

El Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación SIMPA

TEODORO ESTRELA MONREAL (*); LUIS QUINTAS RIPOLL (**)

RESUMEN Se presenta un Sistema Integrado de Modelización Precipitación-Aportación (SIMPA) que forma parte del Sistema de Información Hidrológica (SIH) del Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX y cuyo objeto es la gestión, análisis y simulación de variables hidrometeorológicas a distintas escalas espacio-temporales.

SIMPA, INTEGRATED SYSTEM OF PRECIPITATION-RUNOFF MODELLING

ABSTRACT *The Integrated System of Precipitation-Runoff Modelling (SIMPA) forms part of the Hydrological Information System (SIH) of the Centre for Hydrographic Studies (CEH) of the CEDEX and has as its object the management, analysis and simulation of hydrometeorological variables at different space-time scales.*

Palabras clave: SIMPA; Modelos; SIG; Hidrología.

1. INTRODUCCIÓN

En estudios a nivel regional, una gran cantidad de información hidrológica, tanto temporal como espacial, debe ser incorporada y procesada. Para que la gestión y el análisis de esa información sea operativa, es conveniente disponer de un sistema que utilice al máximo la información disponible en Bases de Datos y Sistemas de Información Geográfica (SIG) y que permita modelar diferentes procesos hidrológicos. Este es el objeto de la aplicación que se presenta en este artículo, que tiene entre sus características la de conectar con otros elementos del Sistema de Información Hidrológica (SIH) existente en el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX e integrar distintas herramientas de modelización realizadas en este organismo en los últimos años.

2. EL SISTEMA INTEGRADO DE MODELIZACIÓN PRECIPITACIÓN-APORTACIÓN (SIMPA)

SIMPA integra un tratamiento de información espacial (de tipo vectorial y raster) y temporal (series temporales de variables hidrometeorológicas), en una única aplicación utilizando una Interfaz Gráfica de Usuario (IGU) desarrollada con XGEN (Buehler, 1991). Este sistema se ha implementado en una estación de trabajo bajo el sistema operativo UNIX y entorno OSF/MOTIF (Open Software Foundation, 1991), el cual combina las ventajas de los sistemas multiusuarios y multitarea con una red de área local.

Se ha establecido una comunicación con archivos del SIG ARC/INFO (ESRI, 1991), el cual se destina, preferentemente, al almacenamiento de datos vectoriales y sus atribu-

tos en una base de datos y soluciona los problemas topológicos que tienen las capas vectoriales para ser usadas dentro de SIMPA (cuencas, ríos, acuíferos, usos de suelo, etc). Por otra parte, las capas de información tipo raster son gestionadas con el SIG GRASS (U.S. Army Corps, 1991), el cual está integrado dentro del sistema.

Igualmente se ha establecido comunicación a través de archivos ASCII con series temporales procedentes de la base de datos HIDRO del CEDEX (Menéndez y Quintas, 1991), la cual almacena datos hidrometeorológicos a escala nacional. Esta base de datos también incorpora una descripción de los datos relacionados con los ríos, cuencas, estaciones de aforo, etc, por lo que no sólo aporta los atributos de las capas vectoriales de ARC/INFO, sino también datos geográficos (p.e. coordenadas de las estaciones de aforo).

SIMPA constituye, por tanto, un elemento del SIH del CEDEX (figura nº1), el cual incluye además la base de datos HIDRO y dos SIG, ARC/INFO y GRASS.

Esta compuesto de los siguientes módulos:

- 1) *Definición del proyecto*, en donde se selecciona un proyecto y se introducen los datos que lo definen.
- 2) *Visualización de capas de información*, que permite superponer y visualizar mapas raster y vectoriales, realizar zooms, etc.
- 3) *Análisis geomorfológico*, donde se traza automáticamente la cuenca a partir de un modelo digital del terreno (MDT) y se obtienen parámetros geomorfológicos e hidrogramas unitarios.
- 4) *Análisis de series temporales*, donde se visualiza mediante gráficos la información contenida en los ficheros de datos meteorológicos e hidrológicos y se obtienen los estadísticos básicos de las variables de interés.
- 5) *Análisis paramétrico*, que permite combinar capas de información relativas a las características físicas de las cuencas para obtener los mapas de parámetros de los modelos hidrológicos.

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Programa Técnico Científico del Área de Hidrología del CEDEX.

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador Programa Técnico Científico de Ingeniería de Sistemas del CEDEX.

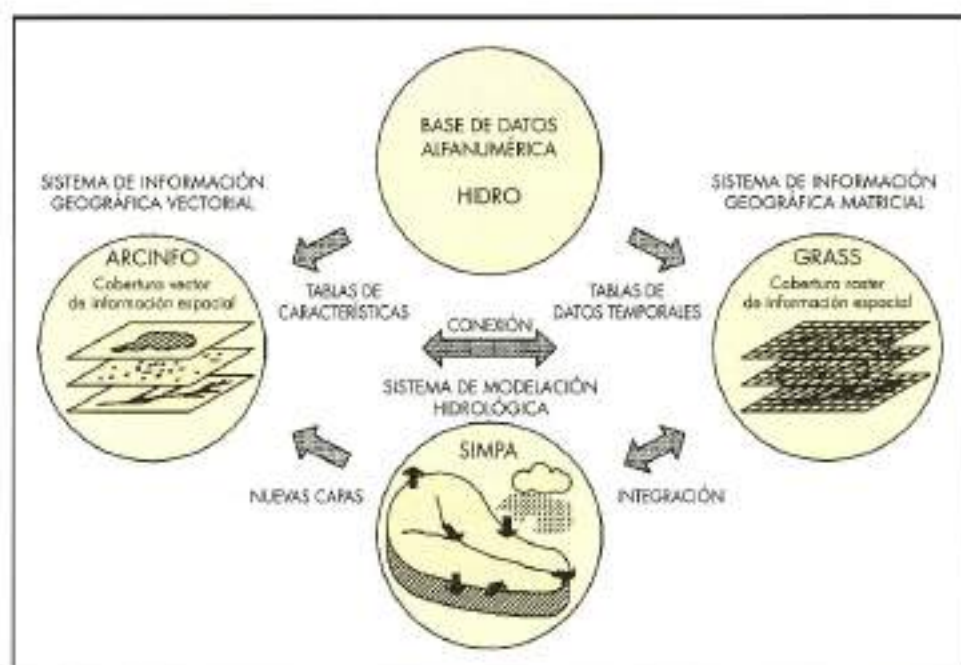


FIGURA 1. Esquema de integración de SIMPA en el Sistema de Información Hidrológica del CEDEX.

- 6) *Análisis interanual*, donde se realiza un contraste de los datos de las principales variables hidrológicas a escala media interanual.
- 7) *Simulación de aportaciones*, donde se realiza, de forma distribuida, una simulación continua de aportaciones de la cuenca a escala mensual.
- 8) *Simulación de crecidas*, donde se simulan caudales máximos e hidrogramas de crecida.

En los apartados siguientes se describen, con mayor detalle, dichos módulos.

3. MÓDULO DE DEFINICIÓN DE PROYECTOS

Tiene por objetivo que SIMPA pueda cumplir con versatilidad las funciones multitarea y multiusuario para las que se ha diseñado. Se entiende por proyecto el conjunto de información que conforma un trabajo completo, de manera totalmente independiente de otros trabajos en curso. Este módulo almacena en directorios específicos los datos propios del proyecto. Consisten en datos generales (nombre y título del proyecto, definición del proyecto respecto de GRASS (mapset, location, region de cálculo, máscara), nombres de los ficheros con los datos temporales (precipitaciones, temperaturas, caudales en puntos de control y extracciones en el acuífero) y nombres de los ficheros vectoriales con la información geográfica (mapa de cuencas, mapa de ríos y mapa de unidades hidrogeológicas). Los conceptos de región y máscara son de gran importancia en la creación del proyecto. La región define mediante coordenadas el rectángulo en el que se localiza el área objeto de estudio, mientras que la máscara define la poligonal o conjunto de poligonales en las que se realizarán los cálculos.

Se incorporan las opciones de creación, alteración y ejecución de un determinado proyecto, dando paso en este último caso a la apertura de una ventana de trabajo para el despliegue de la información gráfica y al acceso al menú principal de la aplicación.

4. MÓDULO DE VISUALIZACIÓN DE CAPAS DE INFORMACIÓN

Este módulo se ha diseñado para la visualización, de una manera sencilla, tanto de la información geográfica básica del proyecto, como de los numerosos mapas que se generan al ejecutar los diversos módulos de la aplicación.

En primer lugar debe configurarse el monitor en alguna de las combinaciones de ventanas múltiples posibles, desde una sola a doce, pudiéndose seleccionar en qué ventana quiere realizarse la visualización, borrarla o cambiar de ventana.

A continuación puede desplegarse cualquier mapa matricial (mas comúnmente denominado raster), vectorial o de puntos generado durante las simulaciones, pudiéndose seleccionar una paleta de colores de entre las disponibles. Los mapas vectoriales y de puntos pueden superponerse sobre un mapa raster (Figura nº 2).

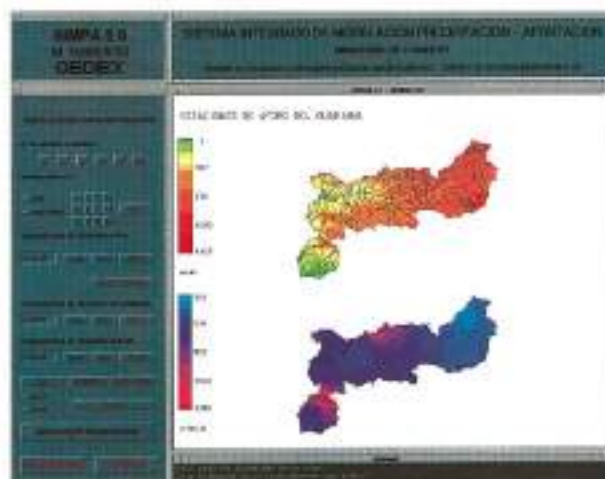


FIGURA 2. Ejemplo de visualización de capas de información (MED, lluvias, cuencas y estaciones pluviométricas en la cuenca del Guadiana).

Existen unas utilidades para volcar el contenido del monitor por impresora a tamaño DIN A4 y DIN A3, realizar zooms, volver a la región origen y para interrogar mediante el uso del ratón sobre el valor asociado a una celda de un mapa raster seleccionado.

Finalmente se dispone de unos módulos de visualización específicos para cuatro simulaciones concretas:

- visualización de medias mensuales interanuales. Pueden visualizarse los doce mapas matriciales de los siguientes datos medios mensuales para un período interanual de cálculo (Figura nº 3):
 - precipitaciones
 - temperaturas
 - extracciones en el acuífero

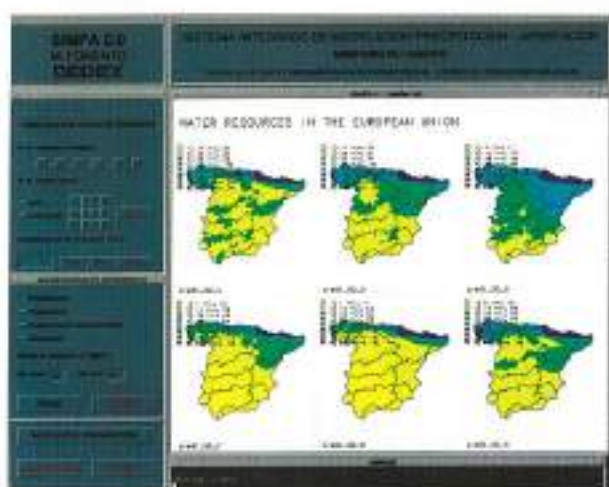


FIGURA 3. Ejemplo de visualización de precipitaciones medias mensuales (interanuales).

- visualización de valores mensuales. Pueden visualizarse mapas raster de los valores mensuales, para cualquier período simulado, de los siguientes datos:
 - precipitaciones
 - temperaturas
 - evapotranspiraciones potenciales
 - humedad del suelo
 - infiltración en el suelo
 - volumen almacenado en los acuíferos
 - aportación superficial
 - aportación subterránea
 - aportación total

- visualización del análisis interanual. Pueden visualizarse los mapas de los valores medios interanuales de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real, las extracciones en el acuífero y la aportación total para cualquier período de cálculo. También pueden obtenerse gráficos donde se muestre el contraste entre precipitaciones, evapotranspiraciones y aportaciones históricas y simuladas, así como una correlación entre aportaciones históricas y simuladas en los puntos de control del proyecto. Toda esta información procede del módulo descrito en el apartado nº 5.

- visualización de la simulación de aportaciones mensuales. Se muestra mes a mes para cualquier período de cálculo, en una misma figura, los mapas de precipitación, evapotranspiración real, extracciones en el acuífero, aportación superficial, aportación subterránea y aportación total. También muestra los gráficos de aportaciones simuladas y observadas (si las hay) en los puntos de control a lo largo del período de cálculo, así como el contraste entre precipitaciones, evapotranspiraciones y aportaciones históricas y simuladas y la correlación entre aportaciones históricas y simuladas. Toda esta información procede del módulo descrito en el apartado nº 9.

5. MÓDULO DE ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

El módulo de análisis geomorfológico permite el estudio de una cuenca desde el punto de vista de la geomorfología y características físicas de la misma (UPV 1995a, Mintegui-Aguirre y Lopez, 1990 y Llamas, 1993). El núcleo principal de este módulo ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV, 1996) dentro del marco del Convenio suscrito por dicha Universidad con el CEDEX para la realización del Proyecto de I+D "Obtención de características geomorfológicas e hidrogramas unitarios a partir de un modelo digital del terreno".

Partiendo del modelo digital del terreno y de las coordenadas del punto de desagüe, este módulo obtiene la divisoria de la cuenca, la red de drenaje, el río principal y la curva hipsométrica (Figura nº 4). Con estos cálculos previos realizados, se efectúa el análisis geomorfológico necesario para la obtención de los parámetros a utilizar en el cálculo de los hidrogramas unitarios basados exclusivamente en las características geomorfológicas de la cuenca. Se obtiene la superficie de la cuenca, el recorrido principal (se entiende por recorrido principal la máxima distancia recorrida por el flujo dentro de la cuenca desde el punto más lejano de la divisoria al punto de desagüe), la pendiente media de la cuenca y del recorrido principal, el perímetro y parámetros de forma de la cuenca (coeficiente de compacidad de Gravelius, el factor de forma de Horton, el radio de elongación de Schumm y el radio de circularidad), la curva hipsométrica y finalmente la red de drenaje completa de la cuenca. De esta red se calcula la longitud total, el número de tramos, la densidad de dre-

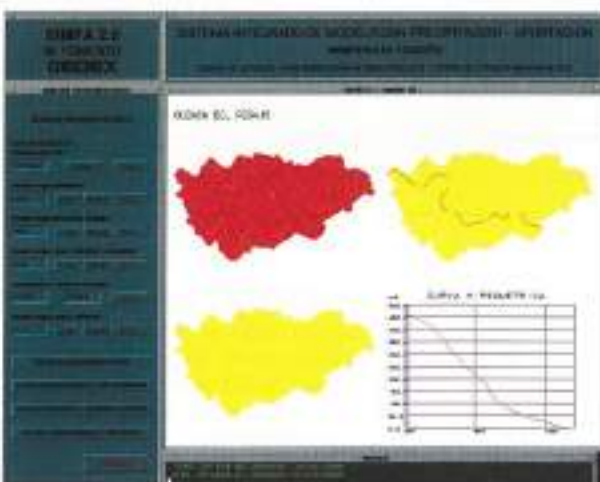


FIGURA 4. Ejemplo de determinación de divisoria, red de drenaje, río principal y curva hipsométrica.

naje, la constante de estabilidad y la densidad hidrográfica. Por último puede deducirse el tiempo de concentración mediante cuatro fórmulas, la de Témez, la del U.S. Bureau of Reclamation (USBR), la de Kirpich y la de Giandotti, así como el centroide de la cuenca.

Tras estos cálculos previos pueden obtenerse hidrogramas unitarios sintéticos mediante tres metodologías distintas:

- Hidrograma unitario deducido por el método de las isocronas.** A partir del modelo digital del terreno y del campo de celdas drenantes acumuladas se obtiene el campo de direcciones de flujo en todos los puntos de la cuenca. A partir de éste y teniendo en cuenta la información sobre conectividad de las celdas proporcionada por el campo de direcciones de drenaje, se selecciona el punto de desagüe, obteniéndose a continuación la cuenca vertiente. Se calcula seguidamente el campo de distancias interceldas (distancia entre el centro de gravedad de cada celda al centro de gravedad de la celda a la que drena) y el campo de velocidad de flujo. Este campo se obtiene por formulaciones diversas, objeto de investigación y originales en el trabajo citado, que expresan la variabilidad espacial de la velocidad de flujo en la cuenca (Morisawa, 1985 y Leopold, 1953). Se puede así obtener el campo de tiempos de paso del flujo por cada celda, el campo de tiempos de viaje desde cada celda hasta el punto de desagüe y mediante clasificación en clases, las isocronas. Finalmente se calcula el área de cada isocrona, el área acumulada, los caudales acumulados desagüados correspondientes a cada isocrona (hidrograma en S) y finalmente el hidrograma unitario (figura nº 5).

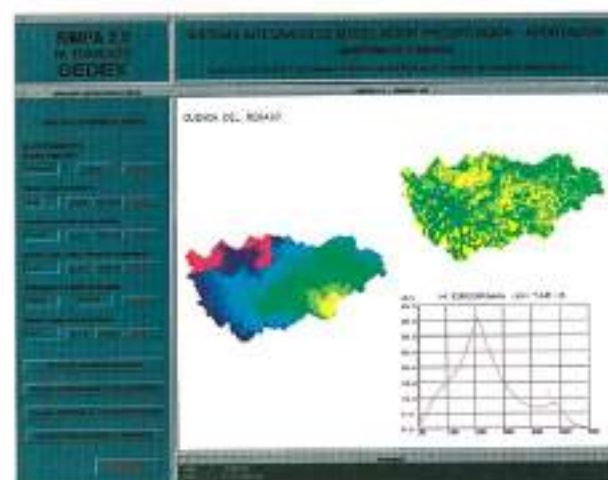


FIGURA 5. Ejemplo de la obtención del hidrograma unitario por el método de isocronas.

- Hidrograma unitario geomorfológico.** Está basado en los ratios de Horton. En primer lugar se obtiene de manera automatizada la red codificada de Horton-Strahler (figura nº 6). De cada orden de la red se calcula la longitud total y longitud media, el número de tramos y el área drenante acumulada. Tras deducirse el ratio de bifurcación, el ratio de longitud y el ratio de área se obtienen finalmente los parámetros del hidrograma unitario instantáneo geomorfológico (Rodríguez-Iturbe y Valdes, 1979 y Rodríguez-Iturbe y otros, 1982) según tres formulaciones:

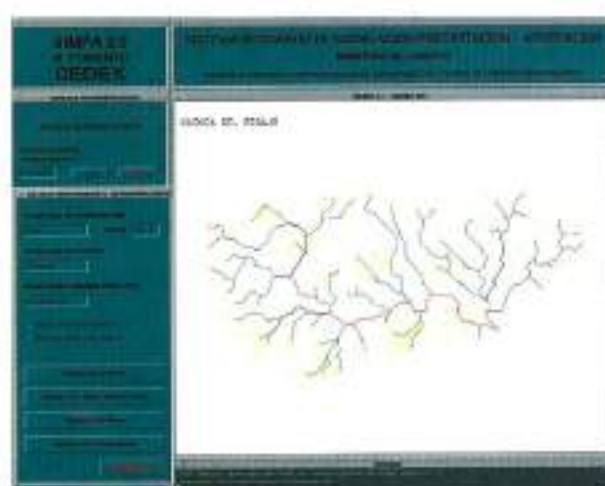


FIGURA 6. Ejemplo de red codificada de Strahler en la cuenca vertiente al Embalse del Regajo.

geomorfológico de Rodríguez-Iturbe y Valdés, Rosso y García Bartual.

- Hidrograma unitario empírico.** Se trata de hidrogramas que se obtienen directamente de la geomorfología de la cuenca sin relación con la clasificación de Horton-Strahler. Partiendo de los valores del tiempo de concentración, el área de la cuenca, la longitud y la pendiente media del recorrido principal, el centroide y unos determinados valores para la duración del chubasco y el volumen de precipitación del chubasco, se obtienen los parámetros del hidrograma unitario empírico según cuatro formulaciones: triangular de Témez, triangular del USBR, adimensional del Soil Conservation Service (SCS) de los EEUU y finalmente el de Snyder.

6. MÓDULO DE ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES

Este módulo aborda el análisis de los datos contenidos en los ficheros de series temporales mensuales (precipitaciones, temperaturas, caudales en estaciones de aforo, etc). El módulo obtiene la información leyendo directamente de los ficheros, con el formato de salida de la base de datos HIDRO. Consta de cinco herramientas:

- edición:** permite la edición del contenido del fichero, facilitando su corrección, impresión, copia y grabación en disco.
- visualización de la localización geográfica de los datos:** partiendo de las coordenadas contenidas en el fichero de series temporales, puede visualizarse un mapa con la situación e identificación de los puntos donde se generan las series temporales (figura nº 7).
- cronograma:** permite obtener un cronograma (información mensual disponible) de las series temporales contenidas en el fichero (figura nº 8).
- estadístico:** genera un fichero con datos estadísticos de las series temporales contenidas en el fichero (indicativo, coordenadas geográficas, número de años con datos, período que cubren, valor medio, coeficiente de variación, coeficiente de sesgo, valor mínimo, valor máximo y valor de los doce meses del año medio) (figura nº 9).
- dibujo de series mensuales:** puede dibujarse un gráfico con los valores mensuales o anuales de cualquier punto

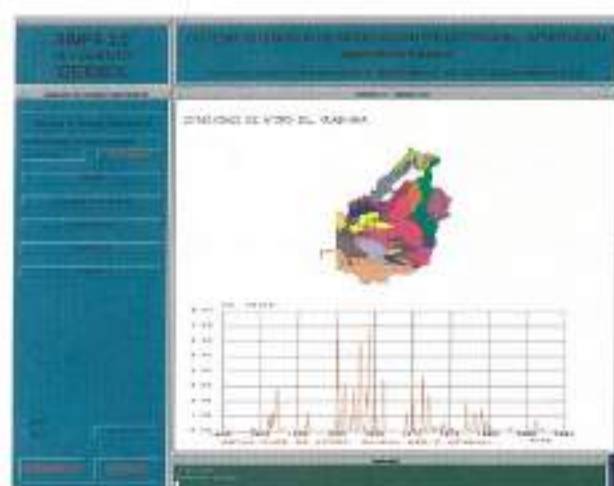


FIGURA 7. Localización de estaciones y visualización de series temporales de caudales.

de medida con datos temporales, seleccionándose ese punto con el ratón (figura nº 7).

7. MÓDULO DE ANÁLISIS PARAMÉTRICO

Este módulo incorpora diferentes herramientas que facilitan el establecimiento de relaciones entre parámetros hidrológi-

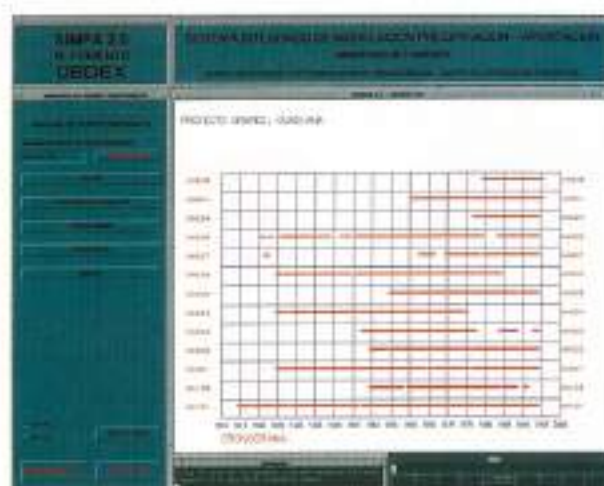


FIGURA 8. Cronograma de las estaciones de aforo situadas en la cabecera de la cuenca del río Guadiana.

cos (máxima capacidad de almacenamiento de humedad en el suelo, capacidad de infiltración, número de curva, umbral de escurrentía, etc.) y capas de información sobre características físicas de las cuencas (tipos y usos del suelo, unidades hidrogeológicas, geología, etc.).

Dispone de 3 herramientas generales (Ruiz y otros, 1994; Estrela y otros, 1996): a) reclasificación de los valores en

[illegible]

FIGURA 9. Estadísticas de las series de caudales en algunas estaciones de la cuenca del Guadiana.

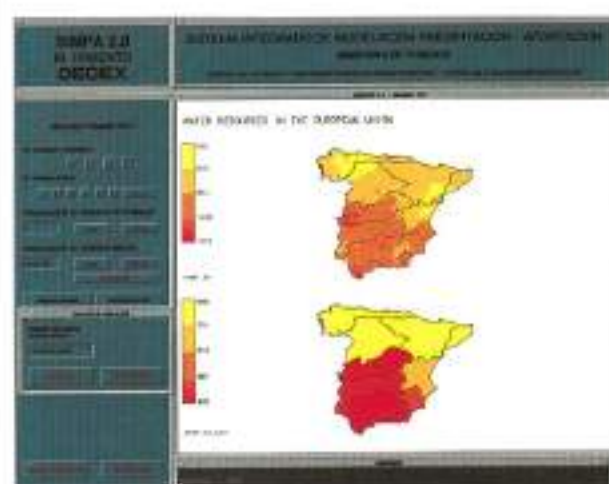


FIGURA 10. Ejemplo de cálculo de valores areales de evapotranspiración potencial en las cuencas hidrográficas peninsulares.

cada una de las celdas de los mapas raster, b) cálculo de los valores medios de todas las celdas correspondientes a una cobertura de polígonos dada (Figura nº 10) y c) generación de mapas de parámetros mediante combinación lineal ponderada de otros mapas de características (como máximo 4).

El proceso de obtener un mapa de parámetros con esta herramienta se resume en las siguientes etapas:

- a) para cada parámetro se estudian las características fisiográficas de las que depende: pendientes, elevaciones, tipos de suelo, usos del suelo, etc.
- b) se le asigna, a cada una de estas características, un orden de prioridad respecto a las demás. Por ejemplo, podría decirse que la capacidad de almacenamiento hídrico en el suelo dependerá más, en principio, del tipo o uso del suelo que de la pendiente del terreno.
- c) seguidamente se crea un mapa del parámetro a través de una combinación lineal ponderada de los mapas de características físicas seleccionadas. El mapa resultante se re-clasifica teniendo en cuenta el valor mínimo y máximo que puede tomar el citado parámetro en la región objeto de estudio (figura nº 11). Los pesos asignados en la ponderación y los valores mínimo y máximo del parámetro se convierten en la práctica en los elementos de calibración del modelo que se está utilizando.

El módulo dispone también de una herramienta específica para el cálculo del número de curva (McCuen, 1982), parámetro de referencia utilizado en muchos modelos hidrológicos para el estudio de crecidas.

El modelo del número de curva del SCS de los EEUU está basado en un número que cuantifica el efecto del uso y tipo de suelo en el proceso de generación de escorrentía a partir de la lluvia. La combinación de esas capas de información según las tablas del SCS puede proporcionarnos la capa buscada de números de curva (UPV, 1995a). Ferrer y otros (1996) desarrollan un módulo, el cual se ha incorporado a SIMPA, para estimar el número de curva a escala regional a partir del MDT y de información temática sobre usos de suelo (mapas de cultivos y aprovechamientos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) y tipos de suelo. Incluye distintas tablas de equivalencia entre los cita-

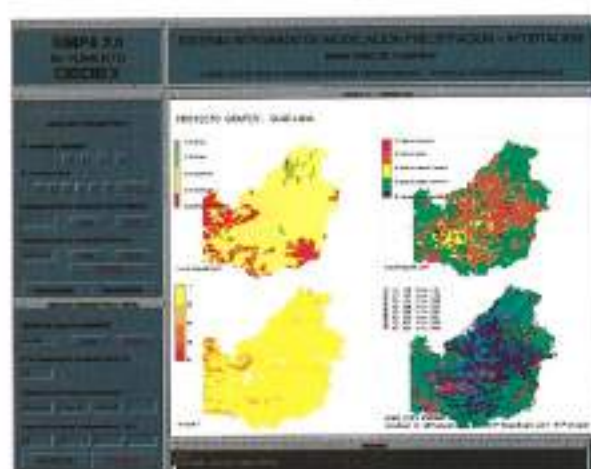


FIGURA 11. Ejemplo de obtención del parámetro Capacidad Máxima de Humedad en el suelo.

dos mapas y una variante de las tablas del SCS. La metodología propuesta la aplican en la cuenca del río Guadiana utilizando una resolución espacial correspondiente a un tamaño de celda de 2 km x 2 km (figura nº 12).

8. MÓDULO DE ANÁLISIS INTERANUAL

Este módulo de análisis interanual tiene como objetivo el contraste de datos de precipitaciones, evapotranspiraciones potenciales y aportaciones a escala media interanual, para cualquier período temporal especificado. Tiene dos opciones para realizar el contraste: la fórmula de Budyko y la de Turc-Pike. Ambos métodos dan aproximaciones bastante realistas en aquellos casos en los que el período temporal considerado sea de un número elevado de años. En ese caso la variación de las reservas, tales como las existentes en los acuíferos, puede considerarse despreciable.

Los datos de entrada de este módulo son los valores de precipitación y temperatura mensual en las estaciones meteorológicas en el período temporal de cálculo. Dicha información es tomada directamente de ficheros procedentes de la base de datos HIDRO. A partir de esos datos el modelo calcula los valores medios interanuales para cada variable. Otra información que se precisa es el fichero de cuencas digitalizadas. El modelo obtiene los diferentes mapas interpolados de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, así como los valores areales de cada una de esas variables en las cuencas consideradas. El método de interpolación utilizado es el del inverso de la distancia al cuadrado.

Los mapas de escorrentía los estima a partir de los mapas raster de precipitación y evapotranspiración potencial mediante cualquiera de las dos leyes regionales citadas: Budyko y Turc-Pike. El modelo aplica dicha ley en cada una de las celdas en que se ha discretizado la cuenca (Figura nº 13).

El cálculo de la ETP en cada celda se efectúa aplicando la fórmula de Thornthwaite, que básicamente sólo precisa datos de temperaturas. Este método, si bien ofrece buenas aproximaciones en zonas de elevada precipitación, en cambio, en zonas áridas infravalora la cuantía de la evapotranspiración potencial, por lo que posteriormente se afectan los resultados que proporciona, por un coeficiente que varía en el espacio y que es solicitado por el modelo en forma de mapa.

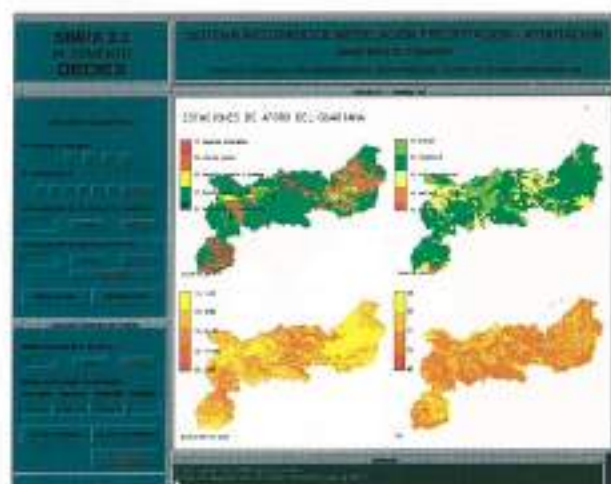


FIGURA 12. Ejemplo de estimación del número de curva en la cuenca del Guadiana.

A efectos de contrastar la información de todas las variables hidrometeorológicas involucradas, el módulo presenta tablas y gráficos con los valores de las precipitaciones, evapotranspiraciones (potencial y real) y aportaciones específicas (simuladas y observadas en los puntos de control).

9. MÓDULO DE SIMULACIÓN DE APORTACIONES

A lo largo de los últimos años, un gran número de modelos se han desarrollado con el objetivo de evaluar los recursos hídricos de las cuencas. Estos modelos han servido para simular el proceso de generación de la escorrentía a partir de información meteorológica y de las características de las cuencas, y han jugado un importante papel en los procesos de planificación hidrológica y de gestión de cuencas (Chairat y Delleur, 1993). Siguiendo esta línea, se ha desarrollado un modelo que posibilita la generación de información hidrológica en cualquier punto de la red hidrográfica y que compara los datos simulados con los históricos de las estaciones de aforo. Se ha diseñado para ser operativo en el estudio integrado de grandes cuencas, a diferencia de modelos anteriores que tienen funciones similares y que se usan principalmente para modelar cuencas pequeñas.

Los modelos hidrológicos distribuidos de simulación continua de la cuenca deben superar el grave problema de obtener los numerosos parámetros hidrológicos que utilizan en sus cálculos. Para este tipo de modelos, los SIG ofrecen una posibilidad muy interesante de abordar el problema de la variabilidad espacial, discretizando la cuenca en una serie de celdas que poseen sus propios parámetros asociados y planteando en cada una de ellas las ecuaciones propias del modelo hidrológico: ecuaciones que rigen la evapotranspiración, el excedente, la infiltración, etc.

Este módulo (Ruiz y otros, 1994; Estrela y otros, 1996) reproduce los procesos esenciales de transporte de agua que tienen lugar en las diferentes fases del ciclo hidrológico. Plantea el principio de continuidad o conservación de la masa y leyes de reparto y transferencia entre cada uno de los almacenamientos considerados. La resolución temporal utilizada es el mes, por lo que puede obviarse la simulación de gran número de almacenamientos intermedios y la propagación del flujo en la cuenca.



FIGURA 13. Ejemplo de cálculo de mapas de precipitación, ETP y escorrentía para la Península.

Las entradas al modelo son los datos de precipitaciones y temperaturas mensuales en las estaciones meteorológicas y los datos de caudales históricos en los puntos de control o contraste, que proceden de ficheros obtenidos directamente de la base de datos HIDRO. Otra información que se precisa es el fichero vectorial donde se reflejan las cuencas. El modelo, directamente y por interpolación, obtiene los distintos mapas de precipitaciones, temperaturas etc., en cada intervalo temporal.

Los parámetros hidrológicos del modelo son función de las características físicas de las cuencas (mapa de pendientes, de geología, de usos y tipos de suelo, etc). La salida del modelo son los mapas de los distintos almacenamientos (humedad en el suelo y volumen de acuífero) y de las variables de salida del ciclo hidrológico (evapotranspiración real y aportación específica total, obtenida como suma de aportación superficial y subterránea) (Figura nº 14). El modelo integra el mapa de aportación específica total en las cuencas vertientes a cada punto de control y calcula los caudales mensuales en él.

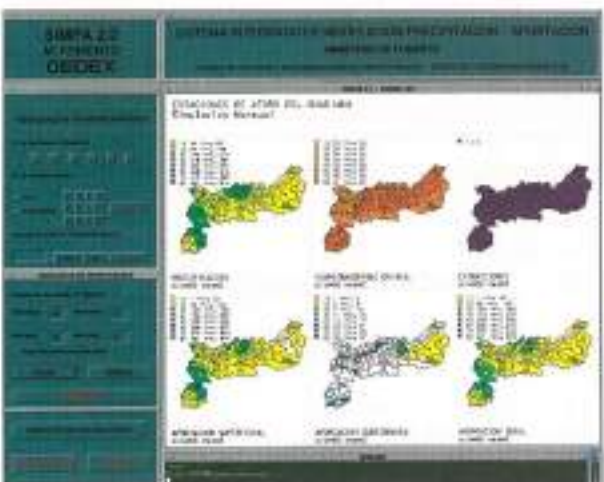


FIGURA 14. Ejemplo de simulación del ciclo hidrológico en un intervalo de tiempo en la cuenca del Guadiana.

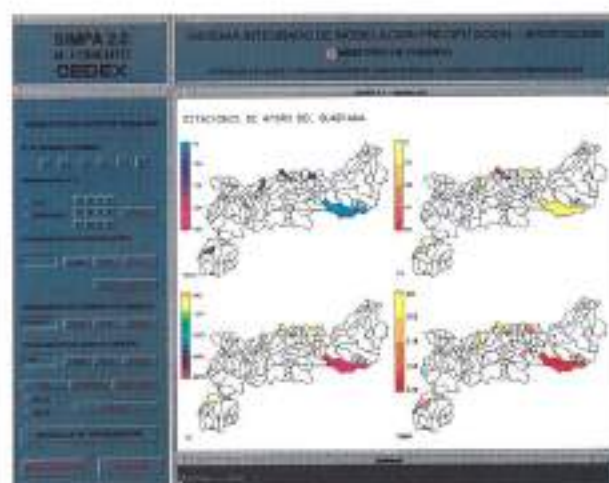


FIGURA 15. Ejemplo de aplicación de una variante del Método Racional en una serie de subcuencas seleccionadas en la cuenca del río Guadiana.

Seguidamente se visualiza, por cada estación de aforos (punto de control) el contraste entre los caudales históricos y los simulados, lo que permite comprobar mes a mes las diferencias entre ambos. El análisis de estos ajustes permite calibrar el modelo utilizando el módulo de análisis paramétrico descrito en un apartado anterior.

El modelo crea un fichero de texto con formato legible por la base de datos HIDRO en el que aparecen los valores de las principales variables del ciclo hidrológico en cada punto de control y cada mes. También presenta cuadros resumen donde agrega los resultados a nivel anual e interanual.

10. MÓDULO DE SIMULACIÓN DE CRECIDAS

Este módulo incorpora, en la actualidad, dos opciones para la simulación de caudales de crecidas: a) una variante del método racional (Témez, 1991) y b) un modelo distribuido de simulación de hidrogramas de crecidas (UPV, 1995b).

a) Variante del método racional.

El objetivo de este módulo es la obtención simultánea de caudales máximos en un conjunto de cuencas medianas (hasta 3.000 km²) en régimen natural. Utiliza el método propuesto por Témez (1991), que emplea como fórmula de cálculo una variante de la tradicional fórmula racional.

El caudal máximo para un período de retorno dado es función de la máxima intensidad media en el intervalo de duración igual al tiempo de concentración, de la superficie de la cuenca, del coeficiente de escorrentía del intervalo en el que se produce la máxima intensidad y de un coeficiente de uniformidad. Este coeficiente de uniformidad varía de unos episodios a otros, pero su valor medio en una cuenca concreta depende fundamentalmente del valor de su tiempo de concentración, y de forma tan prevalente que a efectos prácticos puede despreciarse la influencia de las restantes variables tales como la torrencialidad del clima, etc.

Respecto al coeficiente de escorrentía, la fórmula propuesta utiliza como parámetro el umbral de escorrentía o el número de curva y tiene en cuenta el efecto de la máxima lluvia diaria.

Los mapas raster de precipitaciones máximas diarias integrados en el modelo son los correspondientes al estudio

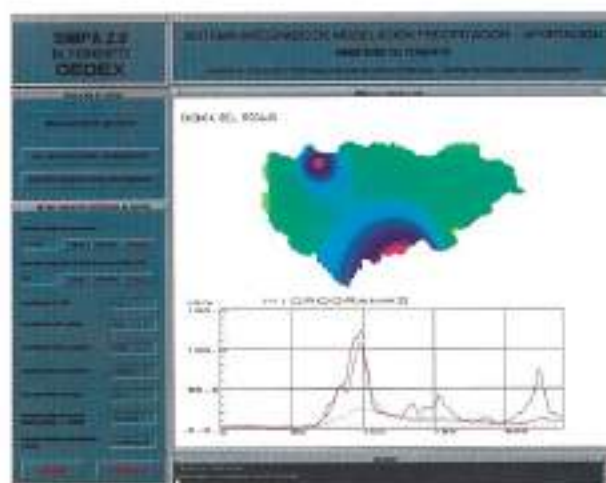


FIGURA 16. Ejemplo de cálculo de hidrogramas de crecida en la cuenca vertiente al embalse de Regajo.

(Ferrer y Ardiles, 1994) que a escala nacional realizó el CEDEX para la Dirección General de Carreteras, aunque puede suministrarse al modelo cualquier otro mapa de isomáximas.

Los parámetros hidrológicos necesarios para la aplicación del método son el tiempo de concentración y el umbral de escorrentía. El tiempo de concentración se deduce del modelo digital del terreno (MDT), tal como se describe en el módulo de análisis geomorfológico y el umbral de escorrentía se deduce del MDT y de los usos del suelo y litología, tal como se describe en el módulo de análisis paramétrico.

En la figura nº 15 se muestra un ejemplo de aplicación de éste módulo en una serie de subcuencas en la Confederación Hidrográfica del río Guadiana.

b) Modelo distribuido de simulación de hidrogramas.

Este módulo incorpora un modelo distribuido de simulación de hidrogramas de avenida de pocos parámetros denominado PALANCIA, desarrollado por la UPV (1995b) bajo un convenio de colaboración en materia de I+D con el CEDEX. Se compone de tres submodelos:

- Submodelo de precipitaciones. Utiliza una técnica de ponderación espacial de la precipitación.
- Submodelo de infiltración del SCS distribuido. Aplica la ecuación del clásico modelo del SCS de forma distribuida, es decir en todas las celdas en que se discretiza la cuenca. Introduce un parámetro que tiene en cuenta el efecto de escala y el estado de humedad del suelo al inicio del episodio y requiere el conocimiento de la capa de números de curva o umbral de escorrentía de la cuenca en condiciones medias de humedad. Esta última información se obtiene mediante el módulo de análisis paramétrico descrito en apartados anteriores.
- Submodelo de función impulso-respuesta de la cuenca. Utiliza el campo de hidrogramas unitarios distribuido de Clark, deducido a partir del mapa de isocronas y del hidrograma unitario de Clark correspondiente a cada celda. Precisa el mapa raster de isocronas de la cuenca, el cual puede obtenerse mediante el módulo de análisis geomorfológico ya descrito y la constante de recesión del hidrograma unitario de Clark.

El modelo realiza una separación de los caudales superficiales y subterráneos del hidrograma observado a efectos de poderlo contrastar con el hidrograma superficial simulado. En la figura nº 16 se muestra un ejemplo de aplicación del modelo en la cuenca del río Palancia vertiente al embalse del Regajo.

11. CASOS DE ESTUDIO

A continuación se describen dos ejemplos de aplicaciones realizadas con SIMPA: a) la modelización de aportaciones en la cuenca del Guadiana con objeto de estudiar una posible ampliación de su red de afloros y b) la estimación de mapas de escorrentía media en España, dentro del marco del proyecto FRIEND-AMHY del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO.

MODELIZACIÓN DE APORTACIONES EN LA CUENCA DEL GUADIANA

La Confederación Hidrográfica del Guadiana encargó al CBDEX la realización de un estudio que tenía, entre otros objetivos, la definición del emplazamiento de nuevas estaciones de aforo. La gran cantidad de información y número de criterios necesarios para alcanzar este objetivo, hizo que se optara por utilizar la tecnología que proporcionan los SIG para el manejo y análisis de las distintas capas de información y para la modelización hidrológica de la cuenca.

Uno de los criterios a tener en cuenta para decidir el emplazamiento óptimo de las nuevas estaciones es el que se denominó criterio hidrológico. Según este criterio, aquellos tramos de río donde sea más difícil estimar los recursos hídricos mediante métodos indirectos (por ejemplo, mediante modelación hidrometeorológica) son los más susceptibles de situar una estación de aforo. Para aplicar este criterio se necesitan capas de información tales como precipitaciones, evapotranspiraciones, aportaciones, divisoria de cuenca, usos y tipos de suelo, geología, unidades hidrogeológicas, modelos digitales del terreno etc.

Para evaluar la idoneidad del emplazamiento de las estaciones según el criterio hidrológico se utilizó, por tanto, el módulo de simulación de aportaciones de SIMPA, que permite estimar series de caudales mensuales en régimen natural en cualquier punto de la red hidrográfica de una gran cuenca.

Los mapas de parámetros que se utilizan en el proceso de modelización se obtuvieron a partir de información sobre usos del suelo, litología y unidades hidrogeológicas (figura nº 17). La capacidad máxima de almacenamiento de los suelos se dedujo a partir de una combinación lineal de los mapas de usos del suelo y litología, usando, en la práctica, únicamente tres parámetros: el valor mínimo y máximo de la capacidad máxima de almacenamiento de los suelos y los pesos que se establecieron en la combinación lineal. La capacidad de infiltración en los acuíferos se obtuvo teniendo en cuenta la litología y la geometría de las unidades hidrogeológicas. Finalmente, el mapa con los coeficientes de recesión de los acuíferos se estimó directamente a partir de las curvas de agotamiento de los acuíferos registradas en las estaciones de aforo.

Las simulaciones se llevaron a cabo en el período 65/66-69/70, época en la cual las extracciones de los acuíferos en la cabecera de la cuenca estaban muy por debajo de las actuales.

La secuencia de mapas de lluvia mensual para el período ya mencionado se obtuvo a partir del algoritmo de interpolación conocido como inverso de la distancia al cuadrado. Los mapas de evapotranspiración potencial de la cuenca para cada mes del período simulado se estimaron utilizando el método de Thornthwaite corregido, tal como se describe en apartados anteriores.

En la figura nº 18 se muestran los ajustes obtenidos en distintos puntos de control. A partir del análisis de estos gráficos se decidieron una serie de zonas donde era prioritario ubicar nuevas estaciones de aforo (Estrela, 1995).

ESTIMACIÓN DE ESCORRENTÍAS MEDIAS EN ESPAÑA

Muchos países han generado mapas de isocías de la escorrentía media anual en su territorio utilizando datos procedentes de redes de control de caudales. Sin embargo, estos mapas no son fáciles de interpretar. Una alternativa consiste en la elaboración de mapas raster de escorrentía a partir de la interpolación estadística de puntos de medida de caudales (UNESCO, 1993). La dificultad estriba en que en algunas ocasiones no hay suficientes estaciones de afloros con régimen no alterado que garanticen la precisión de los

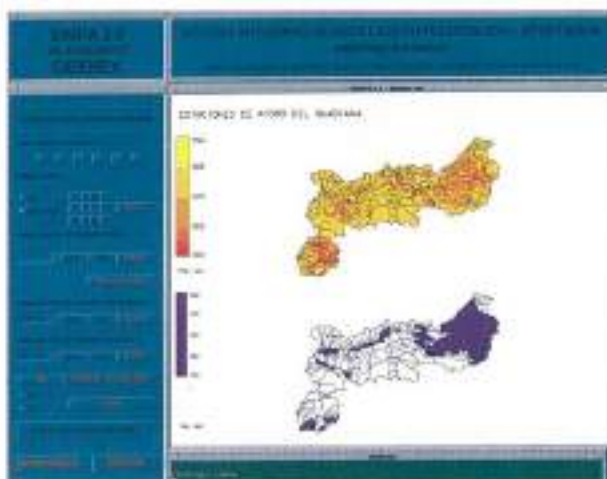


FIGURA 17. Ejemplo de mapas de parámetros utilizados para el método de simulación de aportaciones en la cuenca del Guadiana.

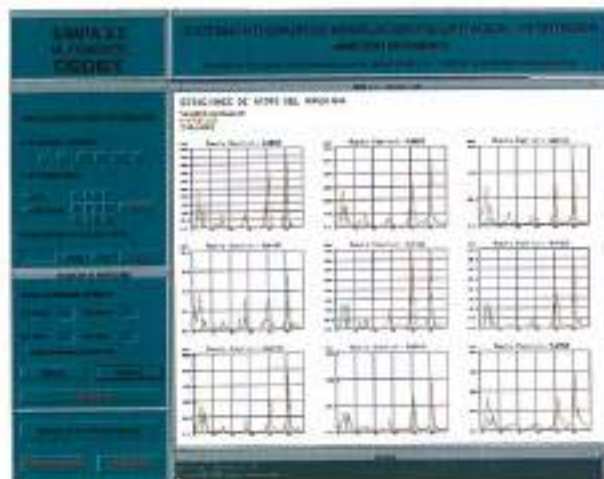


FIGURA 18. Ejemplo de aporte de caudales simulados e históricos en distintos puntos de control en la cuenca del Guadiana.

procesos de estimación. Además, estos mapas no son necesariamente consistentes con otros mapas, tales como los de precipitación o evapotranspiración. Para solventar este problema pueden aplicarse leyes regionales en las que se utilicen relaciones empíricas entre variables meteorológicas y de escorrentía.

Estrela y otros (1995), con el módulo de simulación interanual de SIMPA, obtienen mapas de escorrentía media anual en régimen natural utilizando ese tipo de leyes regionales. En este trabajo utilizan información hidrológica procedente de la base de datos de cuencas piloto españolas (Quintas y otros, 1995) del proyecto FRIEND AMHY del PHL. Primeramente, llevan a cabo un estudio experimental de selección de ley regional en las 22 cuencas seleccionadas en España. Una vez definida la ley regional a utilizar obtienen el mapa raster de escorrentías medias en la península a partir de información meteorológica (precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales) con una resolución de malla de 10 km x 10 km (Figura nº 19).

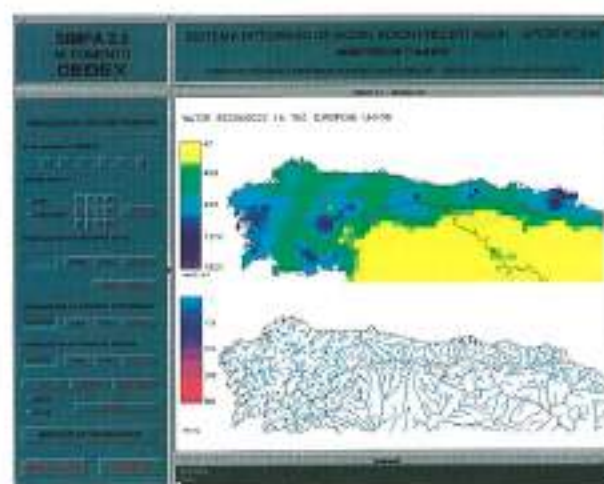


FIGURA 19. Ejemplo de cálculo de Escorrentía y caudales en la cuenca del Norte de España.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BUEHLER, K. A., 1991 "Xgen: An application interface generator program". USA CERL. U.S. Army Corps, 1991.
- CHAIRAT, S. and J. W. DELLEUR, 1993. Integrating a physically based hydrological model with GRASS. International Conference on application of GIS in hydrology and water resource management, Vienna 1993.
- ESRI, 1991. ARC/INFO Data Model, Concepts and Key Terms. User's Guide. Environmental System Research Institute, Inc. U.S.A., 1991.
- ESTRELA, T., 1995. Use of a Geographic Information System for designing flow measurement networks in a wide basin. HYDRA 2000, Proc. XXVI IAHR Congress. Vol 4. Pages 368-373. London, September 1995.
- ESTRELA, T., FERRER, M. and ARDILES, L., 1995. Estimation of precipitation-runoff regional laws and runoff maps using a G.I.S. Friend AMHY Meeting, UNESCO IV IHP Programme. Theme III. Thessaloniki, September 1995.
- ESTRELA, T. y QUINTAS, L., 1996. A distributed hydrological model for water resources assessment in large basins. Proceedings of 1st International Conference on Rivertech 96, IWRA. Vol 2, pp 861-868. Chicago, USA, September 1996.
- FERRER, F. J. y ARDILES, L., 1994. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. Ingeniería Civil 1994 (95) pp 87-100.
- FERRER, M.; RODRÍGUEZ, J. y ESTRELA, T., 1995. Generación automática del número de curva con Sistemas de Información Geográfica. Ingeniería del Agua. Diciembre de 1995.
- LEOPOLD, L. B., 1953. Downstream change of velocity in rivers. American Journal of Science, 251.
- LLAMAS, J., 1993. Hidrología general: principios y aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco.
- MCCUEN, R. H., 1982. A guide to Hydrological Analysis Using SCS methods. Soil Conservation Service (SCS). Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey 07632 USA.
- MENÉNDEZ, M.; L. QUINTAS, 1991. Tratamiento y difusión de los datos hidrológicos: Anuario de Aforos y base de datos. Revista de Ingeniería Civil, nº80, CEDEX-MOPTMA, 1991.
- MINTEGUI-AGUIRRE, J. A. y F. LÓPEZ, 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.
- MORISAWA, M. 1985. Geomorphology Texts: Rivers. Longman Inc.
- Open Software Foundation, 1991 "OSF/Motif. Release 1.1, Programmer's Reference". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1991.
- QUINTAS, L.; ARDILES, L. and FERRER, M., 1995. Analysis of the spanish data in the FRIEND AMHY database. To be presented on AMHY FRIEND meeting, Thessaloniki, September 1995.
- RODRÍGUEZ-ITURBE I. et al., 1979. A Geomorphoclimatic Theory of a Instantaneous Unit Hydrograph. Water Resources Research 18.
- RODRÍGUEZ-ITURBE I. y J. B. VALDÉS, 1982. The Geomorphological Structure of Hydrologic Response. Water Resources Research 15.
- RUIZ, J. M.; ESTRELA, T. and QUINTAS, L., 1994. Modelización hidrológica distribuida en el proyecto Guadiana. El modelo SIMPA. Curso sobre utilización de los Sistemas de Información Geográfica en Hidrología. CEDEX, Madrid, España, Noviembre 1994.
- TÉMEZ, J. R., 1991. Extended and improved rational method. Version of the Highways Administration of Spain. Proc. XXIV IAHR Congress. Madrid. Spain. 1991. Vol A. pp 33-40.
- UNESCO, 1993. A first glance on Hydrological Regimes. Alpine and Mediterranean Area. Topic III (Hydrological Regimes) prepared by the AMHY group, January 1993.
- UPV, 1995a. Utilización de un sistema de información geográfica en la modelación distribuida de crecidas. Aplicación en la cuenca del Alto Palancia. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- UPV, 1995b. Utilización de un Sistema de Información Geográfica en la modelación distribuida de las crecidas. Aplicación a la cuenca del alto Palancia. 1995.
- UPV, 1996. Proyecto I+D Obtención de características geomorfológicas e hidrogramas unitarios a partir de un modelo digital del terreno. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia.
- U.S. Army Corps of Engineers, 1991. Manual for the Geographical Resources Analysis Support System GRASS. Version 4.0. CERL ADP Report N-87/22. July 1991.

CALIDAD Dragados



*Acondicionamiento del Tramo
Urbano del Río Genil. Granada*



Presa de Jaraíz de la Vera. Cáceres



Depuradora de As Pontes. La Coruña



Dragados

Pº Alameda de Osuna, 50 - 28042 Madrid - Tfno.: 583 30 00 - Fax: 742 77 53



SAINCO

Ingeniería dedicada al Desarrollo e Integración de Sistemas Electrónicos e Informáticos



SISTEMAS DE SUPERVISION Y CONTROL PARA APLICACIONES DE AGUA

- Gestión de Recursos Hidráulicos
- Teledetección
- Calidad del Agua
- Control en los Abastecimientos
- Automatización de E.T.A.P. y E.D.A.R.
- Gestión Documental y Sistema de Información Geográfica

SAINCO

ESPAÑA:

Los Vascos, 17
28040 MADRID
Tlf.: (91) 554 58 00
Fax: (91) 535 22 85

Tamarguillo, 29
41006 SEVILLA
Tlf.: (95) 492 09 92
Fax: (95) 492 39 21
(95) 466 08 53

CONO SUR:

C/ Treinta y tres, 1283
MONTEVIDEO
URUGUAY
Tlf.: 598-2-96 10 85
598-2-96 12 88
Fax: 598-2-96 11 44

BST

BRASIL:

Estr. do Camorim, 633
CEP 227-80-070
RIO DE JANEIRO
Tlf.: 55-21-441 10 10
Fax: 55-21-441 20 37

SAINCOMEX

MEXICO:

Lope de Vega, 117
Desp. 103 Col. Polanco
C.P. 11560 MEXICO D.F.
Tlf.: 52-5-255 22 57
52-5-255 21 97
Fax: 52-5-254 30 65