de la aplicación es totalmente interactivo y se ha simplificado al máximo con objeto de que pueda ser llevado a cabo por personal no habituado al trabajo con ordenadores. Basta con ir seleccionando opciones, pulsando teclas, dentro de unas posibilidades que la misma aplicación ofrece, por lo que el usuario no necesita memorizar comandos ni instrucciones concretas para manejar la aplicación.

La aplicación PLU proporciona salidas de resultados gráficas y numéricas. En la figura 1 se muestra un ejemplo de evolución de un episodio lluvioso sobre la cuenca del Sur, en el cual se observa cómo se desplaza el núcleo de la tormenta con el paso del tiempo.

En la figura 2 se muestran las isoyetas de precipitación acumulada en los intervalos seleccionados, así como el valor de la precipitación areal en la cuenca hidrográfica.

Finalmente, en la figura 3 se representan gráficamente los histogramas de precipitación areal en cada una de las subcuencas, previamente seleccionadas, obtenidos por integración, en cada una de las áreas receptoras, de las mallas de precipitaciones representadas en la figura 1. Estos gráficos admiten zoom y desplazamiento, lo que amplía las posibilidades de visualización (figura 4), y son acompañados de los valores acumulados en mm y hm³.

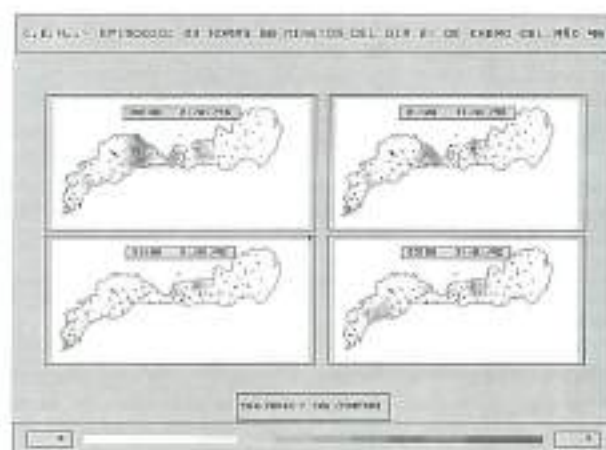


FIGURA 1. Evolución de mapas de precipitación en la cuenca del Sur.

El gráfico de la figura 3 se completa con una salida numérica que, para cada una de las subcuencas vertientes a un punto de control, proporciona la precipitación areal (en milímetros y en hm^3) en cada uno de los intervalos de tiempo considerados.

4. MODELO CREM PARA LA PREVISIÓN Y GESTIÓN DE CRECIDAS EN EMBALSES

4.1. OBJETIVOS

El principal objetivo del modelo CREM es facilitar la toma de decisiones en la operación de los órganos de desagüe de un embalse en situación de crecida. Puede operar indistintamente en conexión con el sistema de adquisición de datos en tiempo real o mediante la introducción manual de los datos recibidos del operador que se encuentra en el embalse (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Confederación Hidrográfica del Segura, 1996b).

Las finalidades que cumple están íntimamente relacionadas con las fases de su utilización, que pueden resumirse en dos: previsión de caudales entrantes al embalse y búsqueda de la gestión óptima de los órganos de desagüe. La fase de previsión puede a su vez subdividirse en dos: la

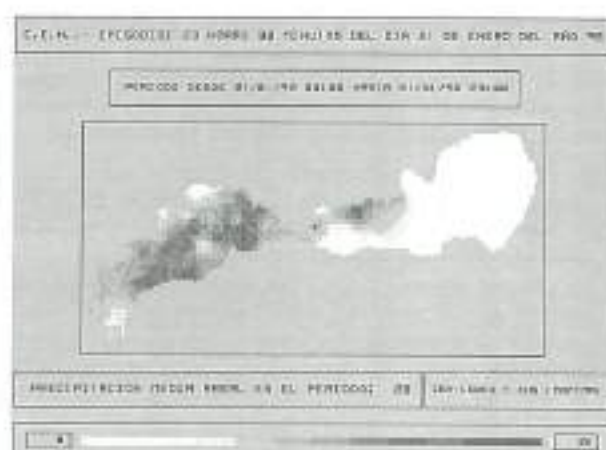


FIGURA 2. Precipitación acumulada en un episodio.

de análisis del episodio pasado y la del cálculo de caudales futuros.

4.2. DATOS BÁSICOS

El modelo utiliza los datos de evolución del embalse y, como importante información adicional, aunque no imprescindible, el hietograma de precipitación areal estimado en la cuenca vertiente al embalse. Con esta información el modelo realiza una previsión del caudal de entrada al embalse por métodos hidrológicos, que requieren el conocimiento del hidrograma unitario característico de la cuenca. Una vez determinadas las futuras entradas al embalse, y teniendo en cuenta su batimetría y sus capacidades de desagüe, el modelo obtiene la operación óptima de los órganos de desagüe a lo largo del horizonte de previsión.

En resumen, la información que el modelo requiere para su ejecución es la siguiente:

- Evolución temporal de la crecida en el embalse en cuanto a niveles de agua y caudales desagüados que hayan sido registrados por la red de sensores del SAIH o por cualquier otro medio de adquisición de datos.
- Características del embalse, que comprenden, para cada cota de embalse, el volumen embalsado y el rango posible

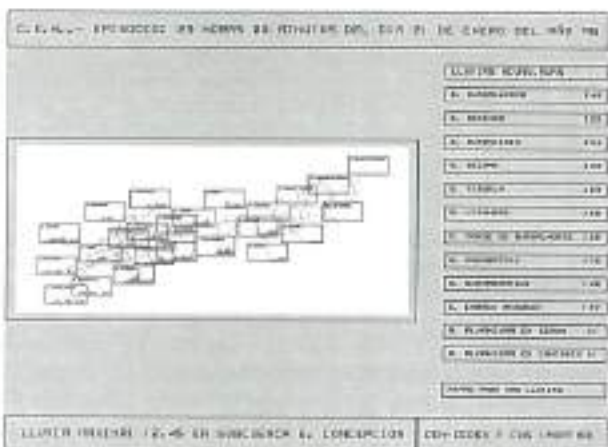


FIGURA 3. Gráficos de precipitación areales en subcuencas.

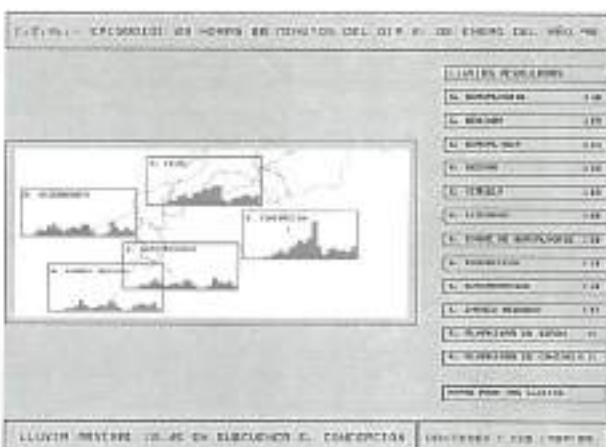


FIGURA 4. Ampliación de gráficos de la figura 3.

de sus vertidos por los órganos de desagüe, especificado por el caudal mínimo y máximo. También incluye el desembalse máximo objetivo, el nivel de embalse máximo objetivo y el volumen objetivo al final de la crecida que son utilizados en el proceso de optimización.

- Características hidrológicas de la cuenca vertiente al embalse, que incluyen su superficie y su hidrograma unitario.
- En el caso de disponer de la estimación del hietograma de precipitación areal en la cuenca vertiente al embalse esta información podrá ser utilizada en la previsión hidrológica. El hietograma se supone obtenido a través del modelo PLU.

4.3. FUNDAMENTOS

4.3.1. Esquema de la previsión.

La previsión hidrológica de caudales que realiza el modelo CREM se desarrolla en las siguientes etapas (figura 5):

- Estimación del hietograma neto sobre la cuenca anterior al tiempo en el que se está realizando la previsión (t_0).
- Realización de hipótesis sobre las lluvias netas futuras y por tanto posteriores al tiempo actual t_0 .
- Aplicación del método del hidrograma unitario para obtener el hidrograma resultante del hietograma neto obtenido en a) y b).
- Reajuste del hidrograma resultante a la vista del hidrograma de entrada al embalse realmente observado.

Es evidente que si se desean previsiones a largo plazo, las lluvias futuras consideradas en la fase b) tendrán una gran incidencia, lo que no sucederá en una previsión a corto plazo en la que es predominante la inercia de la cuenca y por tanto las lluvias pasadas estimadas en la fase a).

El horizonte de previsión adoptado en la aplicación CREM coincide con la duración de la fase creciente del hidrograma unitario considerado u , empleando la nomenclatura habitual, su tiempo de punta (T_p).

Los caudales obtenidos en el intervalo $[t_0, t_0 + T_p/2]$, estarán poco afectados por la lluvia futura adoptada en la fase b) y la sencilla hipótesis de lluvia nula conduce a resultados aceptables, aunque generalmente del lado de la inseguridad. Sin embargo, los caudales calculados en el intervalo $[t_0 + T_p/2, t_0 + T_p]$ estarán fundamentalmente determinados por la hipótesis de lluvia futura adoptada en el intervalo $[t_0, t_0 + T_p/2]$. Es decir, un horizonte de previsión superior a $T_p/2$ requerirá una buena hipótesis de lluvia futura, que, por el contrario, no será transcendente con un horizonte temporal inferior a $T_p/2$.

El reajuste del hidrograma realizado en d) evita la discontinuidad existente en el tiempo t_0 entre el caudal observado y el calculado en la fase c) y consigue una suave transición a partir de ese instante. El procedimiento adoptado consiste en reemplazar el hidrograma calculado por el observado, para un tiempo anterior a t_0 y repartir linealmente en el intervalo $[t_0, t_0 + T_p]$ la diferencia observada en t_0 entre el caudal observado y el calculado. De este modo el hidrograma "reajustado" coincide con el observado en t_0 y con el calculado en $t_0 + T_p$.

4.3.2. Estimación del hietograma neto anterior al tiempo de previsión

Se describen a continuación, de forma muy breve, los métodos disponibles en el modelo para realizar la estimación de la lluvia neta anterior al instante t_0 : directo, inverso, mixto y opción de usuario.

Método directo. Es el método habitual que emplea la simulación hidrológica lluvia-escurrentía en la forma tradicio-

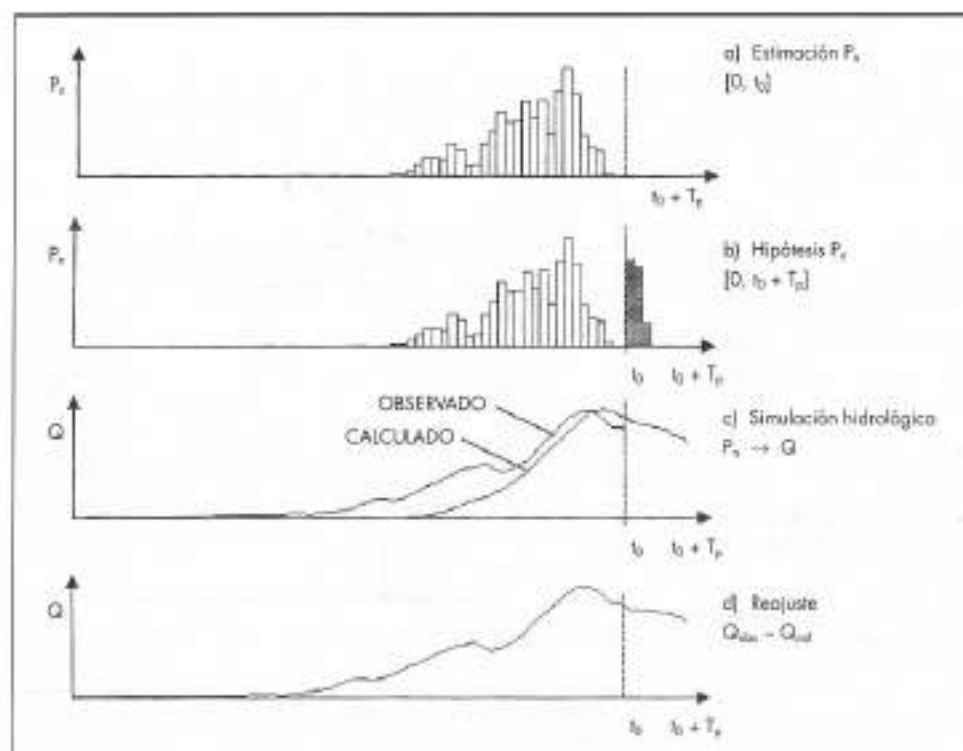


FIGURA 5. Etapas de la previsión hidrológica.

nal, obteniendo el parámetro umbral de escurrimiento (Soil Conservation Service, 1972) mediante calibración automática. Esta calibración emplea una función objetivo que busca un buen acuerdo en valor absoluto entre caudales observados y calculados, siendo conocidos el hietograma areal y el hidrograma unitario de la cuenca.

Método inverso. En el método directo, la lluvia neta, considerada como aquella parte de la lluvia que provoca escurrimiento superficial, se suele obtener mediante una determinada ley de pérdidas a partir de la lluvia total. No obstante, dado que es un concepto que no admite medida real, también pueden obtenerse por deconvolución aquellas lluvias que deberían producirse para que, aplicando el método del hidrograma unitario, se obtenga el hidrograma realmente observado. Esta es la esencia del denominado método inverso, que permite estimar las lluvias netas sin necesidad de disponer de datos fiables de lluvias sobre la cuenca. El problema inverso no tiene una solución única, por lo que se plantea un problema de programación lineal que obtiene el hietograma neto que minimiza las diferencias entre caudales calculados y observados, en valor absoluto, asumiendo como restricciones las resultantes del método del hidrograma unitario.

Método mixto. El análisis de los resultados obtenidos con el método inverso anteriormente expuesto muestran una cierta inestabilidad en la estimación de la lluvia neta en el período inmediatamente anterior al tiempo de inicio de la previsión t_p . Por este motivo, en el método mismo sólo se utilizan las lluvias netas obtenidas por deconvolución en instantes anteriores al tiempo $t_p - T_p$, empleándose para tiempos posteriores unos valores estimados por el método directo.

Opción de Usuario. Por último, en aquellos casos en que las lluvias netas obtenidas por las tres opciones anteriores no consigan una adecuada reproducción del hidrograma observado, el modelo dispone de la opción de usuario. En este caso, es el propio usuario el que puede modificar manualmente el hietograma neto pasado, permitiendo visualizar conjuntamente el hidrograma resultante de la hipótesis adoptada.

4.3.3. Obtención de hietogramas e hidrogramas futuros

Una vez obtenido, por alguno de los cuatro métodos descritos, el hietograma neto para instantes anteriores al actual en que se realiza la previsión, con la correspondiente calibración de los parámetros de escurrimiento, el usuario debe establecer las hipótesis sobre la previsión de lluvias futuras. Estas lluvias futuras se introducen de forma gráfica, visualizando simultáneamente los hietogramas neto y bruto y los hidrogramas observado y reajustado. Se pueden realizar todas las hipótesis de lluvia que se estimen convenientes y almacenar los hidrogramas resultantes para ser empleados como entrada al problema de la gestión óptima del embalse.

4.3.4. Gestión óptima del embalse

4.3.4.1. Formulación del problema

En una situación de crecida, los caudales que entran al embalse experimentan súbitos aumentos y pueden dar lugar a dos situaciones indeseables y peligrosas:

- Que el nivel de embalse supere cierto valor máximo, que usualmente coincide con el de coronación de la presa. Si ésta es de materiales sueltos, el vertido por coronación podría suponer incluso la ruina total de la obra, con la generación de una devastadora onda que se propagaría hacia aguas abajo.

- Que el caudal de salida del embalse supere cierto valor máximo. Este valor es aquél que origina daños significativos en el cauce aguas abajo (por ejemplo, nivel de desbordamiento en una población ribereña).

El problema de la explotación de un embalse en situación de crecida es el de la programación de los desagües (válvulas y compuertas) a lo largo del tiempo, de tal manera que se eviten los efectos indeseables anteriormente descritos y se economice el recurso disponible al final del episodio.

Formalmente, el problema puede plantearse como sigue (Cabezas, 1992):

El horizonte de cálculo T se divide en $N-1$ intervalos temporales, (figura 6) lo que da lugar a N valores instantáneos de

q_e caudales de entrada

q_s caudales de salida

v_i volumen embalsado

h_i nivel de embalse

siendo $i = 1, 2, \dots, N$

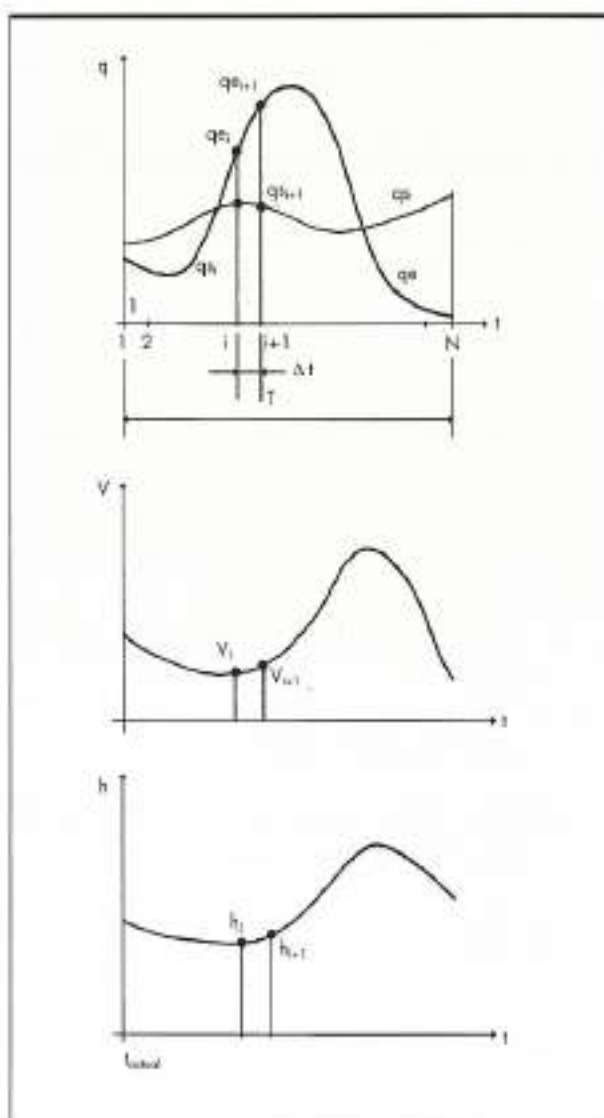


FIGURA 6. Evolución de caudales, volumen de embalse y nivel en el horizonte de cálculo.

De estos $4N$ valores se conocen tanto el hidrograma de entrada al embalse q_{ei} ($i = 1, \dots, N$), como la situación inicial v_1 , h_1 y qs_1 (momento actual).

Por otra parte, se conocen las relaciones funcionales de los desagües, que proporcionan el máximo y mínimo desembalsables para un cierto nivel h , y se conocen el nivel de embalse máximo deseable, el caudal de salida máximo deseable y el volumen objetivo al final del episodio ($h_{\max}$, $qs_{\max}$ y v_{obj}).

Las ecuaciones básicas que gobiernan el proceso (Chow et al. 1988) pueden expresarse por:

Continuidad:

$$\frac{q_{ei} + q_{ei+1}}{2} - \frac{qs_i + qs_{i+1}}{2} = \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t}$$

$$(i = 1, 2, \dots, N-1)$$

Máximo desembalse:

$$qs_i \leq q_{\max}(h_i)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

Mínimo desembalse:

$$qs_i \geq q_{\min}(h_i)$$

$$(i = 1, 2, \dots, N)$$

El problema consiste en encontrar la explotación óptima del embalse, entendiendo por tal el conjunto de caudales de salida qs_i ($i=2, \dots, N$) tal que se minimiza la siguiente función de coste:

$$C = c_1 + c_2 + c_3 + c_4$$

siendo los costes parciales los siguientes:

c1 Coste asociado al vertido por coronación. Puede adoptar dos formas:

$$c_1 = a_1 \sum_{i=1}^N \max(0, h_i - h_{\max})$$

$$c_1 = a_1 \max(0, \max_{i=1}^N(h_i) - h_{\max})$$

La primera forma considera la acumulación de excesos sobre coronación, mientras que la segunda atiende sólo al máximo exceso. Se intenta con ello posibilitar la modelación de situaciones en las que la persistencia de un vertido reducido es más grave que el que éste sea corto pero elevado, y viceversa.

c2 Coste asociado a la superación de un caudal de salida máximo. Como antes, y por análogas razones, este coste podría adoptar dos formas:

$$c_2 = a_2 \sum_{i=1}^N \max(0, qs_i - qs_{\max})$$

$$c_2 = a_2 \max(0, \max_{i=1}^N(qs_i) - qs_{\max})$$

c3 Coste asociado al despilfarro de agua:

$$c_3 = a_3 \max(0, v_{\text{obj}} - v_N)$$

La introducción de este coste pretende conseguir que al final del episodio se disponga del máximo posible de agua retenida en el embalse y no se hayan producido desagües innecesarios.

c4 Coste asociado a las oscilaciones del embalse:

$$c_4 = a_4 \sum_{i=1}^N \text{abs}(qs_{i+1} - qs_i)$$

con lo que se pretende conseguir que, a igualdad de las restantes condiciones, se favorezca un desembalse lo más aliado posible, eliminando las oscilaciones bruscas.

Los coeficientes a_1 , a_2 , a_3 y a_4 permiten ponderar relativamente la importancia que se concede a cada uno de los cuatro factores de coste. En general, sus valores serán tales que se procurará, en primer lugar, no verter por coronación sea la mínima posible. Tras ello debe procurarse que los caudales de salida no excedan en ningún caso el caudal máximo admisible, y si es inevitable, que lo hagan en la menor magnitud posible. Tras ello debe procurarse que el agua embalsada al final del proceso sea la mayor posible, y, tras ello, que el desembalse sea la más suave posible. Usualmente, por tanto, los costes parciales cumplirán la siguiente relación: $c_1 \gg c_2 \gg c_3 \gg c_4$.

4.3.4.2. Resolución del problema.

El problema formulado presenta ciertas dificultades para su linealización y consiguiente resolución mediante alguna técnica de programación lineal. Así, por ejemplo, las relaciones funcionales que definen la batimetría y las funciones de desagüe son no lineales, si bien susceptibles de ser linealizadas mediante poligonales rectilíneas. Además, la función objetivo es no analítica, requiriendo el establecimiento de umbrales y la determinación de máximos y valores absolutos, junto con la introducción de truncamientos numéricos que permitan la superposición sin mezcla de los costes.

Par obviar estas dificultades se ha recurrido a una codificación no lineal del problema, empleando para su resolución el algoritmo simplex de Nelder y Mead en la formulación de la rutina AMOEBA (Vetterling et al., 1988). Este procedimiento presenta el inconveniente de que, aun escogiendo el conjunto simplex inicial de forma que se procure recorrer diversamente el espacio factible, no existe la seguridad de que el óptimo local obtenido sea, a su vez, un óptimo global.

4.4. LIMITACIONES DEL MODELO

Las principales limitaciones del modelo provienen de las hipótesis asumidas en la metodología adoptada en la simulación hidrológica lluvia-escurritia y en la formulación de la función objetivo que describe la gestión óptima de los órganos de desagüe. En particular, se asumen las siguientes hipótesis:

- Consideración de la cuenca vertiente al embalse como cuenca unitaria, lo que plantea limitaciones en el caso de importantes heterogeneidades espaciales en las características de escurritia o en la distribución espacial de la lluvia.
- Aplicabilidad del método del hidrograma unitario, lo que limita el tamaño de la cuenca hasta unos 2000-2500 km² (Viessman, 1989).
- Escasa importancia del flujo base de origen subterráneo en el desarrollo de la crecida, lo que reduce la aplicabilidad en crecidas de pequeña magnitud y ríos con importante acuífero.
- Utilización del algoritmo simplex de Nelder y Mead en la resolución del problema de optimización, procedimiento que no garantiza que el óptimo local obtenido sea, a su vez, un óptimo global.

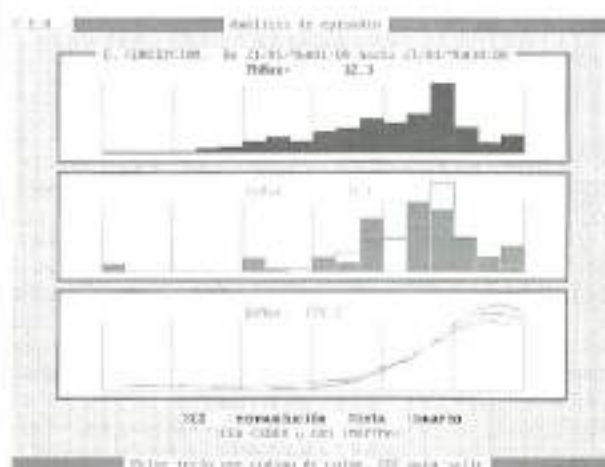


FIGURA 7. Opciones de simulación de análisis de episodio pasado.

4.5. USO Y RESULTADOS DE LA APLICACIÓN

Del mismo modo que la aplicación PLU, CREM ha sido concebida de modo que su utilización sea fácil y cómoda para el usuario.

En la fase de análisis del episodio, el usuario puede elegir el modelo de simulación que considere se ajusta mejor a la realidad, aprovechando las posibilidades de autocalibración o, prescindiendo de ésta, especificando los parámetros de escurrimiento que estime acertados (figura 7).

Ofrece la posibilidad de realizar cuantas hipótesis de lluvia futura considere oportunas, definiendo éstas de forma interactiva, visualizando simultáneamente lluvias y caudales calculados (figura 8).

En la fase de búsqueda de la gestión óptima pueden considerarse todas las hipótesis de lluvia futura con sus correspondientes hidrogramas de entrada. Es también posible cambiar los objetivos de explotación prefijados, la ponderación de cada sumando de la función objetivo (en una escala de pesos de 0 a 1000), e incluso las variantes de sumando que puedan elegirse para esta función, todo ello de forma interactiva. Por defecto, la aplicación realiza los cálculos con unos valores objetivo prefijados y unos pesos y formas para los sumandos que la aplicación deter-



FIGURA 9. Gestión óptima de comportamientos.

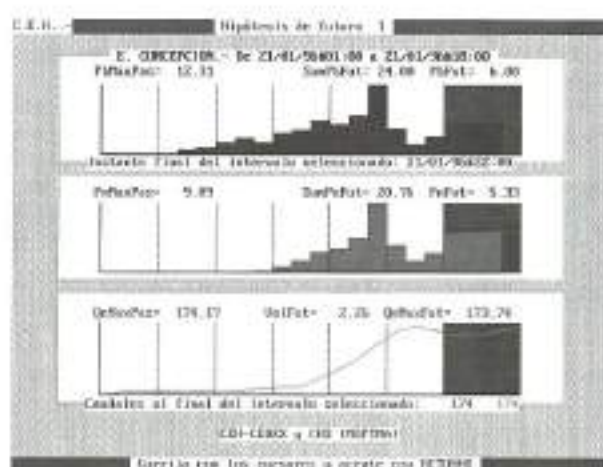


FIGURA 8. Previsión basada en hipótesis de lluvias.

mina de acuerdo con unos algoritmos creados para ello (figura 9).

Todos los resultados se presentan en forma gráfica con los valores numéricos más representativos.

Al concluir con la fase de gestión óptima, la aplicación elabora un informe, que almacena en un fichero ASCII, en el que recoge los datos básicos, parámetros del modelo, hipótesis de lluvias realizadas, con sus correspondientes hidrogramas, y las diferentes gestiones óptimas que el usuario haya seleccionado según las diferentes combinaciones de objetivos de explotación, ponderaciones e hipótesis de lluvia.

5. REFERENCIAS

- ALDANA, A. L.; F. ESTRADA; R. ESPINOSA y A. MERCHÁN (1996), "Previsión y gestión de crecidas en embalses en tiempo real: experiencia de aplicación del modelo crem en la red HIDROSUR", en *Comportamiento y seguridad de las presas existentes. Riesgos aceptables*, V Jornadas españolas de Presas, Valencia, 23 al 25 de abril de 1996, Comité Nacional Español de Grandes Presas, Valencia.
- CABEZAS, F. (1992), *Explotación óptima de embalses en situación de crecida* (no publicado).
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Confederación Hidrográfica del Segura (1996a), *PLU versión 1.1. Procesador de lluvias. Manual del usuario*, Madrid.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y Confederación Hidrográfica del Segura (1996b), *CREM versión 1.1. Crecidas en embalses. Manual del usuario*, Madrid.
- CHOW, V. T.; D. R. MAIDMENT y L. W. MAYS (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill, New York.
- FERRER, J. y F. ESTRADA (1995), "Proyecto de modelación hidrológica y de la gestión hidráulica en el Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH)", en *Jornadas sobre el SAIH en la gestión hídrica*, Zaragoza, 3 al 7 de Abril de 1995, Dirección General de Obras Hidráulicas y Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Zaragoza.
- Soil Conservation Service (1972), *National Engineering Handbook*, section 4, U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- VETERLING, V. T.; S. A. TEUKOLSKY; W. H. PRESS y B. P. FLANNERY (1988), *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press.
- VISSMAN, J. R.; G. LEWIS y J. KRAPP (1989), *Introduction to Hydrology*, Harper and Row Publishers, New York.

Medidas inteligentes de parámetros hidráulicos



Caudal en Tubería



Posición Angular



Nivel de Embalse



Caudal en Canal



**Posición Lineal
Nivel Flotador**



Nivel Canal Neumático

Calidad y experiencia en la técnica de medida para la gestión del agua y la energía

RITTMAYER S.A.

Calle Julián Camarillo 26-3ª - Apartado 35145 - E-28037 Madrid

Teléfono (91) 327 30 52* - Telefax (91) 304 31 49

HAY CARRETERAS DONDE NI SIQUIERA MODIFAL PODRIA EVITAR EL AQUA-PLANNING.



PERO HAY OTRAS MUCHAS DONDE SI PODRIA, DONDE REDUCIRIA EL NIVEL DE RUIDOS (HASTA 3 DECIBELIOS), DONDE DISMINUIRIA LA FORMACION DE RODERAS Y FISURAS, Y RETRASARIA EL ENVEJECIMIENTO DEL FIRME AUN EN LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS MAS EXTREMAS. REPSOL PRESENTA MODIFAL, EL PRIMER BETUN MODIFICADO EN EL QUE LA DISPERSION DE LOS POLIMEROS EN EL SENO DE LOS BETUNES ES PERFECTA Y HOMOGenea. ESTA HOMOGENEIDAD ES LA QUE PERMITE A MODIFAL CONSERVAR INTACTAS SUS PROPIEDADES AUN EN PERIODOS PROLONGADOS DE ALMACENAMIENTO. ALGUNAS VECES HAY QUE CAMBIAR ALGO PARA QUE TODO SIGA IGUAL. NOSOTROS HEMOS MODIFICADO NUESTROS BETUNES PARA SEGUIR SIENDO LIDERES EN ASFALTOS.



REPSOL PRODUCTOS ASFALTICOS, S. A.