



ur agentzia  
agencia vasca del agua

## **Anejo I. Modelo TETIS. Manual de usuario y modelo conceptual**



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente**

**MANUAL DEL USUARIO**  
***PROGRAMA TETIS v. 8.1***

**Valencia, Marzo de 2012**

**Director del proyecto TETIS:**

Félix Francés García

Correo electrónico: ffrances@hma.upv.es

**Equipo de desarrollo del código de programa:**

Jaime Ignacio Vélez Upegui

Jorge Julián Vélez Upegui

Juan José Montoya Monsalve

Juan Camilo Múnera Estrada

Chiara Medici

Gianbattista Bussi

Joaquín Real Llanderal

**Autores del documento:**

Félix Francés García

Jorge Julián Vélez Upegui

Juan Camilo Múnera Estrada

Chiara Medici

Joaquín Real Llanderal

Universidad Politécnica de Valencia

Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente

Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida

<http://lluvia.dihma.upv.es/>

Derechos reservados. El software al que hace referencia este documento es de libre distribución. Sin embargo, se ruega que cualquier uso del programa y/o de este documento sea convenientemente citado.

## **TABLA DE CONTENIDOS**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.- INTRODUCCIÓN.....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2.- FICHEROS Y FORMATOS .....</b>                                       | <b>3</b>  |
| 2.1.- Fichero “FILESSP.TXT” .....  | 4         |
| 2.2.- Fichero “FILESVEG.TXT” .....   | 5         |
| 2.3.- Fichero “PARAMGEO.TXT” .....   | 6         |
| 2.4.- Fichero “SETTINGS.TXT” .....   | 8         |
| 2.5.- Fichero “CALIB.TXT” .....  | 9         |
| 2.6.- Información a nivel de celda .....                                   | 11        |
| 2.7.- Fichero “CONTROL.TXT” .....  | 15        |
| 2.8.- Estado de almacenamiento inicial .....                               | 15        |
| 2.9.- Información del FICHERO DE ENTRADA.....                              | 17        |
| 2.10.- Datos relacionados con los embalses .....                           | 22        |
| 2.11.- Fichero “Factoretmes.txt” .....                                     | 22        |
| 2.12.- Fichero con los aportes por Riego.....                              | 23        |
| 2.13.- Fichero “manatial.TXT” .....  | 24        |
| 2.14.- Ficheros con la información de mapas .....                          | 24        |
| <b>3.- GENERACIÓN DEL FICHERO TOPOLCO .....</b>                            | <b>29</b> |
| <b>4.- RECORTE DE LA ZONA AGUAS ARRIBA DE LOS EMBALSES .....</b>           | <b>31</b> |
| 4.1.- Ficheros de datos.....   | 31        |
| 4.2.- Ficheros de salida.....  | 32        |
| <b>5.- ESTADO DE ALMACENAMIENTO INICIAL.....</b>                           | <b>33</b> |
| 5.1.- Estado de almacenamiento inicial en la cuenca .....                  | 33        |
| <b>6.- INTERPOLACIÓN DE LA ALTURA EQUIVALENTE DE LA CAPA DE NIEVE.....</b> | <b>35</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.1.- Información de entrada .....   | 35        |
| 6.1.1.- Fichero “FILESSP.TXT“ .....  | 35        |
| 6.1.2.- Información del episodio.....                                      | 35        |
| 6.1.3.- Parámetros del modelo de fusión de nieve.....                      | 36        |
| 6.1.4.- Información de topología y edafología .....                        | 36        |
| 6.1.5.- Fichero con la información sobre la localización de la nieve ..... | 36        |
| 6.2.- Información de salida.....   | 37        |
| <b>7.- MODELO DE SIMULACIÓN TETIS.....</b>                                 | <b>39</b> |
| 7.1.- Información de entrada .....   | 39        |
| 7.2.- Resultados .....   | 41        |
| 7.2.1.- Series temporales simuladas .....                                  | 41        |
| 7.2.2.- Estado de almacenamiento final.....                                | 45        |
| 7.2.3.- Estado inicial y final de la capa de nieve .....                   | 45        |
| <b>8.- OPTIMIZACIÓN AUTOMÁTICA.....</b>                                    | <b>47</b> |
| 8.1.- Información de entrada .....   | 47        |
| 8.1.1.- Fichero “MULTIEVENTO.TXT” .....                                    | 48        |
| 8.1.2.- La función objetivo .....  | 49        |
| 8.1.3.- Fichero “UMBRALESQ.TXT” .....                                      | 50        |
| 8.1.4.- Fichero “VAR-SCEUA.TXT” .....                                      | 51        |
| 8.2.- Resultados .....   | 53        |
| <b>9.- MÓDULOS VARIOS.....</b>   | <b>55</b> |
| 9.1.- Configuración Inicial. ....  | 55        |
| 9.1.1.- Directorios y Ficheros .....                                       | 55        |
| 9.1.2.- Configuración de información .....                                 | 56        |
| 9.2.- Visualización Inicial.....   | 58        |
| 9.2.1.- El fichero episodio .....  | 58        |

|  |           |
|--|-----------|
| 9.2.2.- Estaciones en la cuenca.....                               | 58        |
| 9.2.3.- Visualización de mapas.....                                | 59        |
| 9.3.- Modificación de los Parámetros geomorfológicos.....          | 61        |
| 9.4.- Modificación de los Factores Correctores de Calibración..... | 62        |
| 9.5.- Definición del Contorno Inicial de Nieve.....                | 63        |
| 9.6.- Recuperación de factores y Parámetros anteriores.....        | 64        |
| 9.7.- Visualización de los resultados.....                         | 64        |
| 9.7.1.- Fichero de resultados de simulación.....                   | 64        |
| 9.7.2.- Gráficos de precipitación.....                             | 65        |
| 9.7.3.- Gráficos totales.....                                      | 66        |
| 9.7.4.- Gráficos de resultados.....                                | 68        |
| 9.8.- El área de la cuenca.....                                    | 68        |
| 9.9.- Ejecuciones Múltiples.....                                   | 69        |
| 9.10.- Eliminar Ficheros temporales.....                           | 70        |
| <b>10.- CASOS DE ESTUDIO.....</b>                                  | <b>71</b> |
| <b>11.- CÓDIGOS DE ERRORES.....</b>                                | <b>73</b> |

# 1.- INTRODUCCIÓN

Este documento pretende suministrar una guía general acerca del funcionamiento y operación del programa de simulación hidrológica TETIS versión 8.1, incluyendo los respectivos módulos o subprogramas incluidos en el mismo.

En términos generales, los aspectos en los cuales se hace énfasis para realizar un estudio hidrológico en cuencas naturales son los siguientes:

- i) Creación de un fichero único con la información propia a cada celda, se incluye básicamente la información de topología, edafología y algunas características relacionadas a la geomorfología, la evapotranspiración y el riego.
- ii) Generación de un estado de almacenamiento inicial (estado inicial para las simulaciones), el cual puede ser igual para toda la cuenca o puede ser el estado final en los almacenamientos de un período previo a la simulación.
- iii) Establecer la altura equivalente de agua inicial en las zonas (celdas) donde existe una capa de nieve. Este valor se incluye dentro del modelo de simulación con el fin de involucrar el proceso de fusión de nieve. Del mismo modo, el modelo permite seleccionar una zona cubierta por nieve.
- iv) Recorte de información de la cuenca, lo cual reduce los tiempos de ejecución del modelo y facilita el uso de algoritmos de optimización automática. Este recorte de información ha sido incluido para eliminar las zonas aguas arriba a los embalses que afectan a los resultados aguas abajo del mismo.
- v) Simulación de eventos de crecida y simulación continua, mediante el modelo TETIS. El programa permite una calibración manual.
- vi) Obtención automática de los factores correctores, el factor de interpolación de lluvia y los estados iniciales en los almacenamientos mediante la técnica de optimización automática del SCE-UA.

Los módulos anteriores conforman lo que se ha denominado modelo TETIS versión 8.1, desarrollado para la simulación hidrológica, en donde, las crecidas pueden ser originadas tanto por fuertes precipitaciones como por la fusión de nieve. Del mismo modo, este modelo sirve para la simulación de recursos hídricos. Por lo que se considera una herramienta útil para el análisis y la planificación y gestión de los recursos hidráulicos en cuencas naturales.

La modelación hidrológica hace uso de varias componentes y requiere de algunos pasos previos, por lo que pueden ser necesarias herramientas adicionales para iniciar el análisis hidrológico con el programa TETIS v. 8.1. Algunas de estas herramientas se describen brevemente en este informe.

El objetivo final de este manual es proporcionar al usuario las nociones necesarias para el manejo de los diferentes subprogramas incluidos en el programa TETIS. A este propósito los errores detectados durante el proceso de ejecución serán almacenados, con una pequeña descripción, en el fichero "ERRORES.TXT" creado por el mismo programa. Este fichero proporcionará al usuario información útil acerca del fallo ocurrido. Este fichero se encontrará vacío si se ha realizado una ejecución normal del programa TETIS.

Para un mejor entendimiento del presente informe se debe distinguir entre:

- a) Los **parámetros** del modelo, estimados o calibrados previamente. Son valores propios para cada celda (características del suelo) o región de la cuenca (parámetros de propagación) y sólo es posible modificarlos cuando se dispone de un estudio actualizado con nuevos valores regionales.
- b) Los **factores correctores de calibración**, corresponden a factores que multiplican los parámetros del modelo. Se pueden actualizar en cada ejecución del programa y deberían ser propios de cada cuenca, aunque hay que tener en cuenta que pueden estar fuertemente condicionados por el evento de crecida o por el periodo de datos observados que se trata de reproducir en calibración.
- c) Los **valores iniciales de las variables de estado** del modelo. Inicialmente se adopta como valor inicial para los distintos almacenamientos definidos en cada celda, el mismo valor para toda la cuenca.
- d) El **factor de interpolación de la lluvia**, es un parámetro adicional a calibrar. Este parámetro afecta a los valores de la lluvia en aquellos casos en los cuales ha sido identificada una relación entre la altura sobre el nivel del mar y la cantidad de lluvia. Está dado en (mm/mm).

El programa ejecutable suministrado es TETISv81.EXE. El fichero ejecutable puede localizarse en cualquier parte del disco duro. Sin embargo, debe estar acompañado del fichero "FILESSP.TXT" y "FILESVEG.TXT" (si además se desea simular sedimentos también se tiene que incluir el fichero "FILESSSED.TXT") ya que dentro de este fichero se encuentra la dirección o "Path" donde se localizan y almacenan los ficheros necesarios al funcionamiento del programa y los nombres de los mismos.

Se recomienda localizar el programa ejecutable (y ficheros FILESSP.TXT, FILESVEG.TXT y \*.jpg) en un directorio principal, diferente al lugar donde se encuentren los subdirectorios con los demás ficheros de datos de la(s) cuenca(s) a modelar.

El flujo de información con el usuario y entre los diferentes programas se realiza mediante ficheros en formato ascii. Existen ficheros de entrada de datos comunes a más de una subrutina del programa. El formato de lectura de todos los ficheros es libre. Todos estos ficheros con un ejemplo se describen en el siguiente capítulo.

## 2.- FICHEROS Y FORMATOS

En este capítulo se describen los ficheros necesarios para la ejecución del modelo de simulación hidrológica TETIS v.8.1. Algunos de estos ficheros deben ser suministrados al programa con un formato específico, por esta razón se realizará una descripción y se proporcionará un ejemplo para cada uno de ellos.

En la Tabla 1 se da una descripción general de los ficheros utilizados por el programa TETIS v.8.1; los ficheros que aparecen en **negrita** son los indispensables para la ejecución de una simulación hidrológica.

| NOMBRE DEL FICHERO         | Necesario para la ejecución inicial (Si/No) | Generado por TETIS (Si/No) | Tipo de formato o Fuente  |
|----------------------------|---|----------------------------|---------------------------|
| <b>FILESSP.TXT</b>         | Si  | Si                         | Texto                     |
| <b>FILESVEG.TXT</b>        | Si  | Si                         | Texto                     |
| <b>PARAMGEO.TXT</b>        | Si  | Si                         | Texto                     |
| <b>SETTINGS.TXT</b>        | Si  | Si                         | Texto                     |
| <b>CALIB.TXT</b>           | Si  | Si                         | Texto                     |
| TOPOLCO.SDS                | No  | Si                         | Celda por fila            |
| HANTEC.SDS                 | No  | Si                         | Celda por fila            |
| FactorETmes.TXT            | Si  | Si                         | Texto                     |
| CurvasHV.TXT               | Si (hay embalses)                           | No                         | Texto                     |
| <b>Fichero entrada.txt</b> | Si  | No                         | Columna/CEDEX             |
| HANTEC2.SDS                | No  | Si                         | Celda por fila            |
| <b>Fichero salida.txt</b>  | No  | Si                         | Columna/CEDEX             |
| NIEVE.ASC                  | Si (existe nieve)                           | Si                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| NIEVE2.ASC                 | No  | Si                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>MED.ASC</b>             | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Hu.ASC</b>              | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Ks.ASC</b>              | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Kp.ASC</b>              | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Kss.ASC</b>             | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Ksa.ASC</b>             | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>Kps.ASC</b>             | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>VEL.ASC</b>             | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>HSTAR.ASC</b>           | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| COBVEG.ASC                 | Si (se incluye ET variable)                 | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>SLOPE.ASC</b>           | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>DIRFLUJO.ASC</b>        | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| <b>ACUM.ASC</b>            | Si  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| RIEGO.ASC                  | Si (existe riego)                           | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| CONTROL.TXT                | No  | Si                         | Texto                     |
| RIEGOS.TXT                 | Si (hay riego)                              | No                         | Texto                     |
| RECORTA.TXT                | Si (existen embalses)                       | No                         | Texto                     |
| REGHOMOG.ASC               | Si (en caso que existan)                    | No                         | Export. ArcInfo o ArcInfo |
| PPTACUM.ASC                | No  | Si                         | Export. ArcInfo o ArcInfo |
| VAR-SCEUA.TXT              | No  | Si                         | Texto                     |
| RES-SCEUA.TXT              | No  | Si                         | Texto                     |
| MULTIPLE.TXT               | No  | No                         | Texto                     |
| MULTICALIB.TXT             | No  | No                         | Texto                     |
| UMBRALESQ.TXT              | No  | No                         | Texto                     |
| MULTIEVENTO.TXT            | No  | Si                         | Columna/CEDEX             |
| WARNINGHANTEC.TXT          | No  | Si                         | Texto                     |
| MANANTIALES.TXT            | Si (se incluye karst)                       | No                         | Texto                     |
| KARST.ASC                  | Si (se incluye karst)                       | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |
| MAXT3.ASC                  | No  | No                         | Export. ArcInfo o ArcView |

**Tabla 1. Características principales de los ficheros empleados por el modelo TETIS.  
En negrita los ficheros mínimos necesarios para la ejecución.**

A modo de sugerencia, a los ficheros que contienen factores correctores, parámetros, niveles, tablas, curvas y puntos de control se le ha asignado una extensión \*.TXT. A los ficheros asociados a la topología y al almacenamiento del suelo se le ha asignado una extensión \*.SDS y finalmente a los ficheros con la información de los mapas en formato ráster se le ha asignado la extensión \*.ASC, puesto que se trata de ficheros de exportación tipo ASCII de ArcView o ArcInfo.

## 2.1.- FICHERO "FILESSP.TXT"

Fichero que contiene un listado con los nombres de los ficheros a utilizar durante la ejecución del modelo TETIS. La primera línea de este fichero corresponde a la ubicación del directorio de trabajo, en donde se localizan los ficheros de datos. Un ejemplo se muestra en la Tabla 2, destacando en negrita la explicación para cada línea.

|                      |  |
|----------------------|--|
| D:\TETIS8_esejemplo\ | <b>Nombre del directorio donde se encuentran estos ficheros</b>  |
| PARAMGEO.TXT         | <b>Los parámetros geomorfológicos y áreas umbrales</b>   |
| CALIB.TXT            | <b>Los factores correctores</b>  |
| TOPOLCO.SDS          | <b>La topología y propiedades del suelo</b>  |
| HANTEC.SDS           | <b>Los almacenamientos antecedentes</b>  |
| Entrada.txt          | <b>Series temporales de variables hidrometeorológicas relativos al episodio o periodo a simular</b>                        |
| FactorETmes.TXT      | <b>Los valores mensuales de reducción de la ET <math>\lambda(t)</math> y la interceptación máxima en la última columna</b> |
| CurvasHV.TXT         | <b>La curva altura, volumen, superficie y desagüe</b>  |
| HANTEC2.SDS          | <b>El estado final de almacenamiento</b>   |
| Fichero salida.txt   | <b>Resultados de la simulación</b>   |
| NIEVE.ASC            | <b>La información inicial de celdas con nieve</b>  |
| NIEVE2.ASC           | <b>La información final de celdas con nieve</b>  |
| MED.ASC              | <b>El Modelo de Elevación Digital</b>  |
| HU.ASC               | <b>La capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo (Hu)</b>                                   |
| KS.ASC               | <b>La capacidad de infiltración del suelo (ks)</b>   |
| KP.ASC               | <b>La capacidad de percolación del sustrato (kp)</b>   |
| COBVEG.ASC           | <b>Los índices de cobertura vegetal para la ET</b>   |
| SLOPE.ASC            | <b>La pendiente (m/m)</b>  |
| DIRFLUJO.ASC         | <b>La dirección del flujo según ArcInfo</b>  |
| ACUM.ASC             | <b>Las celdas acumuladas</b>   |
| RIEGO.ASC            | <b>Los índices de Regadío en formato ráster</b>  |
| CONTROL.TXT          | <b>Los puntos de control del episodio</b>  |
| RIEGOS.TXT           | <b>La cantidad y duración de cada índice de Regadío</b>  |
| RECORTA.TXT          | <b>Los embalses que se desean recortar aguas arriba</b>  |
| REGHOMOG.ASC         | <b>Las regiones homogéneas en formato ráster</b>   |
| PPTACUM.ASC          | <b>La lluvia acumulada en formato ráster</b>   |
| VAR-SCEUA.TXT        | <b>Los rangos y valores iniciales de la optimización</b>   |
| RES-SCEUA.txt        | <b>Los Resultados de la optimización automática</b>  |
| MapaFCs.asc          | <b>Diferentes zonas de Factores correctores</b>  |
| Ordenriego.asc       | <b>Orden para el regadío</b>   |
| KSS.ASC              | <b>La conductividad hidráulica para el interflujo, definida por la estructura de macroporos del mismo</b>                  |
| KSA.ASC              | <b>La conductividad hidráulica saturada del acuífero</b>   |
| KPS.ASC              | <b>La capacidad de pérdidas del acuífero</b>   |
| VEL.ASC              | <b>La velocidad del flujo superficial en la ladera</b>   |

|                 |   |
|-----------------|---|
| SETTINGS.TXT    | Fichero de variables lógicas con las posibles opciones de configuración de formatos de entrada y salida, y elección de simulación de otros procesos |
| MANANTIALES.TXT | Fichero con los datos de los manantiales  |
| KARST.ASC       | Mapa de código 0 para las celda no-karst y 1 para las celdas karst  |
| MAXT3.ASC       | Capacidad maxima en % de Hu para el tanque gravitacional T3   |

**Tabla 2. Fichero “FILESSP.TXT” con la información de los ficheros de datos a utilizar dentro del modelo TETIS.**

El nombre del fichero “FILESSP.TXT” es fijo y no puede ser modificado por el usuario. En caso que no exista este fichero el modelo TETIS lo genera, pero con nombres asignados en forma automática que deben ser corregidos por el usuario mediante la opción del Menú:

### **Configuración inicial / Directorio y Ficheros**

Una descripción mas detallada de esta opción se expone mas adelante en este informe.

Por lo que concierne los mapas de conductividades hidráulicas horizontales KSS.ASC y KSA.ASC a falta de información más precisa, se utiliza el mismo mapa obtenido para la capacidad de infiltración gravitacional KS.ASC y KP.ASC. Por lo que concierne la estimación de los valores del mapa KPS.ASC a falta de información más precisa, se estima como un décimo de la tasa de percolación KP.ASC.

Para los ficheros de inputs con la información del episodio o del periodo a simular, tanto en formato columna como en formato CEDEX es posible utilizar cualquier nombre, siendo aconsejable un máximo de 50-60 caracteres (incluidos los espacios blancos).

## **2.2.- FICHERO “FILESVEG.TXT”**

Fichero que contiene un listado con los nombres de ficheros necesarios para la ejecución del modulo de vegetación dinámica (si el usuario selecciona esa opción) que de momento no está operativo para la versión v.8.1 del modelo TETIS. Un ejemplo se muestra en la Tabla 3, destacando en negrita la explicación para cada línea.

|              |   |
|--------------|---|
| HSTAR.ASC    | El contenido óptimo de humedad en el suelo ( $H^*$ ) en mm  |
| DC.ASC       | Almacenamiento máximo en los charcos (desactivado)  |
| RS.ASC       | Relación entre la profundidad de la capa superior del suelo ( $Z_{ss}$ ) y la profundidad de raíces ( $Z_e$ ) |
| VEGANTEC.SDS | Condiciones iniciales para la vegetación  |
| INS.ASC      | Factor de insolación  |

**Tabla 3. Fichero “FILESVEG.TXT” con la información de los ficheros adicionales de datos a utilizar dentro del modelo TETIS v 8.1 y para la simulación de la vegetación estática.**

El mapa HSTAR.ASC es necesario para el correcto funcionamiento del programa aunque no se seleccione la opción de vegetación dinámica, sin embargo puede ser un mapa de ceros si no se dispone de la información suficiente para estimar el contenido óptimo de la humedad del suelo según la cobertura.

El nombre del fichero "FILESVEG.TXT" es fijo y no puede ser modificado por el usuario. En caso que no exista este fichero el modelo TETIS lo genera, pero con nombres asignados en forma automática que deben ser corregidos por el usuario mediante la opción del Menú:

### **Configuración inicial / Directorio y Ficheros de vegetación**

#### **2.3.- FICHERO "PARAMGEO.TXT"**

Este fichero contiene, entre otros valores, los parámetros geomorfológicos necesarios para realizar la propagación del flujo a lo largo de cauces y cárcavas de la cuenca en el modelo de simulación. Estos parámetros deben ser estimados:

- i) a partir de estudios regionales de la geomorfología de la cuenca.
- ii) con base en valores regionales obtenidos en la literatura.

Esta información se suministra para cada una de las regiones homogéneas (o subcuencas) presentes en la cuenca. En la Tabla 4 se presenta el fichero "PARAMGEO.TXT" en donde se puede observar el formato. Además, se incluye con carácter informativo el rango de valores que pueden tomar cada uno de los parámetros geomorfológicos.

Para limitar el tiempo de cálculo en las interpolaciones espaciales de datos puntuales, también es necesario indicar el número máximo de estaciones cercanas a considerar. También se requiere de un indicador lógico que señala si la interpolación es realizada para cada intervalo temporal o no. En la misma fila del fichero se requiere una segunda variable lógica que determina, en el caso de utilizar un factor  $\beta$  para incrementar la precipitación con la altura, si se va a utilizar la expresión de incremento lineal o la expresión de incremento proporcional a la cantidad de precipitación observada.

Luego se incluyen los valores con los cuales es posible estimar un estado inicial para los diferentes almacenamientos, teniendo en cuenta que los almacenamientos serán iguales en toda la cuenca:

- i) Almacenamiento estático inicial en el suelo (dado en porcentaje del almacenamiento estático máximo)
- ii) Cantidad inicial de agua en superficie o ladera (dado en mm)
- iii) Almacenamiento gravitacional en el suelo (dado en mm)
- iv) Estado inicial en el acuífero (dado en mm)

- v) Estado inicial en los cauces (dado como un porcentaje del caudal geomorfológico conocido como a sección llena)
- vi) Estado inicial en los tanques de interceptación por la vegetación (dado como un porcentaje de la máxima cantidad que puede ser interceptada)

En la Tabla 4 se incluye a modo informativo y entre paréntesis el rango factible de estos valores.

Luego se incluyen los valores de dos variables que en la actualidad están desactivadas en el modelo, pero que en un futuro se pueden activar y por tal razón no se han eliminado.

Siguen los valores (en km<sup>2</sup>) que determinan las áreas umbrales para el interflujo (comienzo de las cárcavas) y para el flujo base (límite también entre cárcavas y cauces).

Este fichero es necesario desde el inicio para que funcione el programa, sin embargo si no existe el modelo TETIS lo genera, pero con nombres asignados en forma automática que deben ser corregidos por el usuario mediante la opción del Menú:

**Simulación / Modificar los Parámetros Geomorfológicos**

| REGION 1 | REGION 2 | RANGO DE VALORES | DESCRIPCIÓN  |
|----------|----------|------------------|--|
| 2        |          |                  | Número de regiones de parámetros homogéneos  |
| 0.60     | 0.60     | [0.5-0.75]       | Coefficiente $\kappa$ cauce  |
| 0.75     | 0.75     | [0.5-0.9]        | Exponente $\varphi$ cauce  |
| 3.26     | 3.26     | [0.5-5.75]       | Coefficiente $c_1$ cauce   |
| 0.50     | 0.50     | [0.40-0.75]      | Exponente $\epsilon_1$ cauce   |
| 0.20     | 0.20     | [0.04-0.3]       | Exponente $\epsilon_2$ cauce   |
| 20.0     | 20.0     | [0.5-50.0]       | Coefficiente $c_d$ cauce   |
| 1.00     | 1.00     | [0.5-2.75]       | Exponente $\theta$ cauce   |
| 0.047    | 0.047    | [0.01-0.1]       | Coefficiente $c_n$ cauce   |
| 0.167    | 0.167    | [0.1-0.35]       | Exponente $\xi$ cauce  |
| 0.60     | 0.60     | [0.5-0.75]       | Coefficiente $\kappa$ cárcava  |
| 0.75     | 0.75     | [0.5-0.9]        | Exponente $\varphi$ cárcava  |
| 3.26     | 3.26     | [0.5-5.75]       | Coefficiente $c_1$ cárcava   |
| 0.50     | 0.50     | [0.40-0.75]      | Exponente $\epsilon_1$ cárcava   |
| 0.20     | 0.20     | [0.04-0.3]       | Exponente $\epsilon_2$ cárcava   |
| 20.0     | 20.0     | [0.5-50.0]       | Coefficiente $c_d$ cárcava   |
| 1.00     | 1.00     | [0.5-2.75]       | Exponente $\theta$ cárcava   |
| 0.047    | 0.047    | [0.01-0.1]       | Coefficiente $c_n$ cárcava   |
| 0.167    | 0.167    | [0.1-0.35]       | Exponente $\xi$ para cárcava   |
| 6        | T        | T                | Número de estaciones cercanas para interpolar y ¿Desea interpolar en cada intervalo de tiempo? ¿Desea incrementar la precipitación con la cota usando la expresión lineal? |
| 35.0     | 30.0     | [0-100]          | Almacenamiento estático (% Alm. Máximo)  |
| 10.0     | 10.0     | [0-10]           | Cantidad inicial de agua en ladera (mm)  |
| 35.0     | 30.0     | [0-10]           | Almacenamiento gravitacional del suelo (mm)  |
| 10.0     | 10.0     | [0-100]          | Cantidad inicial en el acuífero (mm)   |
| 0.0      | 0.0      | [0-500]          | Estado inicial de los cauces (% Q secc. llena)   |
| 0.0      | 0.0      | [0-100]          | Estado inicial interceptación (% Alm. Máximo)  |
| 0.00     | 0.00     |                  | Factor evaporación subsuelo (desactivado) (mm)   |
| 0.01     | 0.01     |                  | Factor para surcos (desactivado)   |
| 0.01     | 0.01     |                  | Área umbral para interflujo (km <sup>2</sup> )   |
| 15.35    | 15.35    |                  | Área umbral para flujo base (km <sup>2</sup> )   |

**Tabla 4. Descripción del fichero "PARAMGEO.TXT".**

En caso que no exista este fichero el modelo TETIS lo genera, pero con valores que deben ser corregidos por el usuario mediante la opción del Menú:

### **Simulación / Modificar los Parámetros Geomorfológicos**

Una descripción mas detallada de esta opción se expone mas adelante en este informe.

#### **2.4.- FICHERO “SETTINGS.TXT”**

Este fichero contiene las variables lógicas de configuración del modelo. Se trata de siete variables lógicas, tipo verdadero (T) o falso (F), que indican el tipo de configuración dada para los datos de entrada/salida, y otras opciones del modelo y que dan respuesta a las siguientes preguntas:

- i) ¿Los mapas tiene formato de exportación de ArcInfo o ArcView
- ii) ¿El episodio esta dado en formato columna? En caso contrario se trata del formato propuesto por el CEDEX
- iii) ¿Los resultados del modelo los desea en formato columna? En caso contrario se trata del formato propuesto por el CEDEX
- iv) ¿La opción de erosión y sedimentos está activada? Si la respuesta es no, el programa simula solo la hidrología
- v) ¿La opción de modelación dinámica de la vegetación está activada? Si la respuesta es no, el programa considera la modelación estática de la vegetación
- vi) ¿La opción ‘*Trap Efficiency*’ para el modulo de sedimentos está activada?
- vii) ¿Se desea usar la calibración automática multi-evento en lugar de la continua?

Este fichero es necesario desde el inicio para que funcione el programa, sin embargo si no existe viene generado por el modelo TETIS con una configuración por defecto según esta secuencia: T T T F F F F. Esto significa que por defecto el programa va a considerar que el formato de los mapas de entrada y salida sea el .ASC, que el formato del fichero de inputs será en columnas como también el formato del fichero de salida. Además por defecto no estará activada ni la simulación de sedimentos, ni el modulo de vegetación dinámica. Finalmente por defecto la opción *Trap Efficiency* estará desactivada como también la opción de calibración automática multi-evento.

El usuario puede modificar la configuración de las primeras 5 variables lógicas que viene por defecto al no existir el fichero settings.txt a través de la opción del menú:

### **Configuración Inicial / Configuración de información**

Para modificar las últimas dos variables lógicas en el caso la opción *Trap Efficiency* tiene que estar activa (T) la opción de erosión y sedimentos, mientras que la calibración multi-evento se activa desde el menú:

### **Optimización automática (SCE-UA) / Hidrología**

#### **2.5.- FICHERO “CALIB.TXT”**

Este fichero contiene, entre otras variables, los factores correctores del modelo TETIS. Sin embargo, todas estas variables son susceptibles de ser calibradas. La información incluida en este fichero consiste en:

- i) Los factores de calibración que afectan directamente a los parámetros estimados (por lo que deben ser cercanos a la unidad) son los siguientes:
  - a) Almacenamiento estático [FC-1]
  - b) Evapotranspiración [FC-2]
  - c) Infiltración [FC-3]
  - d) Percolación [FC-4]
  - e) Velocidad de la onda cinemática [FC-9]
- ii) Factores de calibración que conservan la distribución espacial de los parámetros pero se utilizan en la simulación de otros fenómenos hidrológicos son:
  - a) Velocidad de la Escorrentía directa [FC-4]
  - b) Velocidad del Flujo subsuperficial [FC-6]
  - c) Velocidad del Flujo base [FC-8]
- iii) Un coeficiente de pérdidas subterráneas, para cerrar el balance de la cuenca [FC-7]
- iv) Un coeficiente para la interpolación de la altura equivalente de agua debida a la existencia de una capa de nieve. El proceso de interpolación tiene en cuenta dentro de sus cálculos la altura sobre el nivel del mar, en donde a mayor altura hay un aumento en la altura equivalente de agua.
- v) Dos coeficientes para el proceso de fusión de nieve. El primero de ellos tiene en cuenta sólo la fusión debida al derretimiento de nieve por la radiación recibida a lo largo del día, y el segundo coeficiente considera la presencia de lluvia como una fuente calorífica adicional para la fusión de la nieve.

- vi) Temperatura base para el inicio de la fusión de nieve. Este valor representa el umbral a partir del cual se inicia la fusión de la nieve o la acumulación de la lluvia en forma de nieve.
- vii) El factor de interpolación de la precipitación con la elevación. Corresponde al factor  $\beta$  empleado en la interpolación de la lluvia y que está dado en mm/m.
- viii) Factores correctores del modulo de sedimentos y erosión (solo se activan si se selecciona la opción de simulación de sedimentos)
- ix)
  - a) Factor corrector de erosión en ladera
  - b) Factor corrector de la capacidad de transporte de sedimentos en cárcavas
  - c) Factor corrector de la capacidad de transporte de sedimentos en cauce
- x) Exponente para la expresión de infiltración al tanque estático (ver manual teórico del modelo, capítulo 3.2.2.)
- xi) Factor corrector para la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional dada como porcentaje de la capacidad máxima del almacenamiento estático.

Estos factores y parámetros corresponden a los valores a estimar dentro del proceso de calibración, de tal forma que se obtenga el conjunto de valores que represente adecuadamente el comportamiento de la cuenca ante un evento o periodo observado y de esta forma sea posible una buena modelación de los diferentes procesos del ciclo hidrológico en cuencas naturales.

Si el exponente para la infiltración al tanque estático es cero la expresión para la infiltración en uso en esta versión del modelo Tetis es idéntica a la de las versiones anteriores. Un exponente igual a cero hace que para que el agua empiece a moverse en el suelo el tanque estático  $T_1$  tiene que haber superado su capacidad máxima. Un exponente superior a 0 significa que el agua empezará a moverse en el suelo antes de que se supere la capacidad máxima del tanque estático  $T_1$ . De esta manera se quiere tener en cuenta también el flujo a través de los macroporos. Por lo tanto, esto hará que la cuenca responda antes y que más agua esté disponible para dar lugar a escorrentía directa, interflujo y flujo base.

La capacidad máxima del tanque gravitacional  $T_3$  se ha introducido para representar el mecanismo de Dunne de producción de escorrentía. Esto hace que cuando el suelo esté saturado el agua que cae escurra como escorrentía directa aunque no se haya superado la capacidad de infiltración de ese suelo. Si el usuario desea omitir este mecanismo es suficiente con que no incluya el mapa MAXT3.ASC, de este modo el programa adoptará un porcentaje muy alto (10000% de  $H_u$ ) para definir la capacidad máxima del tanque gravitacional. De la misma forma, si no se quiere activar el mecanismo de producción de escorrentía superficial de Dunne, el factor corrector correspondiente

deberá ser  $\geq 1$ . Las simulaciones así obtenidas serán compatibles con las obtenidas por versiones anteriores donde no se incluya el mecanismo de Dunne.

Este fichero es indispensable para la ejecución del programa TETIS. En caso que no exista es generado por el modelo, pero con valores que deben ser corregidos por el usuario mediante la opción del Menú:

### **Simulación / Cambiar Factores Correctores de Calibración**

Una descripción mas detallada de esta opción se expone mas adelante en este informe.

En la Tabla 5 se presenta un ejemplo del fichero “CALIB.TXT” y su formato. Adicionalmente, se indica una descripción y el rango entre los cuales es factible encontrar estos valores.

| FACTORES MULTIPLICADORES PARA LOS PARÁMETROS DEL SUELO<br>FACTOR | DESCRIPCIÓN   | RANGO                 |
|--|---|-----------------------|
| 0.928099   | Almacenamiento Capilar  | [ $\approx$ 1.0]      |
| 1.000000   | Evaporación   | [ $\approx$ 1.0]      |
| 0.019999   | Infiltración  | [ $\approx$ 1.0]      |
| 0.135900   | Escorrentía directa   | [0.001-10.0]          |
| 0.400000   | Percolación   | [ $\approx$ 1.0]      |
| 10.000000  | Flujo subsuperficial  | [0.001-5000]          |
| 6.413499   | Pérdidas subterráneas   | [ $\approx$ 0.0]      |
| 520.2517   | Flujo base  | [0.001-50000]         |
| 0.363000   | Velocidad del flujo   | [ $\approx$ 1.0]      |
| 1.000000   | Coefficiente Beta para interpolar<br>la altura de nieve con la cota         | [ $\approx$ 0.0-10.0] |
| 1.000000   | Coefficiente de fusión de nieve<br>sin lluvia                               | [ $\approx$ 1.0-3.0]  |
| 1.000000   | Coefficiente de fusión de nieve<br>incluyendo la lluvia                     | [ $\approx$ 3.0-6.0]  |
| 1.000000   | Temperatura base de fusión de nieve   | [-2.0-4.0]            |
| 0.000000   | Factor interpolación de PPT (mm/m)  | [-0.2-0.2]            |
| 0.77609  | Factor corrector de erosión en ladera                                       |                       |
| 0.04000  | Factor corrector de la capacidad de<br>transporte de sedimentos en cárcavas |                       |
| 9.80000  | Factor corrector de la capacidad de<br>transporte de sedimentos en cauce    |                       |
| 0.0000   | Exponente para la ecuación de infiltración<br>al tanque estático            | [0.0-3.0]             |
| 30.0   | Porcentaje de Hu que define la capacidad<br>máxima del tanque gravitacional | [0.0-1000000.0]       |

**Tabla 5. Descripción del fichero “CALIB.TXT”.**

## **2.6.- INFORMACIÓN A NIVEL DE CELDA**

La información que requiere un modelo de simulación es extensa y variada. En especial la información en forma de mapas ráster, al tratarse de matrices, puede llegar a tener gran cantidad de datos que no es utilizada, lo cual hace el modelo más ineficiente en cuanto a tiempo de ejecución y capacidad de almacenamiento. Por estos motivos se decide agrupar la información de los diferentes mapas para cada celda en un único fichero y con un formato propio del modelo TETIS.

Este fichero generado por el programa se denomina “TOPOLCO.SDS” (Tabla 6) y consta básicamente de los datos topológicos, edafológicos, zonas de nieve, zonas

geomorfológicamente homogéneas, zonas de riego y datos de insolación diaria para la zona de estudio.

En la cabecera de este fichero se encuentran las coordenadas donde se localiza la cuenca, el número de filas y de columnas, la ubicación del punto de salida y el número total de celdas que contiene la cuenca.

Se incluye la topología de la cuenca representada por:

- i) La localización de fila y columna dentro del MED (Modelo de Elevación Digital de la cuenca)
- ii) El número que identifica la celda a la cual la celda en cuestión drena
- iii) El número de celdas acumuladas (incluyendo a ella misma)
- iv) La pendiente de la celda (m/m)
- v) La cota de la celda (m.s.n.m.)
- vi) Un código entero (0 = NO; 1=SI) para indicar la presencia de nieve

La información del suelo está compuesta por las tres capas de parámetros del suelo:

- vii) El almacenamiento capilar suelo (mm)
- viii) La conductividad hidráulica saturada del suelo en mm/h

La conductividad hidráulica saturada de la roca (percolación), mm/h

- ix) La conductividad hidráulica horizontal del suelo, mm/h
- x) La conductividad hidráulica horizontal de la roca, mm/h
- xi) La conductividad hidráulica de la roca que determina las pérdidas subterráneas, mm/h
- xii) Velocidad del flujo en ladera, m/s

Y por último:

- xiii) Un código para cada región homogénea considerada.
- xiv) El índice de cobertura vegetal para estimar la ET, y
- xv) El índice de regadío
- xvi) Índice de la zona de FC homogéneos (desactivado)
- xvii) Orden de regadío para establecer una secuencia de riegos en la zona

- xviii) Contenido optimo del suelo
- xix) Almacenamiento máximo en charcos (desactivado)
- xx) Ratio entre la profundidad de la capa superficial del suelo (máx 15 cm) y la profundidad de raíces ( $Z_{ss}/Z_e$ )
- xxi) Seis factores de radiación (uno para cada uno de los primeros 6 meses, luego se repiten. Esto quiere decir que Junio y Julio tendrán el mismo valor, etc..)
- xxii) Código de celda karst (código 0: no-karst; código 1: karst)
- xxiii) Porcentaje de Hu que representa el máximo almacenamiento gravitacional

Al final del fichero topolco.sds se escriben los valores medios de los mapas de parámetros usados para la simulación y el valor medio de la capacidad máxima de interceptación.

Este fichero es creado por el propio programa, esta descripción sirve además para que el usuario sea capaz de realizar un control de calidad en los datos. La generación de este fichero se realiza mediante la opción del Menú:

**Simulación / Genera Fichero Topología y Edafología**

Una descripción más detallada de esta opción se expone mas adelante en este informe.

NORTE-SUR: 3796635. 3791475.  
 ESTE-OESTE: 240075.0 231675.0  
 COLUMNAS: 280  
 FILAS: 172  
 COL-FINAL: 2  
 FIL-FINAL: 169  
 NUM-CELDA: 22761

|   |     |       |   |         |    |   |          |         |        |        |        |        |         |   |   |   |   |   |        |        |        |        |       |         |        |        |       |   |     |
|---|-----|-------|---|---------|----|---|----------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---|---|---|---|---|--------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|--------|-------|---|-----|
| 1 | 164 | 14833 | 1 | 0.00589 | 71 | 1 | 115.4800 | 40.0000 | 0.1000 | 40.000 | 0.1000 | 0.0100 | 0.10856 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 1 | 165 | 14833 | 1 | 0.01318 | 71 | 1 | 113.7800 | 39.4000 | 0.1000 | 39.400 | 0.1000 | 0.0100 | 0.16233 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 1 | 166 | 18379 | 1 | 0.02357 | 71 | 1 | 112.4200 | 39.0000 | 0.1000 | 39.000 | 0.1000 | 0.0100 | 0.21712 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 2 | 135 | 11105 | 1 | 0.01318 | 92 | 1 | 11.6000  | 41.9000 | 0.1000 | 41.900 | 0.1000 | 0.0100 | 0.16233 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 2 | 136 | 11712 | 1 | 0.03773 | 93 | 1 | 34.7200  | 43.3000 | 0.1000 | 43.300 | 0.1000 | 0.0100 | 0.27470 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 2 | 137 | 11712 | 1 | 0.04602 | 93 | 1 | 34.5500  | 43.0000 | 0.1000 | 43.000 | 0.1000 | 0.0100 | 0.30339 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 2 | 138 | 10574 | 1 | 0.05803 | 93 | 1 | 33.8100  | 43.6000 | 0.1000 | 43.600 | 0.1000 | 0.0100 | 0.34069 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |
| 2 | 139 | 11599 | 1 | 0.04714 | 91 | 1 | 46.4000  | 41.9000 | 0.1000 | 41.900 | 0.1000 | 0.0100 | 0.30705 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.000 | 0 | 100 |

\*  
 \* Valores medios mapas de parámetros utilizados

\*  
 \* ---Hu(mm)--- --Ks(mm)--- --Kp(mm)--- --Kss(mm)--- --Ksa(mm)--- --Kps(mm)--- --Veloc(m/s)--- --Imax(mm)  
 167.8190 17.0091 8.8563 17.0091 8.8563 0.8856 0.3335 0.0000

**Tabla 6. Fichero “TOPOLCO.SDS” con la información de la topología de la cuenca, características del suelo, región homogénea, zonas con nieve, regadío, factores de radiación, zonas con karst y capacidad máxima de almacenamiento gravitacional.**

## 2.7.- FICHERO “CONTROL.TXT”

En este fichero el programa TETIS almacena los puntos de control. Se denominan puntos de control las estaciones de aforo, sitios de embalse, lugares de simulación y puntos en donde se añade o descuenta agua y que están incluidos en el fichero de episodio. Es decir, toda la información con códigos “N”, “V”, “S”, “Q”, “D” y “B” que se encuentran en el fichero episodio de entrada.

En este fichero se incluye la ubicación de cada punto dentro de la topografía utilizada según la fila y la columna que le corresponden (la fila y la columna que se encuentran en este fichero se refieren a un mapa recortado que considera estrictamente el espacio rectangular ocupado por la cuenca). En la Tabla 7 se observa un ejemplo del formato de este tipo de ficheros.

En el caso de los embalses, para que el modelo los considere tienen que incluirse dentro de los episodios. En caso contrario el modelo omitirá la existencia de un embalse y no efectuará la regulación correspondiente. Esto es importante, puesto que en ocasiones puede ser de interés analizar el comportamiento de una crecida sin la regulación de los embalses.

| Columna | Fila | Nombre                    |
|---------|------|---------------------------|
| 747     | 73   | E_13 EL VADO              |
| 717     | 92   | E_14 EL ATAZAR            |
| 717     | 103  | AR16 JARAMA EN VALDEPENAS |
| 699     | 158  | NUDO 5                    |
| 711     | 202  | NUDO 6                    |
| .       | .    | .                         |
| .       | .    | .                         |
| .       | .    | .                         |

**Tabla 7. Fichero “CONTROL.TXT”, puntos de control asociados al episodio empleado**

Este fichero es creado por el programa TETIS, pero el nombre del fichero puede ser modificado por el usuario.

Nótese que la información fila columna suministrada en este tipo de ficheros corresponde a la ubicación dentro del MED (recortado a la cuenca) de los puntos de interés que se encuentran en el episodio de entrada, si se modifica el episodio o la topografía original, es necesario volver a estimar estos puntos, lo cual se realiza mediante la opción del Menú:

### **Simulación / Genera Fichero Topología y Edafología**

Una descripción mas detallada de esta opción se expone mas adelante en este informe.

## 2.8.- ESTADO DE ALMACENAMIENTO INICIAL

Fichero con los datos de los valores iniciales de almacenamiento en la cuenca. Dentro de este fichero es importante resaltar la fecha a la cual están asociados los valores de

almacenamiento inicial estimados para los tanques incluidos en el esquema conceptual del modelo TETIS. Estos son:

- i) Almacenamiento estático inicial en el suelo ( $H_1$ )
- ii) Cantidad inicial de agua en superficie o ladera ( $H_2$ )
- iii) Almacenamiento gravitacional en el suelo ( $H_3$ )
- iv) Almacenamiento inicial en el acuífero ( $H_4$ )
- v) Estado inicial en cauces ( $H_5$ )
- vi) Altura equivalente de agua para la nieve ( $H_0$ )
- vii) Intercepción por la cubierta vegetal ( $H_6$ )

La fecha a la cual están asociados los valores de almacenamiento inicial se lee del fichero de entrada, en el cual por lo tanto tiene que estar incluida una línea con código 'F' que presente la fecha y la hora del comienzo de la serie temporal de datos observados, con el formato que se detalla más adelante.

El estado inicial del almacenamiento estático se introduce como porcentaje (0-100%) de la capacidad de almacenamiento máxima del mismo (0= vacío; 100= en capacidad de campo). También el estado inicial en cauce se introduce como un porcentaje (0-1000%) de la sección llena del mismo. En este caso el programa permite introducir valores superiores al 100% para tener en cuenta situaciones de inundación. Finalmente, también el estado que representa la cantidad de agua inicialmente retenida en la cubierta vegetal se introduce como porcentaje de la cantidad máxima que puede quedarse inmovilizada en las hojas. Todos los demás valores iniciales se introducen en mm. En la Tabla 8 se muestra el fichero "HANTEC.SDS" como ejemplo. Este fichero puede ser el resultado de un subprograma de proceso de datos ó se obtiene a partir de valores generales del almacenamiento inicial, uno por cada subcuenca, ó es el resultado final del estado de almacenamiento al finalizar un período de simulación, de todas formas siempre es generado por el propio modelo.

|             |                     |              |
|-------------|---------------------|--------------|
| NORTE-SUR:  | 3796635.0000        | 3791475.0000 |
| ESTE-OESTE: | 240075.0000         | 231675.0000  |
| COLUMNAS:   | 280                 |              |
| FILAS:      | 172                 |              |
| COL-FINAL:  | 2                   |              |
| FIL-FINAL:  | 169                 |              |
| NUM-CELDA:  | 22761               |              |
| FECHA-HORA: | 10/17/1981 21:10:00 |              |

|         |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 96.4593 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 95.0393 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 93.9033 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 9.6894  | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 29.0013 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 28.8593 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 28.2412 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 38.7575 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |

**Tabla 8. Fichero “HANTEC.SDS” con la información de almacenamientos antecedentes**

Es importante destacar que se asume la misma ordenación de celda que la indicada en el fichero de topología “TOPOLCO.SDS”.

El modelo TETIS genera este tipo de fichero mediante una de las siguientes opciones del Menú:

**Simulación / Calcula Almacenamiento Inicial**

Una descripción mas detallada de estas opciones se expone más adelante en este informe.

**2.9.- INFORMACIÓN DEL FICHERO DE ENTRADA**

Existen numerosas formas para representar un episodio o evento, por lo tanto es muy difícil definir un esquema genérico que sea fácil y que permita interacción con otros programas. Por esta razón se ha decidido emplear un formato propio del modelo TETIS que ha sido llamado *formato columna*. Básicamente se trata de un formato con información de las series temporales en columna, lo cual facilita el proceso de importación o exportación de datos a hojas de cálculo o bases de datos.

Adicionalmente, la información sobre series temporales del episodio puede ser suministrada mediante un fichero de intercambio tipo CEDEX, formato creado por esta entidad para intercambiar información con los diferentes sistemas de información hidrológica, SAIH.

Ambos formatos, tanto el tipo CEDEX como el formato columna se pueden apreciar en las Tablas 9 y 10, respectivamente.

Tanto en el caso del formato tipo columna, como en el caso del formato CEDEX, se debe incluir una línea precedida por la letra F en la cual se indica la fecha y la hora de inicio del episodio o de la serie temporal según el formato indicado en los ejemplos en las Tablas 9 y 10.

La codificación con la que se inicia cada fila es la misma para ambos formatos y están basadas en el formato CEDEX. Sin embargo, se han incluido variables nuevas con sus códigos correspondientes.

La información con el período de simulación en número de intervalos y el intervalo temporal en minutos se indica seguida de la letra G.

En cuanto a las series temporales observadas que son input del modelo, se tiene (en paréntesis el código de inicio de línea utilizado en el fichero):

- i) Las series temporales de las estaciones de lluvias en mm (P)
- ii) Las series de caudales registrados en m<sup>3</sup>/s (Q)
- iii) La evaporación media en las últimas 24 horas, en mm/día (E)
- iv) Los niveles de los embalses en m (N)
- v) Los volúmenes en los embalses en Hm<sup>3</sup> (V)
- vi) Las salidas observadas en cada embalse en m<sup>3</sup>/s (S)
- vii) Las series temporales de temperatura (para el caso de la fusión de nieve) en °C (T)
- viii) La altura equivalente de agua debida a la presencia de nieve en mm (H)

Adicionalmente se incluye:

- ix) Puntos en donde no se dispone de aforos pero se desea realizar una predicción (B). Por esta razón este tipo de filas pueden encontrarse vacías o simplemente incluir valores nulos.
- x) Puntos en los cuales hay un caudal adicional (D), son series temporales dadas en m<sup>3</sup>/s y permiten valores negativos para el caso de extracción.
- xi) Si se activa el sub-modulo de sedimentos, las estaciones de aforo de sedimentos (X)

Para cada línea que contiene una serie temporal o una letra código es necesario incluir el nombre de la respectiva estación o lugar de interés, sus coordenadas y la elevación.

Las coordenadas de la estación se refieren a las coordenadas del centro de la celda, basadas en un sistema cartesiano común a toda la zona de estudio. Normalmente se emplean las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator), pero hay que tener en cuenta que para zonas muy extensas puede ser necesario realizar correcciones debido al cambio de huso en las coordenadas UTM.

Las series temporales incluidas en el fichero de entrada tienen que seguir una secuencia pre-definida que el usuario no puede cambiar. Esta secuencia es: P, N, V, S, Q, B, H, T, E, D, X.

En el modelo se consideran dos situaciones para la información de las series temporales, en la primera de ellas se considera que no hay fallos en las series, de tal forma que la información de lluvias, evaporación, temperatura, caudales, volúmenes y niveles observados han sido corregidos y rellenados en una etapa previa a la simulación. De esta forma el proceso de interpolación espacial se realiza bajo el supuesto de buena calidad de la información, por lo que todos los datos disponibles son utilizados en el análisis espacial.

El segundo caso corresponde al supuesto de información faltante, por lo tanto, la información de lluvia, evaporación, temperatura y variables relacionadas con los embalses pueden presentar diferentes períodos de fallo. El indicador utilizado para la presencia de dato faltante o con fallo es (-1) para el caso de la precipitación, la evapotranspiración y los niveles, volúmenes o caudales de salida observados en embalses, y (-99) para la temperatura. El modelo en este caso realiza una búsqueda de las estaciones cercanas con información disponible y con base en estos resultados de la búsqueda realiza la interpolación espacial.

Dentro del programa TETIS esta distinción entre la información con fallos o series corregidas está representada por una variable lógica que responde a la pregunta: ¿Desea realizar interpolación espacial para cada intervalo temporal? (FALSE o TRUE) y que se encuentra dentro del fichero "PARAMGEO.TXT"

Los nombres, alias y coordenadas de los puntos de predicción seleccionados que se encuentran en este tipo de ficheros provienen de valores prefijados en una etapa anterior a este proceso.

El nombre asociado a las estaciones de aforo, los embalses y aquellos puntos en donde se desea realizar la simulación (identificados por las letras "Q", "N", "S", "V", "D" y "B") tienen que encontrarse dentro del fichero de los puntos de control, estimado por el modelo, de tal forma que se realice una asignación correcta de su posición de fila y columna en los mapas de celdas. Los resultados de simulación se obtendrán en aquellos puntos que en este fichero comiencen con "Q", "N", "S", "V", "D" y "B".

Es importante anotar que cuando se quiera incluir el proceso de fusión de nieve en los modelos de simulación, el fichero de evento debe incluir las líneas correspondientes a las series de temperatura y las mediciones de altura de agua equivalente de nieve, en al menos un punto de la cuenca, al inicio de la simulación.

Se considerarán como embalses sólo aquellos puntos que aparezcan en este fichero con información de al menos un nivel ("N"). Si de un embalse se dispone de las series temporales de niveles ("N") o volúmenes ("V") o caudales de salida ("S"), TETIS asume esas salidas hacia aguas abajo. Si no hay información suficiente de niveles, volúmenes y/o salidas se utilizará el método de Pulso Modificado asumiendo que todos los órganos de desagüe están abiertos.

```

*
* MODELACION HIDROLOGICA DISTRIBUIDA DE TIPO CONCEPTUAL
*   MODELO DE SIMULACION - T E T I S   v.7.3 -
*
* Desarrollado en:
*   UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
*   Departamento de Ingenieria Hidraulica y Medio Ambiente
*   Unidad de Ingenieria Hidraulica e Hidrologia
*
* FICHERO LLUVIA CON DATOS DE PLUVIOMETROS SAIH
* FICHERO ESTANDAR DE INTERCAMBIO
* Cordenadas XYZ (UTM ZONA 30) aproximadas.
* Registros de Precipitación en mm.
* Número de registros por estación: 360
* Intervalo temporal en minutos:    60
*
* Fecha de inicio del episodio
*   dd-mm-aaaa          hh:mm
F   01-01-2000          00:00
*
G   360    60
*
*
G   342    5
*
*Nombre                X      Y      Z      O      1      2      3
*-----
P "PN-28                " 416150 4512050 10 0.0  0.0  0.0  0.0 ...
P "P-30                  " 409100 4510200 10 0.0  0.0  0.0  0.0 ...
P "PN-24                  " 429000 4526300 10 0.0  0.0  0.0  0.0 ...
P "PN-23                  " 425100 4529200 10 0.0  0.0  0.0  0.0 ..
P "P-26                   " 435400 4522050 10 0.0  2.4  2.4  2.4 ...
P "P-27                   " 423600 4512050 10 0.0  0.0  0.0  0.0 ...
N "Navacerrada           " 415230 4507780 10 0.0 1134.5 1134.52 1134.52
S "Navacerrada           " 415230 4507780 10 0.0  0.73  0.73  0.73 ..
Q "E-19                   " 415230 4507780 10 0.0  0.36  0.36  0.36 .
Q "E-20                   " 431100 4506750 10 0.0  0.76  0.76  0.76
B "Punto de prediccion sin aforo " 427480 4507100 10 0.0
T "TEMPERATURA           " 409100 4510200 10 0.0  19.0  21.0  18.5 .
H "EST-NIEVE 1           " 416980 4404290 1500 0.0  190.0  210.0
E "EVAPOTR                " 431100 4506750 10 0.0  1.5  1.45  1.44.

```

**Tabla 9. Fichero “Fichero entrada”. Episodio registrado en formato de intercambio de ficheros SAIH (formato CEDEX).**

```

*
* MODELACION HIDROLOGICA DISTRIBUIDA DE TIPO CONCEPTUAL
*   MODELO DE SIMULACION - T E T I S   v.7.3 -
*
* Desarrollado en:
*   UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
*   Departamento de Ingenieria Hidraulica y Medio Ambiente
*   Unidad de Ingenieria Hidraulica e Hidrologia
*
* DATOS DEL MODELO TETIS EN FORMATO COLUMNA
*
* Directorio de Trabajo: d:\cuencas\alarcon1\
*
* Fecha de inicio del episodio
*   dd-mm-aaaa      hh:mm
F   17-10-1981      21:10
*
* Intervalo temporal (minutos) y numero de datos
G   30              176
*
* RESUMEN DE INFORMACION SOBRE LAS ESTACIONES
*
* "Nombre de la estacion   "   Este (UTM-X) Norte (UTM-Y)   Cota (msnm)
P "PLUVIO ALARCON         "   576800   4379700   0
P "PLUVIO BELMONTEJO     "   557000   4408000   0
N "EMBALSE ALARCON       "   576500   4380000   0
P "PLUVIO LA RODA        "   573265   4340794   0
S "EMBALSE ALARCON       "   576500   4380000   0
Q "Estacion de aforoo nueva "   572000   4435000   0
E "ETP ESTACION 44       "   567249   4422043   0
D "AFORO CUENCA         "   574000   4436500   0
*
* Series temporales de entrada
*
* -----DT -----P -----P -----N -----P -----S -----Q -----E -----D
   0.500  -1.000  -1.000  793.000   0.000  10.284   2.200   2.100  -1.000
   1.000  -1.000  -1.000  793.000   4.000  12.529   2.200   2.100  -1.000
   1.500  -1.000  -1.000  793.000   2.000  10.251   2.200   2.100  -1.000
   2.000  -1.000  -1.000  793.000   0.000   7.342   2.200   2.100  -1.000
   2.500  -1.000  -1.000  793.000   0.000   5.041   2.200   2.100  -1.000
   3.000  -1.000  -1.000  793.000   0.000   3.416   2.200   2.100  -1.000
   .      .      .      .      .      .      .      .      ...
   .      .      .      .      .      .      .      .      ...
   .      .      .      .      .      .      .      .      ...
   .      .      .      .      .      .      .      .      ...

```

**Tabla 10. Fichero Fichero entrada. Episodio registrado en formato Columna.**

El fichero de episodio debe ser suministrado al modelo TETIS por el usuario en alguno de estos dos formatos.

Si se desean eliminar estaciones en un fichero de evento existente, se debe tener en cuenta que para el formato de intercambio tipo SAIH sólo es necesario introducir cualquier letra que no pertenezca a los códigos mencionados (se sugiere el uso del \*). Si el episodio se encuentra en formato columna, es necesario eliminar tanto la fila con el nombre de la estación como la respectiva columna con la serie temporal de la estación.

## 2.10.- DATOS RELACIONADOS CON LOS EMBALSES

La información de los embalses se suministra al programa por medio del fichero que indica las curvas de altura contra volumen. En la Tabla 11 se muestra el fichero "CURVAHV.TXT". El cual incluye para cada embalse la información del nombre del embalse, una fecha, el nivel (m.s.n.m.), la superficie (m<sup>2</sup>), el volumen (m<sup>3</sup>) y los caudales (m<sup>3</sup>/s) mínimo y máximo que es posible desalojar para cada cota. El valor mínimo se corresponde con todas las compuertas cerradas, mientras que el máximo totalmente abiertas. En caso de no estar disponible, se sugiere el valor cero como mínimo y un valor de 100.000 como máximo.

El proceso de sedimentación en los embalses es importante, por lo que este tipo de curvas varía a lo largo del tiempo. La fecha que se indica en la Tabla 11 corresponde a la de la última batimetría realizada en el embalse, la cual sirve para verificar si se emplea información actualizada. Por problemas con el lenguaje de programación se debe tener cuidado con este fichero y emplear el mismo formato para la fecha. Asimismo, es importante que el nombre del embalse se encuentre entre comillas y que corresponda a una longitud exacta de 25 espacios, véase la Tabla 11

| CÓDIGO           | FECHA<br>DD-MM-AA | ALTURA<br>(m) | AREA<br>(m <sup>2</sup> ) | VOLUMEN<br>(m <sup>3</sup> ) | MIN | MAX      |
|------------------|-------------------|---------------|---------------------------|------------------------------|-----|----------|
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 640.0         | 0                         | 0                            | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 650.0         | 88300                     | 180000                       | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 660.0         | 1991700                   | 10000000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 670.0         | 4284500                   | 42110000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 680.0         | 8286900                   | 98500000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 685.0         | 9779700                   | 140860000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 690.0         | 12829300                  | 197430000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 700.0         | 18425700                  | 353730000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 710.0         | 25592800                  | 572410000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_01 ENTREPENAS | " 01-01-80        | 720.0         | 34414500                  | 885700000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 651.0         | 0                         | 0                            | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 655.0         | 1561400                   | 3480000                      | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 660.0         | 4170200                   | 17340000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 665.0         | 6825000                   | 45220000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 670.0         | 9673900                   | 86070000                     | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 680.0         | 17255900                  | 218190000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 690.0         | 30345100                  | 454230000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 700.0         | 50261800                  | 854620000                    | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 710.0         | 76042600                  | 1480790000                   | 0.0 | 100000.0 |
| "E_03 BUENDIA    | " 01-01-80        | 712.0         | 81947900                  | 1638750000                   | 0.0 | 100000.0 |

**Tabla 11. Fichero "CURVAHV.TXT". Curvas altura, volumen, superficie para los embalses, se incluye la información de caudales mínimos y máximos de descarga necesarios para el caso del Puls Modificado.**

Este fichero debe ser suministrado por el usuario al modelo TETIS.

## 2.11.- FICHERO "FACTORETMES.TXT"

La variación temporal de la evapotranspiración se incluye gracias a un fichero en formato texto que incluye la variación mes a mes de cada uno de las coberturas vegetales presentes en la cuenca.

El fichero debe ser suministrado por el usuario, en caso contrario el modelo genera un fichero donde para cada mes el factor multiplicativo de la evapotranspiración potencial es uno (en otras palabras no se considera la variación estacional de la cubierta vegetal) y

el valor del almacenamiento máximo para la interceptación es cero. El formato del fichero "FactorETmes.TXT" se presenta en la Tabla 12, en donde se observan trece columnas, en la primera se encuentran los valores del mes de enero, en la doceava columna los de diciembre y en la última los valores de interceptación máxima de la cubierta vegetal. Cada fila corresponde a una diferente cobertura vegetal.

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| *    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| *    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.00 |
| 0.20 | 0.20 | 0.60 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.60 | 0.40 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.00 |
| 0.20 | 0.20 | 0.20 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.00 |

**Tabla 12. Fichero: "FACTORETMES.TXT": variación mensual de Evapotranspiración en 9 coberturas vegetales (primeras 12 columnas) y interceptación máxima (última columna)**

Para que el programa Testis v.8.1 lea correctamente el fichero factorETmes.txt hay que poner los dos asteriscos en las primeras 2 líneas.

El número de filas que contiene este fichero (nueve según la Tabla 12) debe coincidir exactamente con el número de índices de cobertura utilizados durante la creación del respectivo mapa de índices de cobertura vegetal, puesto que la posición en la Tabla 12 indica el índice asociado.

## 2.12.- FICHERO CON LOS APORTES POR RIEGO

Si se desea incluir el aporte de agua debido al riego se debe incluir el fichero "RIEGOS.TXT", dentro del cual se incluye la información sobre la cantidad de riego (en mm) y la frecuencia (en días) para cada una de las regiones regadas. En la Tabla 13 se muestra un ejemplo del formato de este fichero.

|      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20   | 20   | 20   | 10   | 10   | 5    | 5    | 10   | 10   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| 0.0  | 50.0 | 18.0 | 20.0 | 20.0 | 30.0 | 30.0 | 20.0 | 10.0 | 10.0 | 0.8  | 0.6  | 0.6  |
| 20   | 20   | 20   | 10   | 10   | 5    | 5    | 10   | 10   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  |
| 20   | 20   | 20   | 10   | 10   | 5    | 5    | 10   | 10   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| 0.2  | 0.2  | 0.4  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.6  | 0.4  | 0.2  | 0.2  |
| 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20   | 20   | 20   | 10   | 10   | 5    | 5    | 10   | 10   | 20   | 20   | 20   | 20   |

**Tabal 13. Formato del Fichero con la información relacionada al riego "RIEGOS.TXT"**

Este fichero debe ser suministrado por el usuario del modelo, puesto que si no existe este fichero se supone que no hay zonas en la cuales se aporte agua debido al riego.

En la Tabla 13 se muestra para cada mes la cantidad y frecuencia de riego, obsérvese que hay 12 columnas, una por cada mes del año, comenzando en el mes de enero y finalizando en el mes de diciembre.

El número de filas de este fichero debe ser el doble del número de zonas con riego, puesto que para cada zona se asignan dos filas, la primera de ellas contiene la información de la cantidad de agua ingresada al modelo por riego en mm y la segunda fila señala la frecuencia del riego en días.

### 2.13.- FICHERO “MANANTIAL.TXT”

En este fichero, que puede asumir el nombre que desee el usuario, se almacenan los puntos de manantial. Se denominan puntos de manantial los lugares donde el flujo cárstico (interflujo y flujo base de las celdas de tipo karst) sale a la luz y drena en el cauce.

En este fichero se incluyen el nombre y las coordenadas de cada punto de manantial dentro de la topografía. Además en correspondencia de cada punto de manantial el usuario tiene que asignar un porcentaje de incremento o decremento del mismo flujo cárstico, respecto a la porción de área del acuífero que se estima estar incluida dentro de los límites superficiales de la cuenca en estudio. En el caso en que los límites del acuífero cárstico coincidan con la máscara de la cuenca en estudio tal incremento o decremento será igual a 0, en el caso en que el área del acuífero cárstico exceda los límites superficiales de la cuenca en estudio el porcentaje será positivo, mientras que en el caso contrario será negativo.

En la Tabla 14 se observa un ejemplo del formato de este tipo de ficheros.

Al no existir el fichero MANANTIALES.TXT el programa asume que no haya celdas de tipo karst.

| Nombre     | UTMX   | UTMY    | Coeficiente |
|------------|--------|---------|-------------|
| MANANTIAL1 | 543750 | 4747750 | 0           |
| MANANTIAL2 | 543750 | 4751750 | 0           |
| .          | .      | .       | .           |
| .          | .      | .       | .           |
| .          | .      | .       | .           |

**Tabla 14. Fichero “MANANTIALES.TXT”, puntos de manantiales presentes en la cuenca**

### 2.14.- FICHEROS CON LA INFORMACIÓN DE MAPAS

Se ha seleccionado un fichero típico de exportación ASCII de ArcView o ArcInfo, cuya extensión es “\*.ASC”, para mostrar el formato utilizado en TETIS. Se trata de un fichero tipo ráster, donde se identifican para cada celda el respectivo valor del mapa.

Existen numerosos tipos de mapas, la mayor parte de ellos presentan el formato que se indica en la Tabla 15.

Los mapas que se son necesarios para la ejecución del modelo TETIS son:

- Modelo de elevación digital del Terreno (MED.ASC).
- Pendiente del terreno en m/m (SLOPE.ASC).
- Celdas acumuladas hacia aguas arriba (ACUM.ASC).
- Dirección de drenaje, según la descripción del ArcInfo (DIRFLUJO).
- Capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo, Hu en mm (HU.ASC).
- Capacidad de infiltración del suelo en mm/h (KS.ASC).
- Capacidad de percolación del substrato en mm/h (KP.ASC).
- Conductividad hidráulica para el interflujo en mm/h (KSS.ASC).
- Conductividad hidráulica saturada del acuífero en mm/h (KSA.ASC).
- Capacidad de pérdidas del acuífero en mm/h (KPS.ASC).
- Velocidad del flujo en la ladera m/s (VEL.ASC).
- Contenido óptimo de humedad en el suelo,  $H^*$  en mm (HSTAR.ASC).
- Almacenamiento máximo en los charcos en mm (DC.ASC) (desactivado)

Entre paréntesis se ha indicado el respectivo nombre asociado al fichero FILESSP.TXT mostrado en la Tabla 2 y el fichero FILESSVEG.TXT mostrado en la Tabla 3.

Adicionalmente, en caso que se desee incluir el respectivo proceso hidrológico, se deben incluir los siguientes mapas:

- Regiones geomorfológicas, en caso que se identifiquen diferentes zonas para el cálculo de la traslación del flujo por el cauce empleando la metodología de la Onda Cinemática Geomorfológica (REGHOMOG.ASC).
- Zona cubierta con nieve, en caso que se desee incluir la fusión de nieve (NIEVE.ASC).
- Cobertura vegetal, para considerar que la evapotranspiración puede ser diferente en distintas zonas y variable a lo largo del ciclo anual (COBVEG.ASC).
- Zonas de riego, para incluir el aporte de agua en zonas cultivadas con regadío (RIEGO.ASC).
- Relación entre la profundidad de la capa superior del suelo ( $Z_{ss}$ ) y la profundidad de raíces ( $Z_e$ ) (RS.ASC), en el caso de seleccionar la modelación dinámica de la vegetación (no activo!)

- Códigos de áreas con karst (KARST.ASC). Este mapa es necesario si se quiere introducir el efecto de los acuíferos cársticos, junto con el fichero MANANTIALES.TXT.
- Capacidad de almacenamiento máxima del tanque gravitacional expresada como porcentaje de la capacidad máxima de almacenamiento estática. Este mapa es necesario si quiere activar el mecanismo de Dunne para la generación de la escorrentía superficial (saturación del suelo desde abajo), (MAXT3.ASC)

```

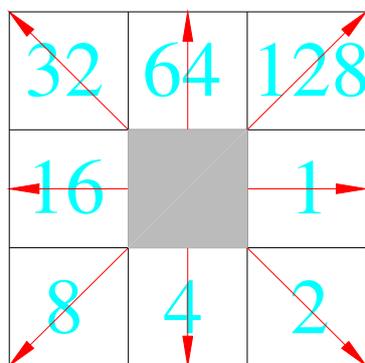
Ncols      299
Nrows      177
Xllcorner  231585
yllcorner  3791445
cellsize   30
NODATA_value -9999
0          0          0          0          0          0          .
1          1          0          0          0          0          .
0          0          0          0          0          0          .
0          0          0          0          0          0          .
0          0          0          0          0          1          .
.          .          .          .          .          .          .
.          .          .          .          .          .          .
.          .          .          .          .          .          .

```

**Tabla 15. Formato del fichero tipo de exportación tipo ASCII de ArcView o ArcInfo.**

El tamaño de la celda tiene que ser exactamente el mismo que el del fichero “TOPOLCO.SDS” y todos los mapas deben tener el mismo número de filas y columnas y estar expresados en el mismo sistema coordenado.

El fichero que contiene la información sobre la dirección de la red de drenaje es obtenido mediante Sistemas de Información Geográfica que disponen de módulos hidrológicos. Teniendo en cuenta que cada SIG tiene una representación propia de las direcciones de drenaje, en la Figura 1 se presenta la representación utilizada por el ArcInfo, en donde el número a colocar en cada celda corresponde al valor asociado a la dirección de drenaje según se muestra en el esquema.



**Figura 1. Correspondencia entre la Dirección del flujo según el ArcInfo y el código que se almacena en el mapa.**

De esta forma y a modo de ejemplo, si la celda de interés (indicada en gris en la Figura 1) drena hacia la celda que está ubicada al este, en el mapa de dirección de drenaje le corresponde el valor de 1, si lo hace hacia el sureste le corresponde el valor 2, si drena al sur se le asocia el valor 4 y así sucesivamente hasta la dirección noreste cuyo valor asignado en el mapa de dirección de drenaje es 128.

### 3.- GENERACIÓN DEL FICHERO TOPOLCO

Es importante recordar que la información de entrada la modelo TETIS es suministrada en forma de diferentes mapas ráster, cuya forma es matricial y que pueden llegar a ser muy grandes, lo cual puede hacer al modelo lento e ineficiente. Por esta razón se propone reunir toda la información relacionada a cada celda en un solo fichero, que ha sido descrito previamente como “TOPOLCO.SDS”.

Este paso corresponde al primero que se debe realizar cuando se desea efectuar la modelación hidrológica de cuenca mediante el programa TETIS. La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

#### *Simulación / Genera Fichero Topología y Edafología*

Para la correcta ejecución de este módulo es necesario que existan los siguientes ficheros:

- Fichero “FILESSP.TXT” con la información sobre la ubicación y los nombres de los ficheros a utilizar y a ser generados.
- El fichero episodio de entrada, en el cual deben estar bien definidas las coordenadas de los puntos de interés durante la modelación, es decir, aquellos puntos que tienen como letra o código inicial “Q”, “N”, “S”, “V”, “D” y “B”, puesto que de estas coordenadas se obtienen los respectivos *puntos de control* para el modelo.
- Modelo de elevación digital del Terreno en m (MED.ASC).
- Mapa de pendientes del terreno, dado en porcentaje (SLOPE.ASC).
- Mapa de celdas acumuladas hacia aguas arriba (ACUM.ASC).
- Mapa de dirección de drenaje, según la descripción del ArcInfo (DIRFLUJO.ASC).
- Mapa de capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo, Hu en mm (HU.ASC).
- Mapa de capacidad de infiltración del suelo en mm/h (KS.ASC).
- Mapa de capacidad de percolación del substrato en mm/h (KP.ASC).
- Mapa de conductividad hidráulica para el interflujo en mm/h (KSS.ASC).
- Mapa de conductividad hidráulica saturada del acuífero en mm/h (KSA.ASC).

- Mapa de capacidad de pérdidas del acuífero en mm/h (KPS.ASC).
- Mapa de la velocidad del flujo en la ladera en m/s (VEL.ASC).
- Mapa de contenido óptimo de humedad en el suelo,  $H^*$  en mm (HSTAR.ASC).

Los siguientes mapas no son necesarios, pero se den incluir según el caso:

- Mapa de regiones geomorfológicas homogéneas (REGHOMOG.ASC), en caso de existir más de una.
- Mapa con zona cubierta con nieve al inicio (NIEVE.ASC), en caso que se desee incluir la fusión de nieve.
- Mapa de índices de cobertura vegetal (COBVEG.ASC), en caso que se desee incluir la variabilidad en la evapotranspiración
- Mapa con índices de zonas de riego (RIEGO.ASC), si se incluye aporte de agua debido al regadío.
- Mapa de orden para el regadío (ORDENRIEGO.ASC)
- Mapas de índices de factores de calibración (MAPASFC.ASC)
- Relación entre la profundidad de la capa superior del suelo ( $Z_{ss}$ ) y la profundidad de raíces ( $Z_e$ ) (RS.ASC).
- Mapa de códigos karst (KARST.ASC)
- Capacidad máxima de almacenamiento gravitacional (MAXT3.TXT)

El resultado de la ejecución es la creación del fichero TOPOLCO.SDS, en caso que el fichero ya exista se le pregunta al usuario si desea sobrescribir el fichero existente. También se crea el fichero con los puntos de control CONTROL.TXT que contiene la posición dentro del mapa de referencia, mapa del Modelo Digital del Terreno recortado a la cuenca, de cada uno de los puntos importantes incluidos en el episodio.

En el caso de incluir el karst, el programa genera un fichero que se llama MANANTIAL2.TXT que contiene la posición dentro del mapa de referencia (columna y fila), mapa del Modelo Digital del Terreno recortado a la cuenca, de los puntos de manantial.

## **4.- RECORTE DE LA ZONA AGUAS ARRIBA DE LOS EMBALSES**

Esta rutina o subprograma es la encargada de reducir la información topológica y de suelos de cada celda en una cuenca a una subcuenca menor. Se trata de encontrar una nueva área de drenaje que incluya todos los puntos de control, pero sin el área aguas arriba de aquellos embalses previamente seleccionados por el usuario. Básicamente se trata de modificar el fichero con la información a nivel de celda de toda la cuenca "TOPOLOCO.SDS" creando un nuevo fichero reducido.

Esta operación permite ejecuciones más rápidas del modelo TETIS ya que el número de celdas se reduce. La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

### **Varios / Recorta el área drenante de los embalses**

Previa a esta ejecución, es necesario que se haya realizado la generación del fichero de topología y edafología descrita en el apartado anterior, es decir, debe existir un fichero "TOPOLCO.SDS", a partir del cual se realiza una reducción de información.

#### **4.1.- FICHEROS DE DATOS**

Como ficheros de entrada a este módulo se requiere de:

- Fichero "FILESSP.TXT" con la información sobre la ubicación y los nombres de los ficheros a utilizar y a ser generados.
- Fichero con un listado de nombres de los embalses cuya área hacia aguas arriba va a ser eliminada, "RECORTA.TXT".
- Fichero con la información de Topología y edafología conocido como "TOPOLCO.SDS"

En la Tabla 16 se muestra un ejemplo del fichero, en donde se destaca la importancia que tiene el nombre del embalse, que debe ser exactamente igual al que aparece en el episodio.

Navacerrada  
Aforo Cuenca

**Tabla 16. Descripción del fichero RECORTA.TXT.**

Este fichero debe ser creado por el usuario en formato texto.

## 4.2.- FICHEROS DE SALIDA

Como fichero resultado se obtiene un fichero más corto que el original y con la información a nivel de celda de la nueva cuenca, lo que hace que los programas de simulación y optimización sean más rápidos en cuanto al tiempo de su ejecución. El formato de este tipo de ficheros ha sido mostrado en la Tabla 6 y corresponde al fichero “TOPOLCO.SDS” indicado en el apartado 2.1.4.

Como se ha mencionado, se crea un nuevo fichero que se ha llamado “CONTROL.TXT”, el cual incluye los puntos de control pero referenciados a la nueva topología recortada. Por lo tanto, los programas de simulación y optimización deben hacer uso de este nuevo fichero.

**Precaución:** Es importante mencionar que una reducción en los ficheros originales “TOPOLCO.SDS” y “CONTROL.TXT” es almacenada en ficheros con los mismos nombres, haciendo que los originales desaparezcan. Por tal motivo, si se desea volver a ejecutar el modelo TETIS incluyendo la zona que ha sido reducida, es necesario volver a generar la topología y edafología original. Es decir, es necesario eliminar todos los “*ficheros temporales*” y generar la “*Topología y edafología*” según lo descrito en el apartado anterior.

## **5.- ESTADO DE ALMACENAMIENTO INICIAL**

Para la generación de un estado inicial en los almacenamientos de la cuenca se asignan valores a toda la cuenca. Esta opción ha sido incluida en el modelo TETIS mediante la siguiente rutina.

### **5.1.- ESTADO DE ALMACENAMIENTO INICIAL EN LA CUENCA**

Esta rutina se encarga de asignar en cada uno de los almacenamientos del modelo el respectivo valor inicial.

Para la correcta ejecución de esta rutina es necesaria la existencia de los ficheros:

- Fichero "FILESSP.TXT"
- Fichero "PARAMGEO.TXT"
- Fichero "SETTINGS.TXT"
- Fichero "CALIB.TXT"
- Fichero episodio en cualquiera de los formatos disponibles
- El fichero obtenido de la ejecución del proceso de generación de la Topología y Edafología, "TOPOLCO.SDS"
- Fichero "NIEVE.ASC" si existe

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

#### **Simulación / Calcula Almacenamiento Inicial**

El fichero que contiene los datos con los valores iniciales de los almacenamientos es el "PARAMGEO.TXT". De tal forma que estos valores iniciales aparecen en pantalla mediante una ventana, una por cada región con zonas de humedad diferente. Un ejemplo de la ventana que aparece en la pantalla del ordenador se muestra en la Figura 2.

Estado inicial en los almacenamientos

DATOS PARA LA REGION N°: 1 de 1

H1 - Almacenamiento estático máximo (0-100 %) 0.00000

H2 - Agua en superficie (mm) 0.00000

H3 - Almacenamiento gravitacional (mm) 0.00000

H4 - Estado inicial del Acuífero (mm) 0.00000

H5 - Cauce a sección llena (0-1000 %) 0.00000

H6 - Intercepción por la vegetación (0-100%) 0.00000

Cancelar Atrás Seguir

**Figura 2. Ventana con los valores de almacenamiento inicial en cada uno de los tanques.**

En este punto es posible modificar estos valores globales, de tal forma que sean actualizados por el usuario en el fichero “PARAMGEO.TXT” después de presionar la tecla <SEGUIR>.

Una vez el usuario acepta estos valores se realiza una nueva estimación del fichero de estados de almacenamiento inicial. En la Tabla 8 se muestra el formato del fichero “HANTEC.SDS”, en el cual se almacena la información de los estados iniciales en toda la cuenca. Es importante destacar que en este fichero se asume la misma ordenación de celda que la indicada en el fichero de topología “TOPOLCO.SDS”.

El fichero generado asigna los mismos valores para los cuatro primeros almacenamientos, pero la asignación de valores para el quinto almacenamiento se realiza con base en la relación geomorfológica del área acumulada y caudal a sección llena, por tal motivo el quinto almacenamiento es diferente para todas las celdas.

Se recuerda que existe el almacenamiento H0, asociado a la altura equivalente de nieve (dado en mm), el cual se incluye al fichero de estados de almacenamiento inicial “HANTEC.SDS” con un valor nulo si no existe un mapa con alturas equivalente de agua inicial o con el valor de la respectiva altura proveniente del mapa “NIEVE.ASC”.

Se recuerda que la condición inicial para el almacenamiento H6, asociado a la interceptación por parte de la cubierta vegetal, es un porcentaje de su capacidad máxima, que se encuentra en la última columna del fichero FactorETmes.TXT.

Durante la ejecución de la subrutina que calcula las condiciones iniciales para cada celda, el programa puede generar un fichero de texto llamado WARNINGHANTEC.TXT donde se señalan todas las celdas en las que las condiciones iniciales asignadas a los almacenamientos estáticos y gravitacional son superiores a sus capacidades máximas y a las que por lo tanto se le ha asignado como condición inicial su capacidad máxima.

## **6.- INTERPOLACIÓN DE LA ALTURA EQUIVALENTE DE LA CAPA DE NIEVE**

Ha sido incluido un módulo independiente para la interpolación de la altura equivalente de agua (en mm) del espesor de la capa de nieve. La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú principal:

### **Simulación / Interpola la altura de Nieve**

La interpolación se realiza mediante la técnica del inverso de la distancia al cuadrado incluyendo una variable externa que es la altura sobre el nivel del mar.

La ejecución de este módulo es opcional, puesto que si el usuario lo desea se puede realizar la calibración del parámetro  $\beta$  al mismo tiempo que realiza la simulación. Sin embargo, el usuario debe ser consciente que este proceso tardará mayor tiempo, y además el proceso de interpolación puede enmascarar la calibración de los otros factores correctores y estados de almacenamiento en el modelo de simulación. Por lo tanto, se recomienda al usuario realizar la calibración de este parámetro en una etapa previa.

### **6.1.- INFORMACIÓN DE ENTRADA**

Para la correcta ejecución de esta rutina es necesario que existan los siguientes ficheros:

#### **6.1.1.- Fichero “FILESSP.TXT“**

El fichero con la dirección en dónde se localiza la información y los nombres de los diferentes ficheros a utilizar es necesario para ejecutar de esta rutina.

#### **6.1.2.- Información del episodio**

La información del episodio suministrada mediante el fichero columna o CEDEX sirve para:

- i) verificar si el episodio contiene información de temperatura y estaciones con mediciones de altura equivalente de agua
- ii) para efectuar la interpolación de la altura equivalente de agua inicial sobre las demás celdas (utiliza por tanto el primer valor medido en cada nivómetro).

Debe existir información de temperaturas, de lo contrario no es factible realizar la estimación de la fusión de nieve. Del mismo modo es necesario un valor inicial en los nivómetros.

### 6.1.3.- Parámetros del modelo de fusión de nieve

El fichero con los factores correctores y parámetros globales a calibrar, llamado “CALIB.TXT” contiene los parámetros del modelo de fusión de nieve necesarios para la interpolación de la altura equivalente de agua. Estos valores son mostrados en pantalla, de tal forma que se puedan ser modificados por el usuario tal como se indica en la Figura 3. Una vez se introducen los nuevos valores, el fichero “CALIB.TXT” es actualizado.

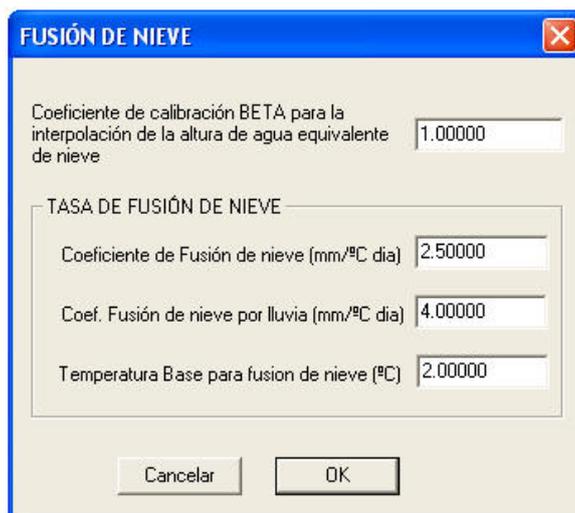


Figura 3. Ventana con los valores iniciales de los parámetros de fusión de nieve

### 6.1.4.- Información de topología y edafología

El fichero obtenido de la ejecución del proceso de generación de la Topología y Edafología, “TOPOLCO.SDS” es cargado en memoria, en aquellas celdas en las cuales se identifica la presencia de nieve se les cambia el código de un valor cero a uno. Finalmente se reescribe el fichero de Topología y Edafología “TOPOLCO.SDS” con los nuevos valores.

### 6.1.5.- Fichero con la información sobre la localización de la nieve

La información sobre la localización de la capa de nieve se obtiene mediante un fichero típico de exportación ASCII de ArcView, “NIEVE.ASC” cuyo formato se puede observar en la Tabla 11. Es un fichero en formato tipo ráster, donde se identifican las celdas que contienen nieve con valor mayor que uno, siendo el valor cero para aquellas celdas que no presentan nieve.

Este fichero es imprescindible si se desea incluir el proceso de fusión de nieve, aunque se trate de un mapa rellenado con ceros. El modelo TETIS incluye una vía rápida para generar este tipo de ficheros, el cual es explicado en el apartado “Definición del contorno de nieve” descrito en este informe.

## **6.2.- INFORMACIÓN DE SALIDA**

El objetivo de este módulo del programa es establecer un parámetro óptimo, lo cual se realiza mediante un proceso de ensayo y error. Por lo tanto, como resultado de la ejecución de este módulo se obtiene una actualización del fichero "CALIB.TXT", con el último valor del parámetro  $\beta$  seleccionado.

El fichero con la Topología y la Edafología "TOPOLCO.SDS" es creado nuevamente, en donde se modifica un código destinado a indicar la presencia de nieve en cada celda.

Adicionalmente, genera un fichero típico de exportación ASCII de ArcView, con el fin de facilitar a la interfaz la visualización del mapa obtenido con el parámetro seleccionado, siendo el usuario quien decide si desea continuar el proceso de calibración ejecutando nuevamente este módulo ó si el usuario se encuentra conforme con los resultados obtenidos procede a la ejecución del modelo TETIS.

## 7.- MODELO DE SIMULACIÓN TETIS

El modelo TETIS se enmarca dentro de los modelos lluvia-escorrentía y más específicamente en los llamados modelos hidrológicos distribuidos de tipo conceptual. Este tipo de modelos pretenden simular el comportamiento del ciclo hidrológico dentro de las cuencas naturales, de la mejor manera posible, teniendo en cuenta la cantidad y calidad de la información disponible en la actualidad. El modelo TETIS ha sido desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por el Grupo de Hidrología e Hidráulica. Una descripción detallada del comportamiento hidrológico e hidráulico del modelo TETIS se puede consultar en el documento “*Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v. 8.1*”.

El programa “TETISv81.EXE” es el encargado de realizar la modelación hidrológica en cuencas naturales en las fases de simulación y calibración, ya sea mediante procedimientos automáticos o por ensayo y error, de tal forma que se encuentren los factores correctores del modelo hidrológico y se establezca un estado final de las variables de estado o almacenamientos. Sin embargo, este capítulo se centra en la descripción detallada del proceso de simulación hidrológica según TETIS, haciendo especial énfasis en la información necesaria, el formato empleado por cada uno de los datos y los resultados que se obtienen.

La modelación hidrológica distribuida se realiza mediante la opción del Menú principal:

### *Simulación / Tetis v.8.1 (Simulación)*

A continuación se presenta de forma detallada la información necesaria y su respectivo formato para la simulación hidrológica según TETIS.

#### 7.1.- INFORMACIÓN DE ENTRADA

El programa de simulación requiere de los siguientes ficheros para su ejecución.

- Fichero “FILESSP.TXT” con la información sobre la dirección y la ubicación de los datos y los respectivos nombres de los ficheros a utilizar.
- Fichero con el listado de los Parámetros Geomorfológicos, los valores de almacenamiento inicial y otros valores que se encuentran en “PARAMGEO.TXT”.
- Fichero con las variables lógicas que definen los formatos a utilizar y las opciones de configuración en “SETTINGS.TXT”.
- Fichero con los factores correctores, los parámetros de nieve y el factor de interpolación de la lluvia. Todos ellos corresponden a los factores a calibrar y se encuentran en “CALIB.TXT”

- Fichero con la información de Topología y Edafología, también conocido como “TOPOLCO.SDS”
- Fichero de episodio con las diferentes series temporales necesarias para la modelación hidrológica de cuencas naturales. Esta dado en cualquiera de los formatos disponibles.
- Fichero con la información de los puntos importantes o puntos de control, que van a ser empleados en la modelación y que han sido extraídos de la información del episodio. Este fichero es “CONTROL.TXT”
- Fichero con los valores iniciales en los almacenamientos para toda la cuenca, este fichero es el “HANTEC.SDS”.

La información descrita es la necesaria para la correcta ejecución del modelo. Sin embargo, en algunos casos se necesita información adicional ya que se incluyen procesos como la fusión de nieve o hay presencia de embalses en la cuenca. Por lo tanto, la siguiente información sólo es necesaria según sea el caso:

- En el caso de presencia de embalses en la zona de estudio, se requiere del fichero con la información de las curvas propias de cada embalse y los caudales de descarga. Este fichero ha sido descrito como “CURVASHV.TXT”
- Se debe incluir el mapa con las zonas geomorfológicas, “REGHOMOG.ASC”, se trata de un mapa con los índices de las regiones homogéneas, para cada índice debe existir un conjunto de factores geomorfológicos diferente, según lo expuesto por la metodología de la Onda Cinemática Geomorfológica.
- Para el caso de la fusión de nieve es necesario el fichero con el contorno de la zona cubierta con nieve en formato tipo ráster, cuyo nombre asociado es “NIEVE.ASC”.
- En el caso de zonas con riego se debe incluir el fichero “RIEGOS.TXT” que contiene la información de la cantidad y frecuencia de riego en cada zona y el respectivo mapa con los índices de zonas de riego “RIEGO.ASC”.
- Para considerar la variabilidad temporal de la evapotranspiración se debe incluir el fichero “FACTORET.TXT” y el respectivo mapa con los índices de cobertura vegetal, “COBVEG.ASC”

En el caso que el proceso de fusión de nieve se incluya en la simulación, el programa TETIS presenta la ventana mostrada en la Figura 3 con los parámetros de fusión nieve. Estos valores son presentados para ser modificados por el usuario durante el proceso de calibración de los parámetros de nieve. Durante la modelación hidrológica se supone que estos valores ya han sido calibrados y no es necesario modificarlos. Para continuar se presiona la tecla <OK>.

El programa presenta una ventana con los factores correctores y el factor de interpolación de la lluvia para que el usuario realice las modificaciones que considere

necesarias durante el proceso de calibración manual. Para el caso de la modelación se supone que estos factores ya han sido calibrados y simplemente se muestra la ventana para que el usuario revise los valores y presione la tecla <OK> para continuar con el proceso de modelación. En la Figura 4 se muestra esta ventana.

| FACTORES CORRECTORES DEL MODELO                        |              |
|--|--------------|
| [FC-1] Almacenamiento estático                         | 1.00000      |
| [FC-2] Evaporación                                     | 1.00000      |
| [FC-3] Infiltración                                    | 1.00000      |
| [FC-4] Escorrentía                                     | 1.00000      |
| [FC-5] Percolación                                     | 1.00000      |
| [FC-6] Flujo Subsuperficial                            | 1.00000      |
| [FC-7] Pérdidas  | 0.00000      |
| [FC-8] Flujo base                                      | 1000.00000   |
| [FC-9] Velocidad del flujo                             | 1.00000      |
| Exponente de infiltración al tanque estático           | 0.00000      |
| Factor corrector capacidad máxima tanque gravitacional | 100000.00000 |
| Factor de interpolación de la lluvia con la cota       | 0.00000      |
| FC1-SED - ladera (Kilinc y Richardson)                 |              |
| FC2-SED - cárcava (Engelund y Hansen)                  |              |
| FC3-SED - cauce (Engelund y Hansen)                    |              |

**Figura 4. Ventana con los valores iniciales de los factores correctores y el factor de interpolación de la lluvia.**

Una vez se ha presionado la tecla <OK>, el programa actualiza estos valores en el fichero que contiene los factores de calibración y que ha sido reseñado como “CALIB.TXT”. Del mismo modo, el programa almacena los valores anteriores, con el fin de poder ser recuperados en el futuro, en caso que el usuario lo desee.

Finalmente, el usuario observa en pantalla el porcentaje de avance de la modelación como indicador del buen funcionamiento del programa TETIS. Una vez termina la ejecución del programa se presentan los resultados.

## 7.2.- RESULTADOS

Como resultado de la simulación se obtienen series temporales, fundamentalmente hidrogramas en los puntos seleccionados, y como información adicional que es de utilidad se obtienen los valores medios en todos los almacenamientos al finalizar el período de simulación y su respectiva serie temporal media.

### 7.2.1.- Series temporales simuladas

En la Tabla 17 se observa el fichero “17040800.s90”, con los resultados obtenidos, el cual incluye el eco de los datos que se encuentra en formato de intercambio de ficheros tipo CEDEX.

```

*
*CONFEDERACION HIDROGRAFICA DEL TAJO
*
*Sistema de informacion hidrológica. Fichero estandar de intercambio.
*
*Intervalo de fechas :01/10/1995 08:00:00 hasta 02/10/1995 03:55:00
*
*Incremento del tiempo: 5.000000
*Numero de Intervalos : 240
*Datos en mm. por intervalo para pluviómetros.
*Datos en m. al final del intervalo para niveles de embalse.
*Datos en m3/s al final del intervalo para caudales desembalsados.
*Coordenadas XYZ UTM (huso 30) aproximadas.
*
G 240 5.000000
*
*Nombre X Y Z O 1 2
*-----
P "EST subcuenca 1 " 474482 4548291 10 .0 .3 .3 .3 .3
P "PN-28 " 415982 4511791 10 .0 .0 .0 .0 .0
P "P-30 " 409482 4509791 10 .0 .0 .0 .0 .0
P "PN-24 " 428982 4526291 10 .0 .0 .0 .0 .0
P "PN-23 " 424982 4528791 10 .0 .0 .0 .0 .0
P "P-26 " 434982 4521791 10 .0 2.4 2.4 2.4 .0
P "P-27 " 423482 4511791 10 .0 .0 .0 .0 .0
N "Navacerrada " 424482 4399291 10 .0 1134.5 1134.52 1134.52 1134.52
S "Navacerrada " 424482 4399291 10 .0 .7 .73 .73 .71
Q "Navacerrada " 424482 4399291 10 .0 .0 .73 10.74 .71
A "Navacerrada " 424482 4399291 10 .0 .0 .00 .00 .00
L "Navacerrada " 424482 4399291 10 .0 1134.5 1134.50 1134.50 1134.50
T "TEMPERATURA " 409482 4509791 10 .0 19.0 21.00 18.50 16.50
C "EST-NIEVE 1 " 416482 4404291 1500 .0 190.0 210.00 18.50 16.50
C "EST-NIEVE 2 " 431482 4408291 1620 .0 650.0 720.00 18.50 16.50
Q "E-20 " 431482 4397791 1620 .0 .8 .76 .76 .76
A "E-20 " 431482 4397791 1620 .0 .0 .00 .00 .00
Q "E-19 " 422982 4400791 1620 .0 .4 .36 .36 .36
A "E-19 " 422982 4400791 1620 .0 .0 .00 .00 .00
M "E-19 " 0 0 1620 .0 1.5 1.5 1.5 .0
B "Prediccion sin aforo " 426982 4506791 1620
A "Prediccion sin aforo " 426982 4506791 1620 .0 .0 .00 .00 .00
E "EVAPOTR " 430982 4506291 1620 .0 2.1 2.40 2.10 1.90

```

**Tabla 17. Fichero “17040800.s90” con los resultados obtenidos según el formato CEDEX después de la simulación empleando el programa “TETIS”, incluye el eco de los datos.**

Las nuevas series temporales resultado de la simulación son:

- i) El caudal estimado durante la simulación (A), en puntos de aforo, entrada de embalses, y lugares de aporte y/o descuento de aguas.
- ii) Los niveles simulados en los embalses (L), por balance si es posible (dando por exacto el caudal de salida observado o el caudal de entrada, según la información disponible) o por Pulso Modificado.
- iii) El caudal de entrada al embalse obtenido por balance (I). Este caudal sólo se puede estimar si se conocen simultáneamente los caudal de salida del embalse y los niveles o volúmenes del embalse; si falta alguna de estas variables, se asume  $I=A$ .

- iv) El volumen observado del embalse por balance (V). Su cálculo varía según la información disponible: Si se conoce el volumen no hay que hacer nada, si se conoce el nivel se obtiene vía curva de embalse, si se conoce sólo el caudal de salida se obtiene por balance (usando como entrada el caudal simulado, A), y si sólo se conoce un nivel inicial del embalse, se estima por pulso modificado.
- v) El volumen simulado del embalse (U). Se obtiene por curva de embalse, una vez estimado el nivel simulado (L).
- vi) El caudal observado o simulado a la salida de los embalses (S). Cuando no es conocida esta variable se estima aplicando el balance en el embalse.
- vii) La altura equivalente de agua simulada en los nivómetros (Z)
- viii) Hietograma medio observado a la salida de la cuenca (M).
- ix) Volumen simulado de nieve en toda la cuenca del punto de salida en  $\text{Hm}^3$  (M).
- x) Flujos medios entre tanques de toda la cuenca (X). El texto los distingue entre sí.
- xi) Almacenamientos medios de toda la cuenca (J). El texto los distingue entre sí.

En la Tabla 18 se presenta la secuencia de cuatro de los 8 casos posibles de disponibilidad de información en sitios de embalse; los cuatro casos que no se reportan en la tabla son análogos a los presentados cambiando el nivel observado por el volumen observado, o considerando la disponibilidad simultánea de ambas variables.

| CASO DE INFORMACIÓN  | VARIABLE TETIS |  |                               |       |                                      |            |                               |
|----------------------|----------------|--|-------------------------------|-------|--------------------------------------|------------|-------------------------------|
|                      | N              | L <sup>(*)</sup>   | I                             | A     | V                                    | U          | S                             |
| Nivel (N)            | -              | $\text{volini} = U_{t-1} + (A-S) \cdot \Delta t$<br>$L = f(\text{volini})$ | $I = A$                       | Tetis | $V = f(N)$ (**)                      | $U = f(L)$ | $S = A - \Delta V / \Delta t$ |
| Caudal de salida (S) | $N = f(V)$     | $\text{volini} = U_{t-1} + (A-S) \cdot \Delta t$<br>$L = f(\text{volini})$ | $I = A$                       | Tetis | $V = V_{t-1} + (A-S) \cdot \Delta t$ | $U = f(L)$ | -                             |
| N Y S                | -              | $\text{volini} = U_{t-1} + (A-S) \cdot \Delta t$<br>$L = f(\text{volini})$ | $I = \Delta V / \Delta t + S$ | Tetis | $V = f(N)$                           | $U = f(L)$ | -                             |
| Nivel inicial        | $N = f(V)$     | $\text{volini} = U_{t-1} + (A-S) \cdot \Delta t$<br>$L = f(\text{volini})$ | $I = A$                       | Tetis | $V = f(\text{Pulso modificado})$     | $U = f(L)$ | $S = A - \Delta V / \Delta t$ |

(\*): Para estimar L, primero se calcula por balance el volumen simulado usando el caudal simulado en Tetis(A) y el caudal de salida (S) observado o estimado, y luego se interpola el nivel de la curva de embalse.

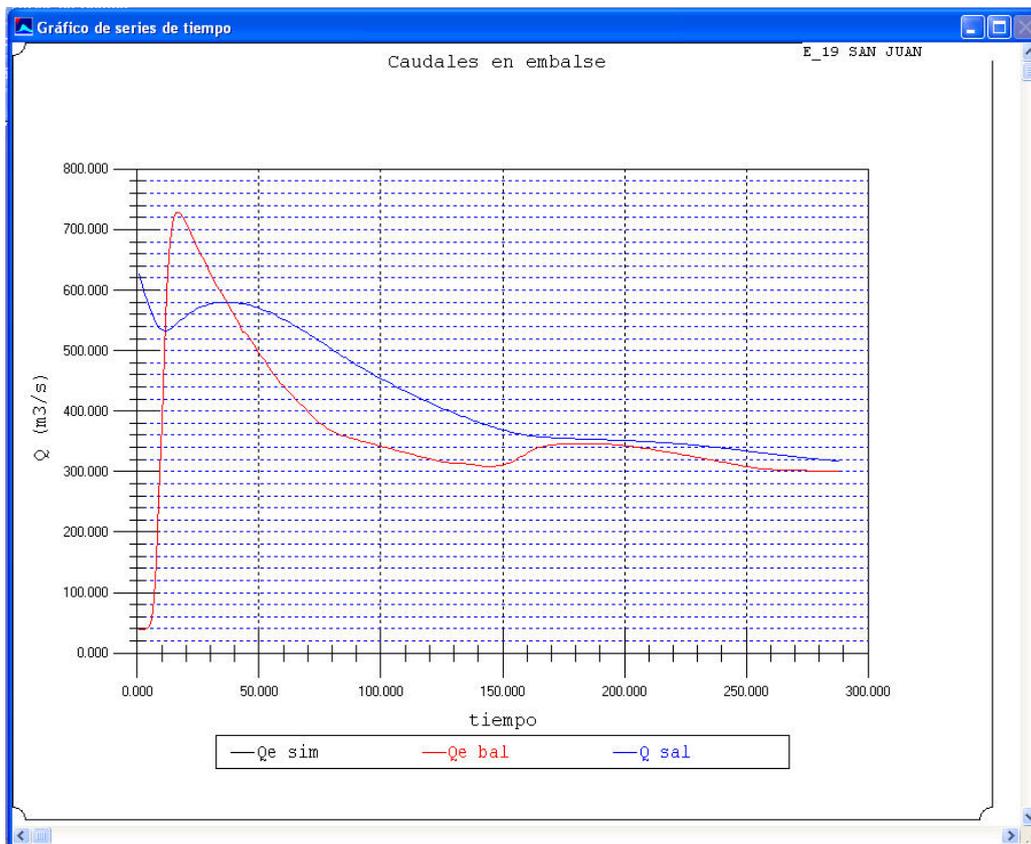
(\*\*): La función f() hace referencia a la transformación Nivel-Volumen vía interpolación de la curva de embalse.

**Tabla 18. Cálculo de variables de embalse para diferentes casos de disponibilidad de información.**

En el formato CEDEX después de cada línea de caudal simulado “A” se indica en forma de comentario el caudal máximo, el tiempo al pico y el error cuadrático medio al compararlo con el caudal observado “Q”. Estos mismos resultados son mostrados en el formato columna.

El formato columna en el fichero de resultados emplea los mismos códigos indicados y una estructura similar, pero en columna, que facilita su exportación a hojas de cálculo y bases de datos.

El programa TETIS v.8.1 muestra resultados de simulación en formato gráfico, tal como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5. Ventana con los resultados gráficos para la serie temporal de caudales.**

En la misma pantalla se indica información adicional, que corresponde al nombre de la estación, los factores correctores empleados, algunas características del evento, el caudal máximo observado y simulado y otros valores de interés que pueden ser de ayuda al usuario. De todas formas, esta información es de carácter informativo y todos los datos y resultados han sido almacenados en los ficheros que han sido descritos previamente.

### **7.2.2.- Estado de almacenamiento final**

El programa realiza una actualización de los estados de almacenamiento para cada intervalo de tiempo. El fichero “HANTEC2.SDS” (con el mismo formato mostrado en la Tabla 7) contiene este tipo de información para el último intervalo de tiempo de la simulación. Nótese que este fichero de almacenamiento final puede llegar a convertirse en el fichero de almacenamiento inicial cuando se ejecuta el modelo en el período siguiente, esto permite obtener una mejor simulación ya que las condiciones iniciales en los almacenamientos son más parecidas a la realidad.

### **7.2.3.- Estado inicial y final de la capa de nieve**

Es interesante observar la evolución de la cobertura de nieve en la cuenca. Por esta razón el programa genera los ficheros “NIEVE.ASC” y “NIEVE1.ASC” que corresponden al estado inicial (se realiza internamente siempre una interpolación de la altura de nieve para el instante inicial) y final de la cobertura de nieve respectivamente. Esto es posible debido a que en cada intervalo de tiempo el programa descuenta el aporte debido a la fusión de la nieve de la altura equivalente anterior, dando como resultado al final del evento un nuevo estado de las alturas de agua equivalente para cada una de las celdas que contienen nieve. El formato seleccionado corresponde a valores enteros dados en milímetros y que ha sido mostrado en la Tabla 12.

## 8.- OPTIMIZACIÓN AUTOMÁTICA

El módulo de optimización automática emplea los mismos ficheros de datos que han sido explicados previamente, se considera necesario que el modelo de simulación funcione correctamente, de esta forma se garantiza que un posible fallo se deba a errores en los datos correspondientes a la optimización y no a errores en la simulación.

La metodología de optimización automática incluida en el modelo TETIS corresponde a la conocida por sus siglas en inglés como “Shuffled Complex Evolution – University of Arizona, SCE-UA” que ha sido desarrollada en la Universidad de Arizona por Duan et al. (1992). Este procedimiento se encarga de realizar la calibración automática para obtener el conjunto de factores correctores y estados de almacenamiento inicial óptimos, de tal forma que se simule de forma satisfactoria el ciclo hidrológico dentro de la cuenca estudiada.

La optimización automática puede ser de tipo continuo, cuando lo que se quiere calibrar es una serie continua de caudales observados o de tipo multi-evento, cuando se quieren calibrar simultáneamente varios eventos no consecutivos.

Se puede elegir el tipo de optimización automática desde el menú:

### **Optimización Automática (SCE-UA)/Optimización Automática (SCE-UA)-Hidrología**

Después de elegir la optimización automática del modelo hidrológico aparecerá una ventana, que se muestra en la Figura 6, donde el usuario podrá elegir el tipo de optimización que desea realizar.



**Figura 6. Ventana con las dos opciones de optimización automática que proporciona el programa.**

A continuación se presenta una breve descripción de la información de entrada necesaria y del fichero de salida del módulo de optimización automática.

### 8.1.- INFORMACIÓN DE ENTRADA

Para la correcta ejecución del módulo de optimización automática es necesario que el modelo TETIS funcione correctamente en su forma de simulación, es decir, se recomienda que el modelo haya sido ejecutado satisfactoriamente.

Si se elige la modalidad de optimización automática Multi-Evento es necesario que esté el fichero MULTICALIB.TXT con obligatoriamente los nombres de los ficheros de entrada de los eventos que se quieren optimizar simultáneamente y los nombres de los correspondientes ficheros de condiciones de humedad inicial hantec.sds previamente calculados (los nombres de los ficheros de salida y de los ficheros de condiciones de humedad finales en esta caso no son obligatorios porque no se usan), cuyo formato se muestra en la Tabla 19.

|             |              |
|-------------|--------------|
| HANTEC.SDS  | 01010000.E03 |
| HANTEC2.SDS | EVENTO131    |
| HANTEC2.SDS | 01010000.E03 |
| .           | .            |
| .           | .            |
| .           | .            |

**Tabla 19. Formato del fichero “MULTIPLE.TXT”**

Cuando se elige la optimización automática Multi-Evento tienen que existir los ficheros de condiciones iniciales hantec.sds correspondientes a los eventos que se deseen optimizar, además estos ficheros tienen que haber sido generados previamente con el mismo paso temporal de los eventos que se quieran calibrar. En otras palabras si los eventos están a escala horaria, también el hantec.sds tendrá que haber sido generado a escala horaria. Esto es porque los factores correctores dependen de la escala temporal, por lo tanto si por ejemplo el factor corrector FC1 del almacenamiento estático se ha obtenido para datos a escala diaria, su valor está pensado para corregir un volumen máximo diario para el  $H_u$ . Esto significa que no será el mismo si se considera una escala horaria y hay que transformar su valor a la escala del evento.

Al lanzar la optimización automática Multi-Evento el programa crea un fichero llamado MULTIEVENTO.TXT, que se explica en detalle en el párrafo 8.1.1.

### **8.1.1.- Fichero “MULTIEVENTO.TXT”**

Este fichero viene creado por el programa cuando se lanza la calibración automática multi-evento que consiste en la calibración de diversos eventos no consecutivos observados en la misma cuenca. En efecto hay que tener en cuenta que estos eventos deben de responder al mismo juego de factores correctores

El programa crea este fichero a partir de los ficheros individuales (véase capítulo 2.9) que contienen la información de cada uno de los eventos que se quieren calibrar simultáneamente. Los ficheros de evento tienen que tener el mismo formato (cedex o columna) y los eventos el mismo paso de tiempo, el mismo número de estaciones de precipitación, aforo, evapotranspiración, nieve, etc. Además, no solo las estaciones incluidas en los ficheros de entrada tienen que ser las mismas sino que también seguir exactamente la misma secuencia.

En el fichero multievento.txt el programa copia, después del encabezado, unas tras otras todas las series temporales de cada uno de los ficheros de entrada que se quieren

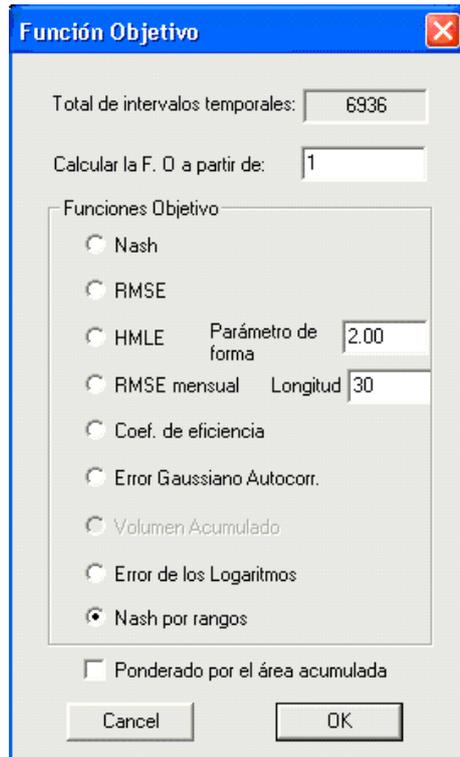
calibrar simultáneamente. El encabezado del fichero multievento.txt será igual al del fichero de entrada que se encuentre en la primera línea del fichero multiple.txt, también necesario para la calibración automática multi-evento, a menos de la línea con código G que incluirá el número total de pasos de tiempo (suma de los pasos de tiempo de cada fichero de entrada).

### **8.1.2.- La función objetivo**

El modelo TETIS incluye varios medidores de incertidumbre que pueden ser empleados como función objetivo dentro del proceso automático de optimización. El método de optimización busca los valores de los factores correctores, estados de almacenamiento inicial y factor de interpolación de la lluvia que haga mínimo o máximo el valor de esta función, según sea el caso de minimización o maximización, respectivamente. Las funciones que se incluyen corresponden a la que se muestran en la Figura 7:

- El error cuadrático, RMSE
- Máxima verosimilitud Heteroescedástica, HMLE. Este estimador incluye un factor de forma l que debe ser suministrado al programa, inicialmente se sugiere el valor de 2.0 pero puede ser cualquiera otro.
- Índice de Nash y Sutcliffe, NSE.
- El error cuadrático mensual, RMSE mensual, cuya longitud del mes se sugiere de 30 días, pero este valor puede ser semanal, para 7 días o quincenal, para el caso de 15 días.
- Coeficiente de eficiencia, CE.
- Error Gaussiano Autocorrelacionado, AMLE
- Volumen acumulado (solo para sedimentos)
- Errores de los Logaritmos
- Nash por rangos (véase manual teórico del modelo, apartado 5.5.3)

Con carácter informativo se presenta el número de intervalos temporales que contiene el episodio que va a ser optimizado.



**Figura 7. Ventana con el tipo de función objetivo a utilizar durante el proceso de optimización automática.**

Una vez se selecciona la función objetivo se presiona la tecla **<OK>** y se continua con el siguiente paso.

Si la función elegida es la denominada Nash por rangos es necesario un fichero de texto que se llama UMBRALES.TXT.

### **8.1.3.- Fichero “UMBRALESQ.TXT”**

Este fichero de texto tiene que existir cuando, para la calibración automática, se desea usar la función objetivo denominada ‘Nash por rangos’. El nombre es fijo y no se puede cambiar.

Este fichero, que se muestra en la Tabla 20, contiene la siguiente información:

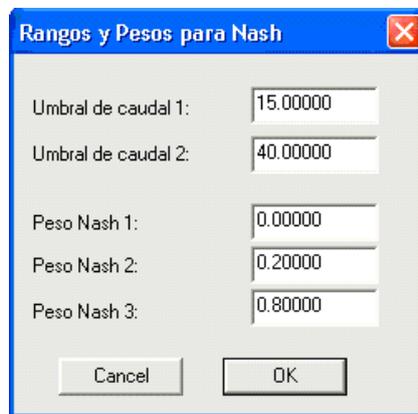
- i) Los dos umbrales para definir los rangos de caudales que se quieren calibrar automáticamente (hasta un máximo de tres rangos; por ejemplo: caudales pequeños, medios y altos)
- ii) Los tres pesos que se quiere asociar los índices de Nash calculados para cada rango.

El usuario puede definir desde 2 hasta un máximo de 3 rangos, sin embargo el fichero UmbralQ.txt tiene que tener las 5 líneas que se muestran en la Tabla 20.

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| 15.00000      | Primer umbral                                     | $Q \leq 15$ (m <sup>3</sup> /s)         |
| 40.00000      | Segundo umbral                                    | $15 \leq Q \leq 40$ (m <sup>3</sup> /s) |
| 0.0000000E+00 | Peso asociado al índice de Nash del primer rango  |   |
| 0.2000000     | Peso asociado al índice de Nash del segundo rango |   |
| 0.8000000     | Peso asociado al índice de Nash del tercer rango  |   |

**Tabla 20. Fichero UmbralQ.txt para la calibración automática.**

Los valores contenidos en este fichero se pueden cambiar desde una ventana del programa que se abre automáticamente al seleccionar como función objetivo la de ‘Nash por rangos’, como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8. Ventana con los valores de los umbrales y los pesos para la función objetivo ‘Nash por rangos’.**

#### **8.1.4.- Fichero “VAR-SCEUA.TXT”**

En el programa TETIS los valores iniciales y los rangos máximo y mínimo para cada factor a optimizar son muy importantes y deben ser asignados por el usuario de forma responsable y coherente con la realidad. Por lo tanto, esta información se presenta en pantalla mediante una ventana, tal como se muestra en la Figura 9.

**Calibración Automática SCE-UA**

| Límite inferior rango de búsqueda   | Límite superior rango de búsqueda | Valor inicial | Límite inferior rango de búsqueda | Límite superior rango de búsqueda  | Valor inicial |         |         |
|---|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|--|---------------|---------|---------|
| <input checked="" type="checkbox"/> [FC-1] Almacenamiento estático máximo | 0.90000                           | 1.00000       | 0.92670                           | <input checked="" type="checkbox"/> H1 - Almacenamiento estático máximo (%)              | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> [FC-2] Evapotranspiración             | 0.90000                           | 1.00000       | 1.05000                           | <input checked="" type="checkbox"/> H2 - Agua en superficie (mm)                         | 0.00000       | 1.00000 | 3.00000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> [FC-3] Infiltración                   | 0.00000                           | 0.10000       | 0.16000                           | <input checked="" type="checkbox"/> H3 - Almacenamiento gravitacional (mm)               | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> [FC-4] Escorrentía directa            | 0.00000                           | 0.20000       | 0.30000                           | <input type="checkbox"/> H4 - Nivel del acuífero (mm)                                    | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input type="checkbox"/> [FC-5] Percolación                               | 0.00000                           | 0.50000       | 0.20000                           | <input type="checkbox"/> H5 - Cauce a sección llena (%)                                  | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input type="checkbox"/> [FC-6] Flujo Subsuperficial                      | 9.00000                           | 11.00000      | 400.00000                         | <input type="checkbox"/> Factor de interpolación de lluvia (beta)                        | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input type="checkbox"/> [FC-7] Pérdidas subterráneas                     | 6.00000                           | 7.00000       | 0.00000                           | <input checked="" type="checkbox"/> Coef. de calibración beta de la interpolación de swe | 0.47000       | 0.52000 | 0.50000 |
| <input type="checkbox"/> [FC-8] Flujo Base                                | 500.00000                         | 530.00000     | 125.00000                         | <input checked="" type="checkbox"/> Factor de fusión grado-día                           | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
| <input type="checkbox"/> [FC-9] Velocidad del flujo en cauces             | 0.30000                           | 0.50000       | 0.20000                           | <input type="checkbox"/> Factor de fusión grado-día por lluvia                           | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |
|   |                                   |               |                                   | <input type="checkbox"/> Temperatura Base de fusión de nieve                             | 0.00000       | 1.00000 | 1.00000 |

Cancel OK

**Figura 9. Ventana con los valores iniciales y el rango máximo y mínimo para todas las variables a optimizar mediante el método SCE-UA.**

Una vez seleccionados los valores deseados y marcadas la variables que se van a optimizar se presiona la tecla **<OK>** y la información de esta ventana es almacenada en el fichero “VAR-SCEUA.TXT”. Fichero que contiene un listado con los rangos y valores iniciales para los diferentes factores correctores, estados de almacenamiento inicial y el factor de interpolación de la lluvia. En la Tabla 21 se presenta un ejemplo del fichero.

|           |          |              |   |                                |
|-----------|----------|--------------|---|--------------------------------|
| 0.4000000 | 2.500000 | 1.000000     | T | [FC-1 Almacenamiento estático] |
| 0.7000000 | 1.300000 | 0.700000     | T | [FC-2 Evapotranspiración]      |
| 0.0000000 | 0.800000 | 0.400000     | T | [FC-3 Infiltración]            |
| 0.0000000 | 0.400000 | 5.000000E-02 | T | [FC-4 Escorrentía directa]     |
| 0.0000000 | 0.200000 | 5.000000E-03 | F | [FC-5 Percolación]             |
| 100.00000 | 1000.000 | 200.0000     | F | [FC-6 Flujo subsuperficial]    |
| 0.0000000 | 0.200000 | 0.000000     | F | [FC-7 Pérdida subterráneas]    |
| 25.000000 | 400.0000 | 40.00000     | F | [FC-8 Flujo Base]              |
| 0.8000000 | 1.200000 | 0.900000     | F | [FC-9 Velocidad del flujo]     |
| 0.0000000 | 100.0000 | 1.000000     | T | [H-1 Alm. Estático inicial]    |
| 0.0000000 | 10.00000 | 1.000000     | T | [H-2 Agua en superficie]       |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000     | T | [H-3 Alm. gravitacional]       |

|           |          |          |   |                                    |
|-----------|----------|----------|---|------------------------------------|
| 0.0000000 | 40.00000 | 1.000000 | F | [H-4 Estado inicial acuífero]      |
| 0.0000000 | 100.0000 | 1.000000 | F | [H-5 Estado inicial del cauce]     |
| 0.0000000 | 0.100000 | 0.000000 | F | [beta - Factor de interp.Ppt]      |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000 | F | [hped - Evaporación profunda]      |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000 | T | [ $\beta$ - Coef. Interpol. nieve] |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000 | T | [ro1 - Factor de fusión]           |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000 | F | [ro2 - Fact. de fusión lluvia]     |
| 0.0000000 | 1.000000 | 1.000000 | F | [Tb - Temperatura base]            |

**Tabla 21: Fichero “VAR-SCEUA.TXT” que contiene el rango (valor inferior y superior), el valor inicial y una variable lógica, todas ellas necesarias para la optimización automática.**

El primer valor corresponde al rango inferior de la búsqueda, el siguiente corresponde al valor superior de búsqueda, luego se indica un valor de inicio, que debe estar comprendido entre el valor inferior y el superior.

Finalmente se observa una variable lógica que indica si se debe incluir en el proceso de optimización o no, lo cual permite seleccionar las variables que se desean optimizar, puesto que en numerosas ocasiones se conocen previamente algunos de estos valores. En negrita se indica el respectivo factor corrector o almacenamiento asociado.

En caso que no exista este fichero, el programa TETIS lo genera automáticamente con valores predeterminados y que deben ser cuidadosamente analizados para cada caso por el usuario.

## 8.2.- RESULTADOS

Como resultado del módulo de optimización automática se obtienen los factores correctores del modelo, los estados de almacenamiento inicial y el factor de interpolación de la lluvia que minimizan o maximizan, según el caso, la función objetivo seleccionada. Posteriormente, los ficheros “CALIB.TXT” y “PARAMGEO.TXT” son actualizados, de tal forma que la siguiente ejecución del modelo TETIS ya incluya los respectivos valores óptimos.

En la Tabla 22 se observa el fichero “RES-SCEUA.TXT” con los resultados obtenidos después de una optimización según el método del SCE-UA, el cual incluye el eco de los datos o variables seleccionadas para la optimización y la función objetivo.

```

Fecha:22/03/2003 hora 17:34:55.5
Cuenca
      6          3          3
R1    0.60000    1.40000    1.00000
R3    0.10000    1.50000    1.00000
R5    0.00100    1.00000    1.00000
R8    0.00000    100000.00000    10000.00000
R9    0.50000    1.50000    1.00000

```

Func-Obj

HMLE

RMSE

Nash

RMSE-mes 30

Coef-efic

%Vol

Qmax

Tpico

Vol

ErrGA

ErrorLogaritmos

Nash por rangos

Se han ponderado por el area de la cuenca

La funcion seleccionada es: RMSE

```

      Ha sido evaluada desde:          1 hasta          427
1.000  1.000  1.000  1.000  5000.00  10000.00  1.000  14.891 ...
1.332  1.214  1.667  0.345 17423.67  8991.83  1.388  25.524 ...
0.895  0.783  0.393  0.603  2781.26  47778.09  0.846  19.383 ...
.      .      .      .      .      .      .      .      .
.      .      .      .      .      .      .      .      .

```

**Tabla 22. Fichero con los resultados de la optimización “RES-SCEUA.TXT”.**

Este fichero contiene los resultados de la optimización durante cada iteración y en la parte superior se indica el rango (valor inferior y superior), el valor inicial de cada variable seleccionada.

El formato de este fichero ha sido creado de tal forma que con pequeños cambios sea compatible con el programa GLUE desarrollado en la Universidad de Newcastle, Inglaterra y que sirve para realizar el análisis de incertidumbre generalizado y que permite valorar de forma cualitativa la capacidad predictiva de los modelos hidrológicos de tipo conceptual.

El fichero de resultados mostrado en la Tabla 22 incluye todas las iteraciones realizadas por el modelo de optimización con sus respectivos resultados, para poder realizar un análisis de estos datos en necesario exportarlo a una hoja de cálculo o una base de datos y encontrar los valores mínimos.

Este fichero es generado por el modelo durante el proceso de optimización y es de carácter informativo para ser utilizado en caso que el usuario desee extraer conclusiones relacionadas al método de optimización.

Finalmente cabe destacar que en este fichero no solo se muestra el valor del Nash promedio de los rangos, sino que también cada índice de Nash para cada rango de caudales definido por el usuario.

## 9.- MÓDULOS VARIOS

Se trata de diferentes rutinas o subprogramas incluidos dentro del modelo TETIS que por sí solos no sirven de ayuda a la ejecución del modelo, pero hacen que funcione de forma más amigable y eficiente.

### 9.1.- CONFIGURACIÓN INICIAL.

Esta opción incluye valores por defecto que el modelo utiliza en cuanto a formatos y nombres de ficheros, pero es posible hacer modificaciones según las preferencias del usuario.

#### 9.1.1.- Directorios y Ficheros

La ejecución de este procedimiento se realiza mediante la opción del Menú:

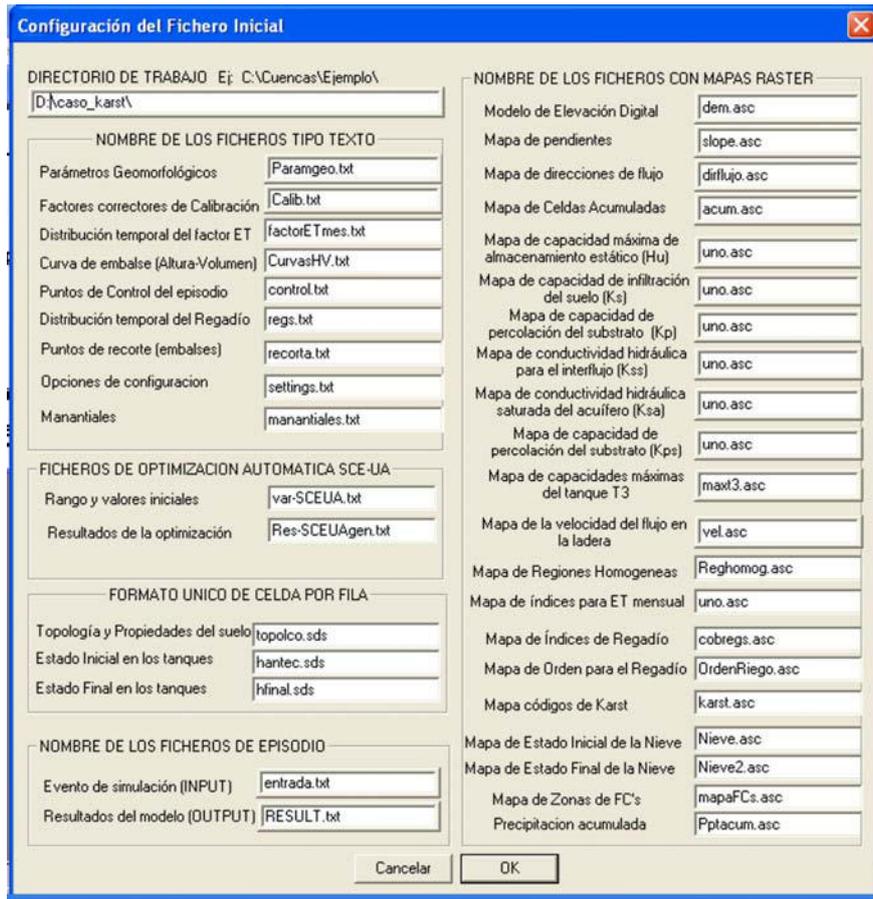
#### *Configuración Inicial / Directorios y Ficheros*

Una vez se ejecuta esta opción aparece en pantalla la ventana que se muestra en la Figura 10. En donde se despliega la información contenida en fichero "FILESSP.TXT" para ser modificada por el usuario.

Esta ventana sirve para revisar los nombres de los ficheros que emplea el modelo, así como el directorio en donde se encuentran ubicados los datos (primera línea). Los nombres de los ficheros con datos deben coincidir exactamente con los indicados en esta pantalla para que no falle el programa, en caso contrario se deben modificar para finalmente presionar la tecla <OK>.

Una vez revisados los nombres el programa de forma automática actualiza el fichero "FILESSP.TXT". Es importante verificar la dirección completa del directorio donde se encuentra la información y el nombre de los ficheros de evento, tanto de entrada al modelo como el nombre del fichero de resultados.

Para el correcto funcionamiento de esta opción sólo debe existir el fichero "FILESSP.TXT".



**Figura 10. Ventana con la dirección donde se encuentra la información y los nombres de los ficheros a utilizar.**

### 9.1.2.- Configuración de información

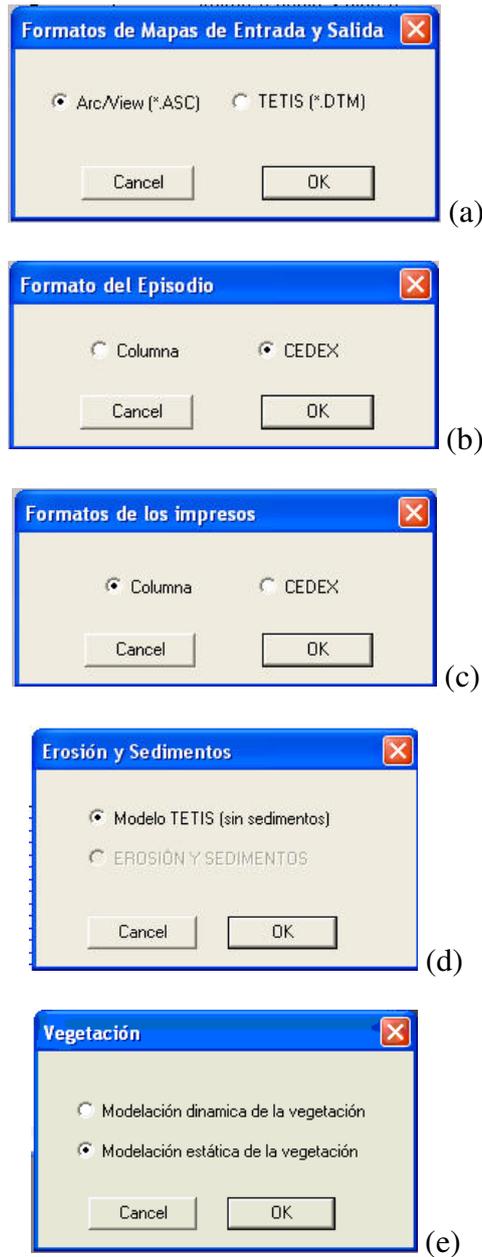
La ejecución de este procedimiento se realiza mediante la opción del Menú:

#### **Configuración Inicial / Configuración de Información**

Esta opción del Menú permite modificar las opciones sobre la configuración inicial en los datos de entrada y en los datos de salida de la siguiente forma:

- i) El formato de los mapas es ASC
- ii) El formato del episodio de entrada es Columna o CEDEX
- iii) El formato del fichero de resultados es Columna o CEDEX
- iv) Modelo Tetis con sedimentos o sin sedimentos
- v) Modelo Tetis con vegetación dinámica o no

Una vez se ejecuta esta opción aparecen en pantalla tres ventanas, tal como se muestra en la Figura 11, las ventanas se presentan de forma secuencial.



**Figura 11. Ventanas con la configuración por defecto de: a) Tipos de mapas b) Formato del episodio c) Formatos de salida, d) Modelo Tetis sin sedimentos y e) modelo tetis con Vegetación dinámica (**

La información relacionada a cada uno de estos interrogantes está almacenada en el fichero "SETTINGS.TXT", de tal forma que una vez se ha oprimido el último OK se realiza la actualización automática de este fichero.

De esta forma el Modelo TETIS es flexible en cuanto a los formatos de entrada y salida.

## **9.2.- VISUALIZACIÓN INICIAL**

Esta subrutina presenta de forma visual algunos de los ficheros de datos, de tal forma que permita al usuario visualizarlos en cualquier momento. Además sirve para comprobar los formatos, puesto que si se encuentran errores en la visualización, se debe básicamente a fallos en los formatos de los respectivos ficheros.

### **9.2.1.- El fichero episodio**

La ejecución de este procedimiento se realiza mediante la opción del Menú:

#### **Visualización Inicial / Ver episodio de entrada**

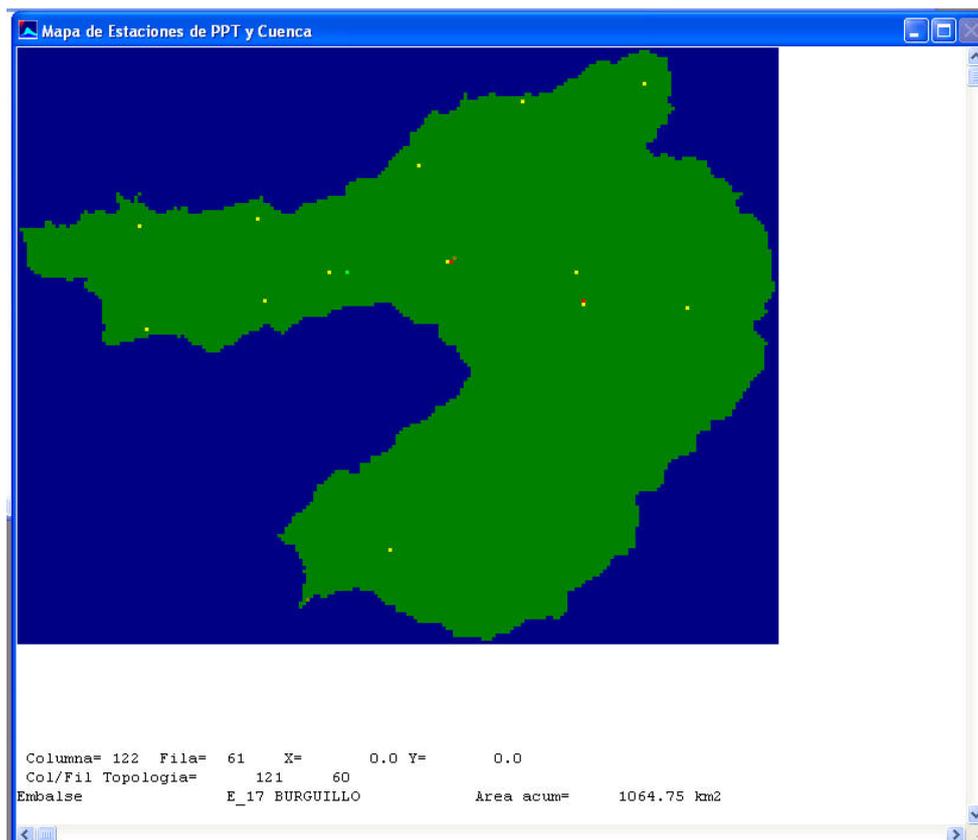
Esta opción abre el programa de edición WORDPAD con el fichero de episodio, sirve para revisar la información del episodio y hacer alguna modificación si es necesaria. Para salir de esta opción es necesario salir del programa WORDPAD.

### **9.2.2.- Estaciones en la cuenca**

La ejecución de este procedimiento se realiza mediante la opción del Menú:

#### **Visualización Inicial / Ver estaciones en la cuenca**

Esta opción del menú despliega un mapa de localización de la cuenca y de las estaciones empleadas para el cálculo de la simulación. A modo de ejemplo se muestra la Figura 12.



**Figura 12. Ejemplo de la ventana que se despliega con la localización de las estaciones en la zona de estudio. En verde se indica la cuenca a analizar.**

Esta gráfica sirve para dar información al usuario sobre las estaciones y no tiene incidencia dentro de los cálculos de la simulación. El usuario puede utilizar el botón izquierdo del ratón para seleccionar algún punto de interés, e inmediatamente en la parte inferior aparece información asociada a este punto: Nombre de la estación, tipo de estación y localización. Para salir de esta opción se debe oprimir el botón derecho del ratón.

Esta subrutina requiere la existencia del fichero "FILESSP.TXT", del fichero de episodio y del fichero de topología "TOPOLCO.SDS", puesto que a partir de la información topológica se construye un mapa que muestra la zona de estudio en color verde, la zona externa a la cuenca de color azul y las estaciones incluidas en él área de diferente color. Se muestran todas las estaciones incluidas en el fichero episodio.

### **9.2.3.- Visualización de mapas**

La ejecución de este procedimiento se realiza mediante una de las siguientes opciones del Menú, dependiendo del mapa que se desee visualizar:

**Visualización Inicial / Mapa Topografía cuenca**

**Visualización Inicial / Mapa Celdas acumulada**

**Visualización Inicial / Mapa Dirección del flujo**

**Visualización Inicial / Mapa Subcuencas Tipología**

**Visualización Inicial / Mapa Agua Util Hu**

**Visualización Inicial / Mapa Conductividad del suelo Ks**

**Visualización Inicial / Mapa Conductividad de la roca Kp**

**Visualización Inicial / Mapa Altura Equivalente de Nieve**

**Visualización Inicial / Mapa Índices de Cobertura Vegetal**

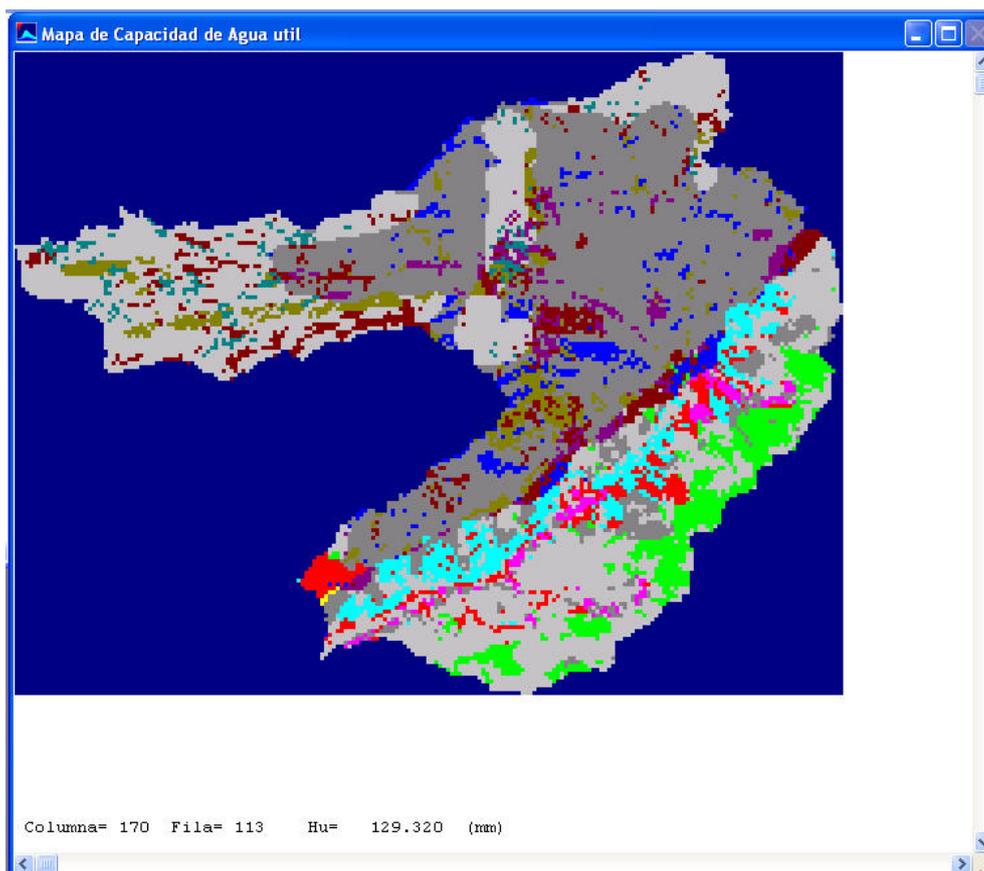
**Visualización Inicial / Mapa Índices de Zonas de Riego**

**Visualización Inicial / Mapa de Pendientes**

Una vez seleccionado el mapa respectivo se observa que cuando se presiona el botón izquierdo del ratón en alguna parte del mapa, aparece en la parte inferior izquierda el valor asociado a esa celda. Para salir del mapa sólo es necesario oprimir el botón derecho del ratón (presionado en cualquier parte del mapa).

Para el correcto funcionamiento de estas rutinas de visualización es necesario que existan los respectivos mapas de datos o el fichero generado con la información de Topología y Edafología "TOPOLCO.SDS". Para este último caso, sólo se muestra en pantalla la zona de estudio y no se incluye todo el mapa, que en ocasiones puede ser muy grande.

Un ejemplo de la visualización de mapas se presenta en la Figura 13.



**Figura 13. Visualización del Mapa de agua útil o Almacenamiento estático Máximo, Hu**

### **9.3.- MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS**

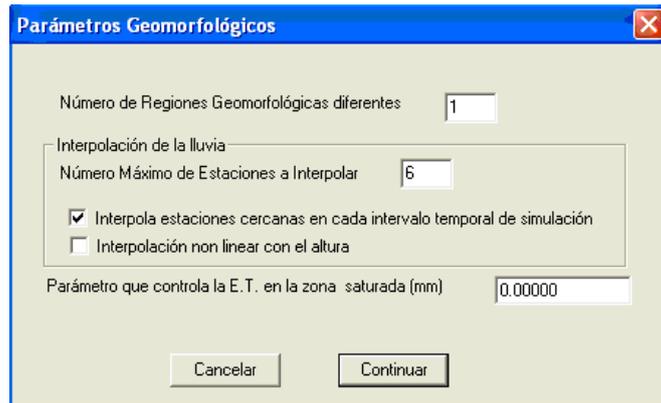
La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

**Simulación / Modificar los Parámetros Geomorfológicos**

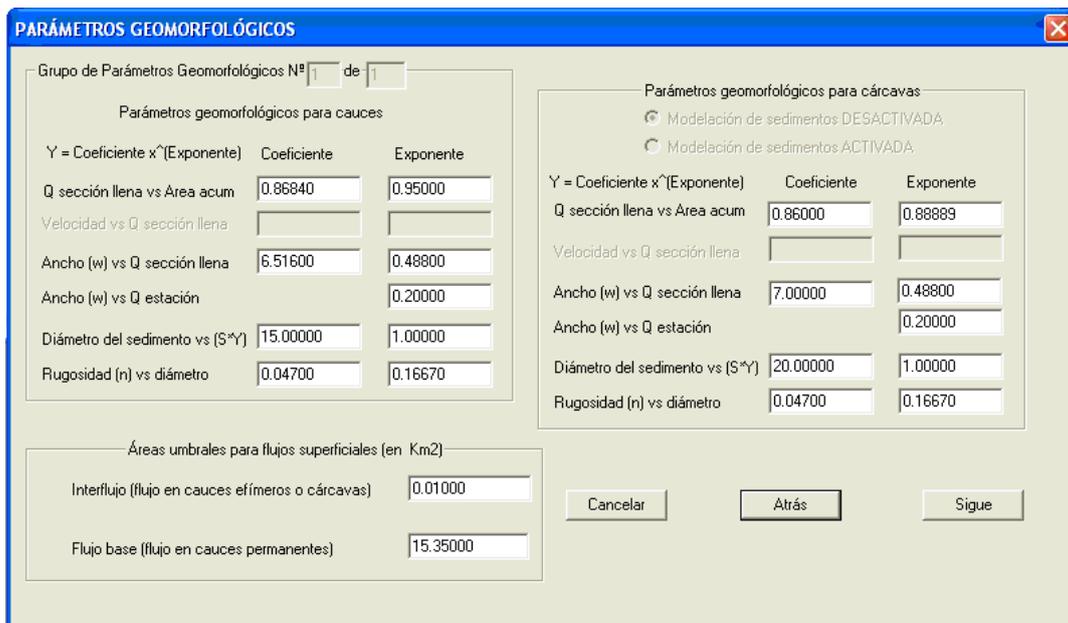
En la Figura 14 se muestra un ejemplo de la ventana que se despliega en pantalla, la cual contiene la información que puede ser modificada por el usuario.

Posteriormente aparece en pantalla una nueva ventana, la cual se muestra en la Figura 15 y que incluye los valores de los parámetros geomorfológicos, tanto de cauce como de cárcavas, para cada una de las regiones homogéneas.

Toda esta información es extraída del fichero "PARAMGEO.TXT", por lo tanto es necesario que exista este fichero para que funcione correctamente esta rutina. Si este fichero no existe al comienzo de la simulación, el programa lo crea con valores por defecto que pueden ser cambiados con esta opción del menú.



**Figura 14.** Ventana con valores de número de regiones homogéneas, estaciones a interpolar y el parámetro que controla la E.T. en la zona saturada y la selección del tipo de expresión deseada para el incremento con la cuota (desactivo en la versión 8.1).



**Figura 15.** Ventana con los valores de los Parámetros Geomorfológicos para cauce (izquierda) y cárcavas (derecha) en las diferentes regiones homogéneas.

En caso de existir más de una región homogénea es factible volver a la pantalla anterior mediante el botón <ATRÁS>, si desea continuar se debe oprimir el botón <SIGUE>. Una finalizada la revisión de los parámetros geomorfológicos en cada región el programa actualiza el fichero "PARAMGEO.TXT" con los nuevos valores.

#### 9.4.- MODIFICACIÓN DE LOS FACTORES CORRECTORES DE CALIBRACIÓN

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

### Simulación / Cambiar Factores correctores de Calibración y Fusión de Nieve

Inmediatamente aparece en pantalla una ventana que se muestra en la Figura 16 y que incluye los valores de los factores correctores y el factor de interpolación de la lluvia, estos valores son tomados del fichero “CALIB.TXT”.

| FACTORES CORRECTORES DEL MODELO  |             | PARÁMETRO DE INTERPOLACIÓN DE LA LLUVIA  |         |
|--|-------------|--|---------|
| [FC-1] Almacenamiento estático   | 1.00000     | Factor que incluye el efecto de la altitud en la lluvia (mm/m)                 | 0.00000 |
| [FC-2] Evaporación   | 1.00000     | PARÁMETROS EMPLEADOS EN LA FUSIÓN DE NIEVE                                     |         |
| [FC-3] Infiltración  | 1.00000     | Factor de calibración para la interpolación de la altura equivalente de nieve: | 0.00000 |
| [FC-4] Escorrentía Superficial   | 1.00000     | Coeficiente de Fusión de nieve (mm/°C día)                                     | 0.00000 |
| [FC-5] Percolación   | 1.00000     | Coef. de Fusión de nieve con lluvia (mm/°C día)                                | 0.00000 |
| [FC-6] Flujo Subsuperficial  | 1.00000     | Temperatura Base para fusión de nieve (°C)                                     | 0.00000 |
| [FC-7] Pérdidas Subterráneas   | 0.00000     |  |         |
| [FC-8] Flujo base  | 1000.00000  |  |         |
| [FC-9] Velocidad del flujo   | 1.00000     |  |         |
| Exponente de infiltración al tanque estático   | 0.00000     |  |         |
| Factor corrector capacidad máxima tanque gravitacional                                       | 10000.00000 |  |         |
| Factor corrector de erosión en ladera (Kálic y Richardson, original)                         |             |  |         |
| Factor corrector de la capacidad de transporte de sedimentos en cárcavas (Engelund y Hansen) |             |  |         |
| Factor corrector de la capacidad de transporte de sedimentos en cauce (Engelund y Hansen)    |             |  |         |

**Figura 16. Ventana con los valores de los Factores Correctores y el Factor de Interpolación de la Lluvia (de momento no están activos los campos relativos a la nieve)**

Cuando se han realizado las modificaciones necesarias se presiona la tecla <OK> y el programa actualiza el contenido del fichero “CALIB.TXT”, esto último se realiza de forma invisible para el usuario.

Para la correcta ejecución de esta rutina es necesaria la existencia de los ficheros “CALIB.TXT” y “FILESSP.TXT”.

### **9.5.- DEFINICIÓN DEL CONTORNO INICIAL DE NIEVE**

Se ha incluido un módulo o rutina para la estimación inicial de un contorno con nieve. Esta opción no es obligatoria si se dispone de un mapa con la zona cubierta con nieve en formato de exportación ASCII de ArcInfo (este mapa debe contener valor 1 en las celdas con cubierta de nieve y 0 en las restantes). En caso de no disponer de información alguna sobre las probables zonas cubiertas con nieve, es posible acudir a esta rutina que define la zona cubierta con nieve como la región que se localiza por encima de una cota definida por el usuario.

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

#### **Simulación / Define Contorno Inicial de Nieve**

Aparece entonces el mapa con el Modelo de Elevación Digital y mediante el uso del botón izquierdo del ratón es posible observar en la parte inferior izquierda de la pantalla

la elevación de cada celda señalada con el ratón. Para seleccionar la celda con la elevación a partir de la cual se considera que existe nieve, únicamente es necesario oprimir el botón derecho del ratón sobre la celda seleccionada.

Esta rutina genera entonces el fichero “NIEVE.ASC”, en donde a las celdas con elevación mayor o igual a la seleccionada se les asigna el valor 1, mientras que a las celdas restantes se le asigna el valor cero.

Para la ejecución de esta rutina debe existir el fichero con la Topología y la Edafología, TOPOLCO.SDS, puesto que este fichero suministra las cotas, que conforman la información básica para definir la zona con nieve.

## **9.6.- RECUPERACIÓN DE FACTORES Y PARÁMETROS ANTERIORES**

Durante el proceso de la calibración manual se van modificando los valores de los factores correctores, de factores geomorfológicos y de los parámetros de fusión de nieve. Por tal motivo, es frecuente que un nuevo conjunto de factores correctores no genere resultados satisfactorios, por lo que es deseable volver a seleccionar el conjunto anterior. Esta opción posible dentro del programa mediante la opción del Menú:

### **Simulación / Recupera FC y Param. Geom. de simulación anterior**

El programa pregunta si desea recuperar los valores anteriores de los factores correctores y Parámetros Geomorfológicos.

Esta subrutina es transparente para el usuario, es decir, el usuario no se percata de lo sucedido. Cada vez que se ejecuta la simulación hidrológica mediante TETIS se guardan los ficheros “CALIB.TXT” y “PARAMGEO.TXT” antes de que se realicen las modificaciones con los nombres “OLD-CALIB.TXT” y “OLD-PARAMGEO.TXT”, por lo tanto cuando se selecciona esta opción del Menú se borran los ficheros actuales y se renombran los antiguos.

De esta forma es factible recuperar el conjunto de factores correctores empleados en la simulación inmediatamente anterior.

Para el correcto funcionamiento de este subprograma es necesario el fichero “FILESSP.TXT” y los ficheros mencionados anteriormente. Nótese que para que existan los ficheros antiguos debe haberse ejecutado el modelo de forma satisfactoria.

## **9.7.- VISUALIZACIÓN DE LOS RESULTADOS**

Para la visualización de los resultados se tienen diferentes opciones, entre ellas se destacan las siguientes que son de utilidad al usuario:

### **9.7.1.- Fichero de resultados de simulación**

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

### Visualización de los resultados / Fichero de resultados de simulación

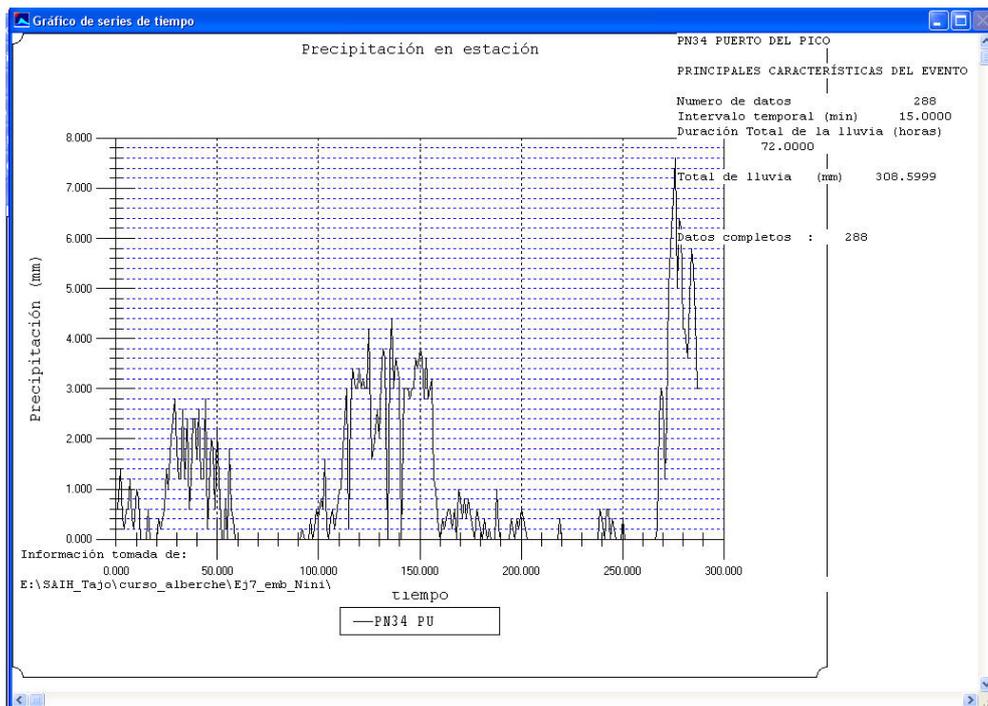
Esta opción abre el programa de edición WORDPAD con el fichero de resultados del modelo. El fichero de resultado es similar al indicado en la Tabla 12. Para salir de esta opción es necesario salir del programa WORDPAD.

#### 9.7.2.- Gráficos de precipitación

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

### Visualización de los resultados / Gráficos de Precipitación

Muestra en diferentes pantallas los hietogramas observados en cada una de las estaciones, también muestra la gráfica de los valores medios, calculados como la media aritmética de las estaciones empleadas. Un ejemplo del tipo de gráfica que muestra el programa se presenta en la Figura 17.



**Figura 17. Gráfica del Hietograma observado en una estación según el modelo TETIS.**

Para la ejecución de esta rutina son necesarios los ficheros "FILESSP.TXT" y los resultados del modelo, en caso que no se haya ejecutado el modelo, el programa lee los datos de lluvia del episodio de entrada.

### 9.7.3.- Gráficos totales

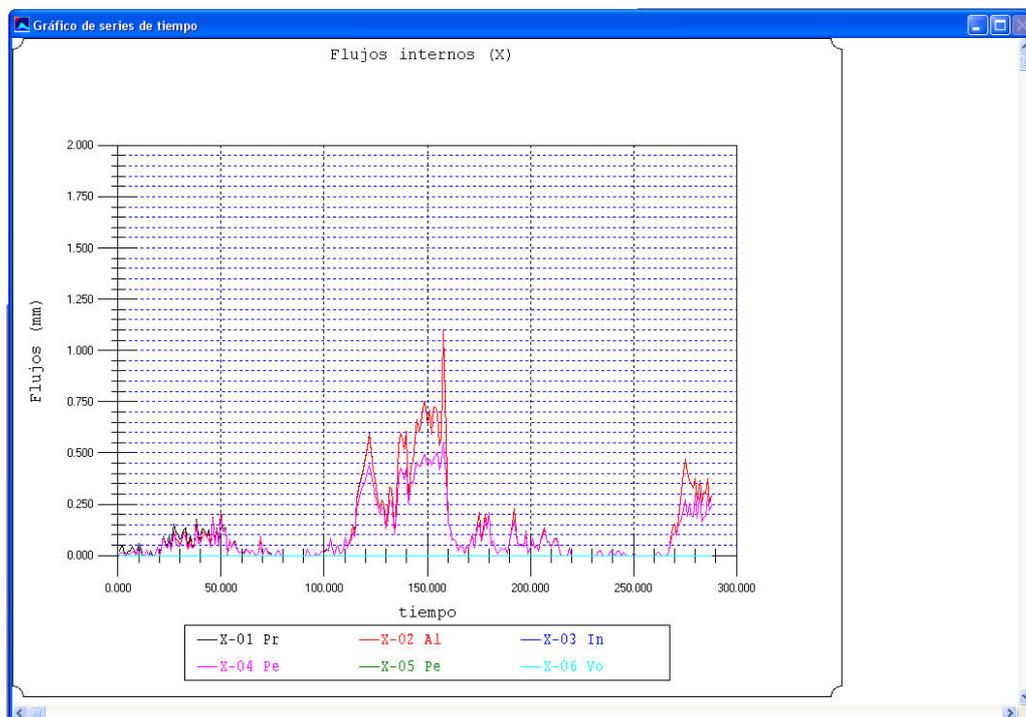
Los gráficos totales a los cuales se refiere esta rutina corresponden a los valores medios obtenidos después de la simulación hidrológica mediante TETIS en toda la cuenca. Es decir, se refiere a las series temporales del flujo horizontal, flujo vertical y al estado en los almacenamientos. Corresponden a los códigos X, Y y J que se muestran en el fichero de resultados.

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

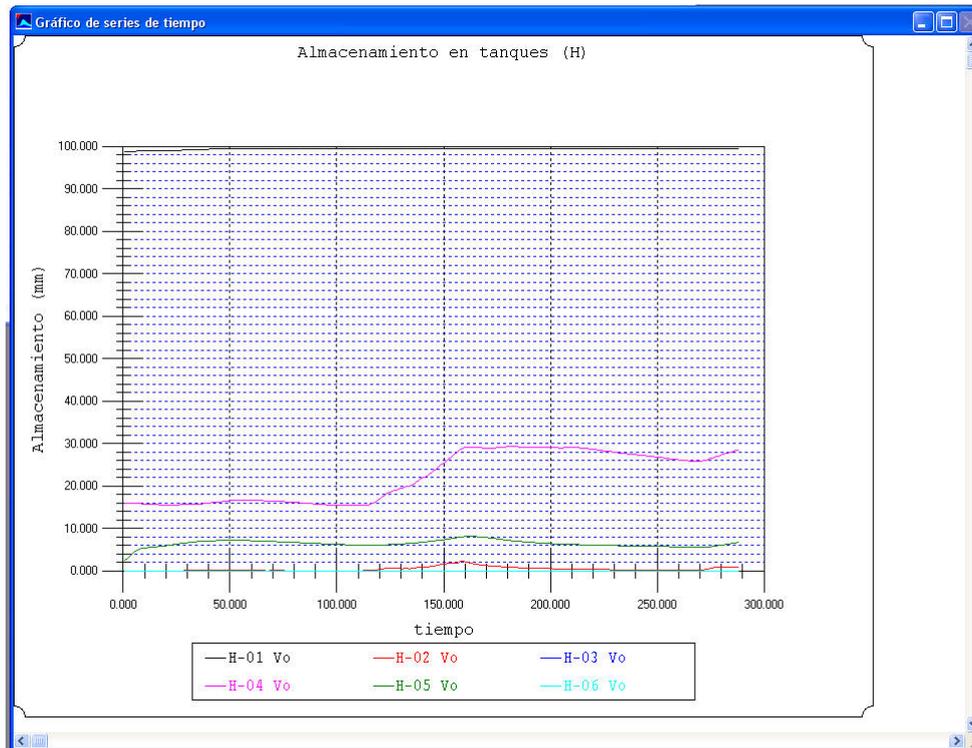
#### Visualización de los resultados / Gráficos totales

Inmediatamente aparecen en pantalla tres gráficos generados por el modelo TETIS. En la Figuras 18 a 20 se muestra un ejemplo de estos gráficos.

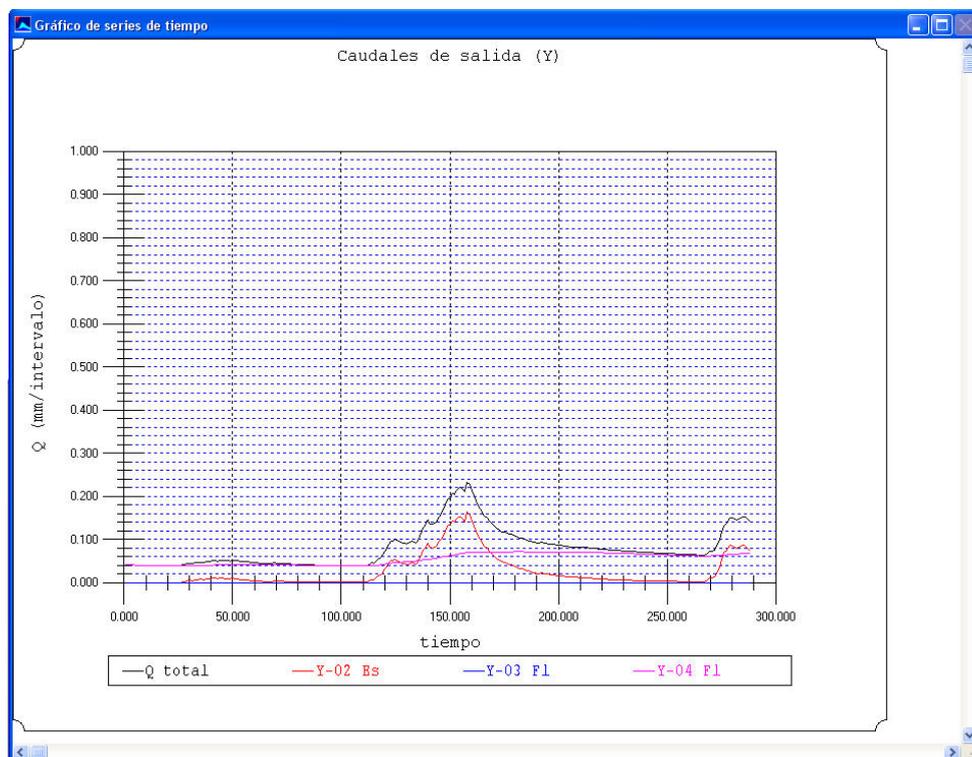
El análisis de cada una de estas gráficas permite observar el comportamiento medio de la cuenca, de tal forma que la evolución temporal de cada uno de los flujos y de los almacenamientos sirve de guía al usuario para la calibración y para realizar un análisis del funcionamiento hidráulico de la cuenca.



**Figura 18. Serie temporal de valores medios en toda la zona de estudio del flujo vertical.**



**Figura 19.** Serie temporal de valores medios (de toda la zona de estudio) en los diferentes almacenamientos.



**Figura 20.** Serie temporal de valores medios en toda la zona de estudio del flujo vertical.

#### 9.7.4.- Gráficos de resultados

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

#### Visualización de los resultados / Gráficos de Resultados

El programa revisa que exista el fichero de resultados, en caso contrario presenta un error. Inmediatamente se despliegan los mismos resultados que se obtienen después de una ejecución del modelo de simulación TETIS (Véase el apartado 7.2 y la Figura 6)

Para que funcione adecuadamente esta rutina es necesario que el modelo haya sido ejecutado de forma satisfactoria, por lo que los ficheros necesarios son "FILESSP.TXT", "CALIB.TXT", "PARAMGEO.TXT" y el fichero de resultados.

#### 9.8.- EL ÁREA DE LA CUENCA.

Esta opción es informativa, no tiene incidencia en el proceso de simulación, tan solo muestra la red de drenaje de la cuenca mediante las celdas acumuladas y luego le solicita al usuario que seleccione un punto dentro de la cuenca (presionar con el botón izquierdo del ratón dentro de cualquier punto de la cuenca es suficiente) y se despliega la información asociada a esa celda: Coordenadas, posición fila/columna y área acumulada. Si el usuario desea puede **<SELECCIONAR UN NUEVO PUNTO>** o dar por terminada esta opción presionando **<OK>**.

Un ejemplo de la pantalla que muestra el modelo TETIS se presenta en la Figura 21.

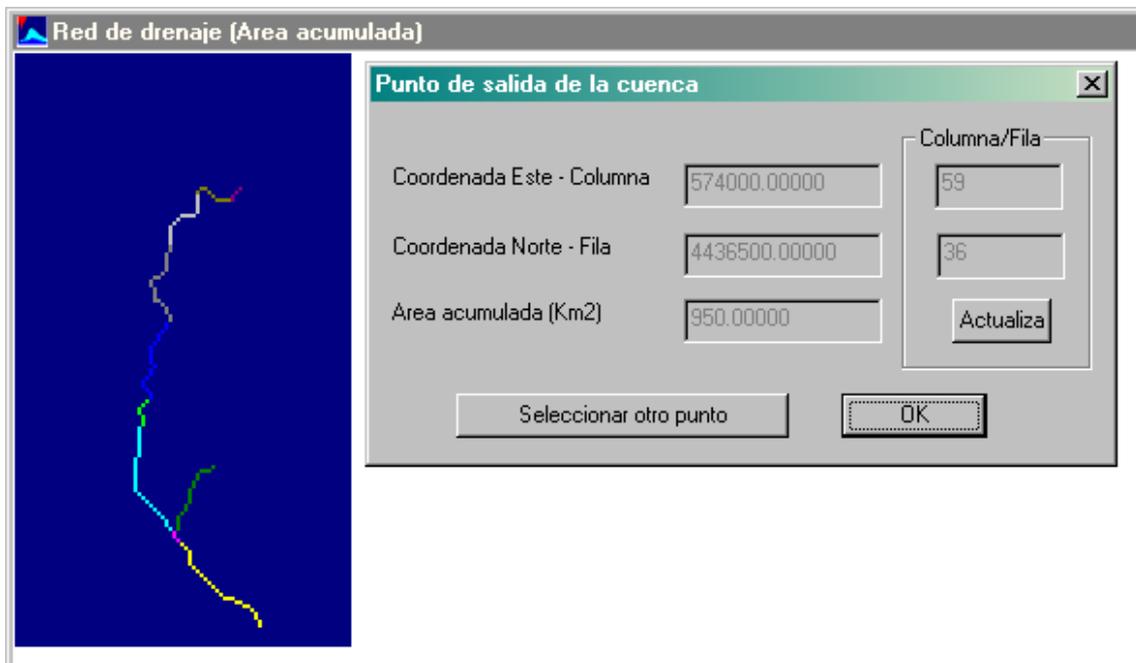


Figura 21. Ventana informativa con el mapa de celdas acumuladas

La principal utilidad de esta opción verificar las coordenadas de posibles sitios de estimación de caudales, de esta forma se obtienen las coordenadas correctas que deben ser introducidas en el fichero de episodio.

## 9.9.- EJECUCIONES MÚLTIPLES

Esta opción permite al usuario realizar múltiples ejecuciones del modelo TETIS, tanto para diferentes episodios con distintos estados de almacenamiento inicial como para simulación continua de periodos muy largos. Pero todo esto considerando que se emplean los mismos puntos de interés en todos los episodios y que se utilizan los mismos parámetros y factores correctores en todas las simulaciones.

Para la correcta ejecución de esta opción son necesarios todos los ficheros descritos en el capítulo 2 y además un fichero con el nombre “MULTIPLE.TXT” que contiene tantas filas como simulaciones se deseen realizar, y en donde para cada fila se describen los cuatro nombres de los ficheros, según el siguiente orden:

- Nombre del fichero con el estado inicial del almacenamiento inicial “HANTEC.SDS”.
- Nombre del fichero episodio de entrada
- Nombre del fichero con el estado final de los almacenamiento en la cuenca, “HANTEC2.SDS”
- Nombre del fichero de resultados del modelo de simulación

Para una correcta ejecución de este módulo, es necesario que el modelo funcione apropiadamente por sí sólo y que existan todos los ficheros que se describen en el fichero “MULTIPLE.TXT” cuyo formato se muestra en la Tabla 23.

|             |              |             |               |
|-------------|--------------|-------------|---------------|
| HANTEC.SDS  | 01010000.E03 | HANTEC2.SDS | 01010000.S03  |
| HANTEC2.SDS | EVENTO131    | HANTEC3.SDS | RES-EVENTO131 |
| HANTEC2.SDS | 01010000.E03 | HANTEC4.SDS | 0010100A.S03  |
| .           | .            | .           | .             |
| .           | .            | .           | .             |
| .           | .            | .           | .             |

**Tabla 23. Formato del fichero “MULTIPLE.TXT”**

La opción del Menú que permite las múltiples ejecuciones es:

### **Varios / Realiza Múltiples Simulaciones**

Esta operación es transparente para el usuario y sólo se indica un breve comentario en pantalla indicando el número de simulación y el nombre de los ficheros que se encuentran en “MULTIPLE.TXT”.

Una vez se realizan todas la simulaciones el usuario debe consultar los ficheros creados para analizar los resultados obtenidos.

## **9.10.- ELIMINAR FICHEROS TEMPORALES**

La ejecución de esta rutina o subprograma se realiza mediante la opción del Menú:

### **Simulación / Borrar Ficheros Temporales**

El programa TETIS genera información intermedia que es eliminada cuando se realiza esta opción del Menú, para que funcione adecuadamente es necesaria la existencia del fichero "FILESSP.TXT".

Esta opción es de gran utilidad cuando se han incluido nuevos puntos de interés en el análisis y se desea realizar una nueva simulación hidrológica. También interesa cuando se quiere realizar el análisis en otra cuenca diferente a la actual.

Se recomienda utilizar esta opción en aquellas situaciones en las cuales se desea reiniciar nuevamente el proceso de modelación, es decir, se eliminan los ficheros intermedios.

Para todos los casos descritos es necesario comenzar nuevamente la ejecución del modelo TETIS desde la Generación de la Topología y la Edafología, según lo indicado en el capítulo 3.

## 10.- CASOS DE ESTUDIO

En los últimos 10 a 12 años el grupo de investigación en hidráulica e hidrología del DIHMA de la UPV ha realizado numerosas investigaciones utilizando el modelo Tetis. Estos trabajos abarcan estudios en cuencas de un amplio rango de tamaños y escalas espacio-temporales, desde el estudio de eventos de crecida con discretización temporal de 5 minutos, hasta estudios a escala diaria de recursos hídricos, estudio de sequías u otras aplicaciones. La escala espacial, normalmente fluctúa entre decenas de metros hasta 1 kilómetro de tamaño de celda.

Otros estudios abarcan varias escalas temporales por separado, como por ejemplo un estudio de avenidas en épocas de estiaje en Cantabria, para el cuál se han implementado dos modelos, uno diario (condiciones medias en las épocas de estiaje), y uno horario (para una simulación adecuada de los eventos de crecida en estas épocas), o un estudio en un pequeña cuenca de Valencia (Rambla del Poyo), en el que se ha implementado un modelo diario para describir condiciones antecedentes de humedad a otro modelo complementario de eventos a una escala temporal mucho menor.

A continuación se citan algunos de estos estudios (Más información en: <http://luvia.dihma.upv.es/>).

DIHMA-UPV. 1997. *Estudio hidrológico de la crecida del torrente de Arás en Biescas (Huesca) del día 7 de agosto de 1996*. Confederación Hidrográfica del Ebro.

DIHMA-UPV, 2001. *Un modelo de predicción de crecidas para el S.A.I.H. de la confederación hidrográfica del Tajo*. 224p.

DIHMA-UPV, 2003. *Modelización de los recursos hídricos de las cuencas de los ríos de la Comunidad Autónoma del País Vasco*. Consultora Intecsa-Inarsa para la Dirección de Aguas del Depto. De Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco.

DIHMA-UPV, 2004. *Implementación del modelo distribuido de simulación hidrológica TETIS v. 6 en la cuenca del Barranco de Torrent (Valencia)*. Confederación Hidrográfica del Júcar.

DIHMA-UPV, 2005. *Mejoras del modelo de simulación hidrológica distribuida TETIS*. Plan Nacional de I+D+I, Ministerio de Ciencia y Tecnología (REN2002-00840/HID).

DIHMA-UPV, 2006. *Estudio de inundabilidad y análisis de las actuaciones propuestas en la Rambla del Poyo y Barranco del Pozalet (Valencia)*.

Fráncés, Félix y Múnera, Juan Camilo, 2008. (In press) *Modelación hidrológica distribuida de la cuenca de los ríos Saja-Besaya con el modelo tetis v.7.2, para estimación probabilística de avenidas en los períodos de estiaje*. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Cartagena de Indias, Colombia.

Guichard R., Delva, 2005. *Influencia de la variabilidad espacio-temporal de la intensidad de lluvia en la respuesta hidrológica durante episodios de crecida*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis doctoral.

Montoya, Juan José, 2008. *Desarrollo De Un Modelo Conceptual De Producción, Transporte Y Depósito De Sedimentos*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis doctoral.

Morales de la Cruz, M.; Francés, F. 2007. *A distributed hydrological modelling of the Biosphere Reserve "Sierra de las Minas" in Guatemala, considering lack of available data*. In Chen, Y.; Cluckie, I.; Takara, K. (Ed). 2007. *Proceeding of GIS & RS in Hydrology, Water Resources and Environment*, Vol. II. Guangzhou, China.

Puricelli, Marino, 2003. *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis doctoral.

Vélez, Jaime Ignacio, 2001. *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.

Vélez, Jorge Julián, 2003. *Desarrollo De Un Modelo Distribuido De Predicción En Tiempo Real Para Eventos De Crecidas*. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Tesis Doctoral.

## 11.- CÓDIGOS DE ERRORES

Una lista con los fallos de operación del modelo más comunes es presentada en la siguiente Tabla. En caso de producirse alguno de estos errores, el módulo correspondiente lo registra en el fichero "ERRORES.TXT".

| CÓDIGO | DESCRIPCIÓN PRESENTADA POR EL MODELO                               |
|--------|--|
| 001    | No existe el fichero FILESSP.TXT                                   |
| 002    | Lectura errónea en la primera línea del fichero FILESSP.TXT        |
| 003    | El fichero PARAMGEO.TXT no existe                                  |
| 004    | Lectura errónea en la primera línea del fichero PARAMGEO.TXT       |
| 005    | El fichero CONTROL.TXT no existe                                   |
| 006    | Lectura errónea en el fichero CONTROL.TXT                          |
| 007    | El fichero TOPOLCO.SDS no existe                                   |
| 008    | Lectura errónea en la primera líneas del fichero TOPOLCO.SDS       |
| 009    | El fichero de episodio no ha sido creado                           |
| 010    | Lectura errónea en el fichero de episodio                          |
| 011    | Fallo en la lectura de la línea "G" del fichero de evento          |
| 012    | Fallo en la lectura de la línea "P" del fichero de evento          |
| 013    | Fallo en la lectura de la línea "N" del fichero de evento          |
| 014    | Fallo en la lectura de la línea "S" del fichero de evento          |
| 015    | Fallo en la lectura de la línea "Q" del fichero de evento          |
| 016    | Fallo en la lectura de la línea "B" del fichero de evento          |
| 017    | Fallo en la lectura de la línea "T" del fichero de evento          |
| 018    | Fallo en la lectura de la línea "C" del fichero de evento          |
| 019    | Fallo en la lectura de la línea "E" del fichero de evento          |
| 020    | El fichero CALIB.TXT no existe                                     |
| 021    | Error en los parámetros de calibración en el fichero CALIB.TXT     |
| 022    | Error en los parámetros de predicción en el fichero CALIB.TXT      |
| 023    | Error en los parámetros de fusión de nieve en el fichero CALIB.TXT |
| 024    | El fichero con el almacenamiento inicial HANTEC.SDS no existe      |
| 025    | Lectura errónea en la primera línea del fichero HANTEC.SDS         |
| 026    | El fichero FACTORET.TXT no ha sido creado                          |
| 027    | Lectura errónea en la primera línea del fichero FACTORET.TXT       |
| 028    | El fichero FACTORET.TXT no ha sido creado                          |
| 029    | Lectura errónea en la primera línea del fichero CURVAHV.TXT        |
| 030    | Problemas en el dimensionamiento en las matrices                   |
| 031    | Lectura errónea en puntos de control dentro de CONTROL.TXT         |

| <b>CÓDIGO</b> | <b>DESCRIPCIÓN PRESENTADA POR EL MODELO</b>                             |
|---------------|---|
| 032           | Lectura errónea en el fichero TOPOTOAL.SDS                              |
| 035           | Lectura errónea en el fichero PARAMGEO.TXT                              |
| 036           | Lectura errónea en el fichero TOPOLCO.SDS                               |
| 037           | Lectura errónea en el fichero HANTEC.SDS                                |
| 038           | Lectura errónea en el fichero COTAS1.TXT                                |
| 039           | Lectura errónea en el fichero CURVAHV.TXT                               |
| 043           | El fichero TOPOTOTAL.SDS no existe                                      |
| 044           | Lectura errónea en la primera línea del fichero TOPOTOTAL.SDS           |
| 047           | El fichero con contorno de nieve NIEVE.ASC no existe                    |
| 048           | Lectura errónea en la primera línea del fichero NIEVE.ASC               |
| 049           | Lectura errónea en el fichero NIEVE.ASC                                 |
| 050           | La ventana de predicción es mayor el número de datos del episodio       |
| 051           | El fichero de salida de simulación no existe                            |
| 052           | Lectura errónea en la primera línea del fichero de salida de simulación |
| 053           | Fallo en la lectura de la línea "G" del fichero de salida de simulación |
| 054           | Fallo en la lectura de la línea "Q" del fichero de salida de simulación |
| 055           | Fallo en la lectura de la línea "A" del fichero de salida de simulación |
| 090           | Valores -1 encontrados en la línea de precipitación P                   |
| 091           | Valores -1 encontrados en la línea de niveles de embalses N             |
| 092           | Valores -1 encontrados en la línea de caudales de salida en embalses S  |
| 093           | Valores -1 encontrados en la línea de caudales observados Q             |
| 094           | Valores -1 encontrados en la línea de contorno de nieve C               |
| 095           | Valores -1 encontrados en la línea de evpotranspiración E               |

**Tabla 22. Listado con una breve descripción de los errores producidos durante la ejecución de los diferentes módulos del programa TETIS**



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**Instituto de Ingeniería del  
Agua y Medio Ambiente**

**DESCRIPCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL  
DISTRIBUIDO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA  
TETIS V. 8.1**

**Valencia, Marzo de 2012**

**Director del proyecto TETIS:**

Félix Francés García

Correo electrónico: [ffrances@hma.upv.es](mailto:ffrances@hma.upv.es)

**Equipo del proyecto:**

Ignacio Vélez Upegui

Julián Vélez Upegui

Marino Puricelli

Juan José Montoya

Juan Camilo Múnera

Gianbattista Bussi

Chiara Medici

Joaquín Real

**Autores del documento:**

Félix Francés García

Julián Vélez Upegui

Juan Camilo Múnera

Chiara Medici

Universidad Politécnica de Valencia  
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente  
Grupo de Investigación en Hidráulica e Hidrología  
<http://luvia.dihma.upv.es/>

Derechos reservados. Se ruega que cualquier uso de este documento sea convenientemente citado.

## TABLA DE CONTENIDOS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.- INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>2.- LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA.....</b>                | <b>5</b>  |
| <b>2.1.- Los procesos físicos involucrados.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>2.2.- Modelos físicamente basados y modelos conceptuales.....</b>                             | <b>7</b>  |
| <b>2.3.- La escala de trabajo .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>3.- EL MODELO TETIS.....</b>  | <b>10</b> |
| <b>3.1.- Interpolación espacial de la información puntual .....</b>                              | <b>10</b> |
| 3.1.1.- Metodología .....  | 10        |
| 3.1.2.- Variables interpoladas.....  | 11        |
| <b>3.2.- La producción de la escorrentía.....</b>  | <b>12</b> |
| 3.2.1.- El tanque de intercepción .....  | 15        |
| 3.2.2.- El almacenamiento estático y las pérdidas por evapotranspiración.....                    | 17        |
| 3.2.3.- El almacenamiento superficial y la escorrentía directa (respuesta rápida).....           | 21        |
| 3.2.4.- El almacenamiento gravitacional y el interflujo (respuesta intermedia) .....             | 26        |
| 3.2.5.- El almacenamiento subterráneo y el flujo base (respuesta lenta) .....                    | 29        |
| <b>3.3.- La fusión de la nieve.....</b>  | <b>32</b> |
| 3.3.1.- La medición de la cantidad de nieve .....  | 33        |
| 3.3.2.- Modelo de fusión: Método Índice de Temperatura .....                                     | 33        |
| 3.3.3.- El efecto de la escala temporal .....  | 36        |
| <b>3.4.- El Regadío .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>3.5.- Laminación en embalses.....</b>   | <b>37</b> |
| 3.5.1.- Simulación de un embalse .....   | 37        |
| 3.5.2.- Localización del embalse.....  | 39        |
| <b>3.6.- La traslación de la escorrentía: La Onda Cinemática Geomorfológica.....</b>             | <b>40</b> |
| 3.6.1.- Bases teóricas .....   | 41        |
| 3.6.2.- La forma de la sección del cauce .....   | 42        |
| 3.6.3.- Ecuaciones para la cuenca .....  | 42        |
| 3.6.4.- Relaciones empleadas en el modelo.....   | 43        |
| 3.6.5.- La rugosidad del cauce .....   | 44        |
| 3.6.6.- La velocidad del flujo .....   | 45        |
| 3.6.7.- La ecuación de Continuidad en la Formulación de la “Onda Cinemática Geomorfológica“..... | 47        |
| <b>4.- CAPAS DE INFORMACIÓN, PARÁMETROS Y FACTORES CORRECTORES .....</b>                         | <b>50</b> |
| <b>4.1.- Información básica.....</b>   | <b>50</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.2.- Estimación previa de parámetros .....</b>                               | <b>50</b> |
| 4.2.1.- Parámetros del suelo, cubierta vegetal y zonas de riego .....            | 50        |
| 4.2.2.- Parámetros geomorfológicos.....  | 51        |
| 4.2.3.- Parámetros de fusión nieve.....  | 52        |
| 4.2.4.- Mapas tipo índice.....   | 52        |
| <b>4.3.- Factores correctores.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>4.4.- Iniciación de las variables de estado .....</b>                         | <b>53</b> |
| 4.4.1.- Tanques del suelo.....   | 53        |
| 4.4.2.- Cauces .....   | 53        |
| 4.4.3.- Tanque de nieve .....  | 54        |
| <b>5.- CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA CON TETIS.....</b>                                 | <b>55</b> |
| <b>5.1.- Calibración de un modelo hidrológico .....</b>                          | <b>55</b> |
| <b>5.2.- La calibración automática .....</b>                                     | <b>55</b> |
| <b>5.3.- Método del SCE-UA .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>5.4.- La validación de los resultados.....</b>                                | <b>61</b> |
| <b>5.5.- Criterios para evaluar el rendimiento del modelo .....</b>              | <b>63</b> |
| 5.5.1.- Error en el volumen .....  | 63        |
| 5.5.2.- Error cuadrático medio, <i>RMSE</i> .....                                | 64        |
| 5.5.3.- El coeficiente de eficiencia, <i>NSE</i> .....                           | 64        |
| 5.5.4.- El estimador de máxima verosimilitud hereroscedástico, <i>HMLE</i> ..... | 65        |
| 5.5.5.- El error gaussiano autocorrelacionado, <i>AMLE</i> .....                 | 65        |
| <b>6.- REFERENCIAS .....</b>   | <b>67</b> |

## 1.- INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales siempre han cautivado y sorprendido al hombre, tanto por su exuberancia, complejidad y belleza como por su magnitud, frecuencia y peligrosidad. El Ciclo Hidrológico es uno de estos fenómenos, en el que además, en muchos casos, es necesario el conocimiento de sus variables de estado para la toma de decisiones en diversas áreas de la actividad humana, como pueden ser la planificación de recursos hídricos y la defensa contra las crecidas de los ríos.

En un estudio de recursos, el objetivo fundamental es la estimación de las formas de los hidrogramas superficiales y la evaluación de la recarga de los acuíferos. Por contra, en el estudio de las crecidas, las necesidades fundamentales son la estimación del caudal pico o flujo máximo y la estimación de la forma del hidrograma.

La modelación hidrológica ha sido tradicionalmente la herramienta utilizada para este fin, separando ambos problemas. Por lo tanto, la estimación confiable de las variables de estado involucradas podría depender de las características conceptuales del modelo seleccionado. En este trabajo se presenta un modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual, que pretende servir de herramienta tanto para la simulación continua como la de eventos de crecida.

Una descripción detallada del funcionamiento del programa TETIS y de los ficheros necesarios para su ejecución se realiza en el “Manual del Usuario” correspondiente.

Este informe expone de un modo global el marco conceptual del modelo distribuido que ha sido desarrollado dentro del programa TETIS, haciendo énfasis en la estructura conceptual de cada uno de los módulos que lo componen y que forman una herramienta adecuada para la simulación hidrológica completa.

A continuación se realiza una breve descripción del estado actual de la modelación hidrológica, luego se describe en el capítulo 3 cada una de las componentes principales del modelo TETIS. En el cuarto capítulo se presenta la información, los parámetros y los factores correctores del modelo y en el capítulo 5 se describe el método de optimización seleccionado para la calibración automática.

## 2.- LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA

Debido a que no se dispone de un marco matemático que explique satisfactoriamente el comportamiento del flujo dentro de la cuenca, la modelación hidrológica distribuida ha sido el punto de interés de la comunidad científica en los últimos años, siendo una de las herramientas para la estimación y predicción de eventos de crecida.

Las ventajas que presenta la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada consisten fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos. Adicionalmente, la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para lograr un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela. Aunque en ocasiones requiere de información detallada de la zona de estudio, este tipo de información día a día se encuentra más a disposición del público gracias al desarrollo que en los últimos años han tenido los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos.

Para la estimación y la predicción de crecidas se ha encontrado que los procesos físicos involucrados más importantes son la lluvia y la escorrentía superficial, por lo tanto se ha generalizado en la literatura el término lluvia - escorrentía. Es así como el estudio de las crecidas se centra básicamente en analizar los fenómenos de producción y traslación de la escorrentía.

A continuación se presentan los procesos físicos involucrados en los diferentes modelos, una discusión entre los modelos físicamente basados y los modelos conceptuales y los criterios a tener en cuenta para la elección de la escala de trabajo.

### 2.1.- LOS PROCESOS FÍSICOS INVOLUCRADOS

La conceptualización de los procesos físicos realizada dentro de los modelos debe ser sencilla y clara con el fin de entender correctamente el funcionamiento de los procesos expuestos. De un modo general, en los modelos implementados se consideran los siguientes procesos hidrológicos (Singh, 1989):

- **Intercepción.** Es la parte de la precipitación que es interceptada por objetos superficiales como la cubierta vegetal o los tejados. En general, parte de esta agua interceptada nunca alcanza el suelo porque se adhiere y humedece estos objetos, para posteriormente evaporarse. La intercepción puede despreciarse cuando se estudian los eventos de crecida. Sin embargo, cuando se desea conservar el balance hídrico este proceso puede llegar a ser importante y debe ser tenido en cuenta.
- **Detención.** También denominado almacenamiento en depresión, depende de la forma del terreno y de los usos del suelo, el agua retenida no es capaz de salir como escorrentía superficial, por lo tanto se debe evaporar o infiltrar en el suelo. El almacenamiento en depresión puede ser significativo y, en esos casos, puede modificar la respuesta de una cuenca.
- **Infiltración.** Es el proceso de entrada de agua al suelo a través de la superficie del suelo. Este fenómeno es el más importante en un evento de crecida, ya que el agua

no infiltrada es la escorrentía directa, que habitualmente supone el mayor porcentaje de la escorrentía superficial.

- **Evaporación.** Proceso mediante el cual el agua pasa de un estado líquido o sólido a un estado gaseoso a través de la transferencia de energía calorífica. Para la planeación de los recursos hídricos este proceso debe ser considerado detalladamente, sin embargo, para el estudio de los eventos de crecida puede desprejarse debido al corto lapso de tiempo en el cual se desarrollan éstos.
- **Fusión de nieve.** Es el proceso por el cual se obtiene la cantidad de agua líquida producida por el derretimiento de la nieve que está acumulada en la superficie.
- **Percolación.** Es el movimiento del agua infiltrada a través del perfil del suelo.
- **Recarga del acuífero.** Proceso mediante el cual el agua ingresa al almacenamiento subterráneo del acuífero. El área de recarga es una zona que permite que se suministre agua al acuífero.
- **Escorrentía superficial.** Es la porción de lluvia que no es interceptada, detenida, evaporada o percolada y que fluye sobre las laderas. En realidad la escorrentía superficial, la infiltración y la humedad del suelo son interactivas entre sí, por tal motivo se debe tener cuidado en seleccionar el modelo adecuado para cada caso. A efectos del modelo TETIS, se distinguirá como escorrentía directa
- **Interflujo.** También denominado flujo subsuperficial. Es el agua que ha sido previamente infiltrada y no alcanza el almacenamiento subterráneo o acuífero, por lo tanto debe ser considerada en la escorrentía superficial.
- **Flujo base.** Es la porción de agua derivada del almacenamiento subterráneo o de otras aguas que se han retrasado en el tiempo y finalmente alcanzan el cauce.
- **Acuífero cárstico.** Originado por meteorización química de determinadas rocas, como la caliza, dolomía, aljez, etc., compuestas por minerales solubles en agua. Los **manantiales cársticos** son puntos donde las aguas subterráneas salen de un acuífero para convertirse en aguas superficiales y se producen cuando el flujo de las aguas subterráneas atraviesa conductos en rocas que han sido disueltas. La cuenca de agua subterránea de un manantial cárstico recopila drenaje de todas las dolinas y arroyos sumergidos en su área de drenaje. Cabe destacar que una cuenca cárstica no tiene que tener la misma configuración que una cuenca hidrográfica.

La representación de cada uno de estos procesos se puede realizar desde un punto de vista físico, en donde se obtienen ecuaciones diferenciales no lineales cuya solución analítica puede ser muy compleja o simplemente no se encuentra una solución. Sin embargo, mediante la discretización en el tiempo y en el espacio, la linealización de las ecuaciones fundamentales con sus respectivas ecuaciones de estado y condiciones de borde, hacen posible encontrar un resultado aceptable, teniendo en cuenta que este tipo de simplificaciones inducen a errores de escala. Una representación conceptual de estos fenómenos es aceptada siempre y cuando se trabaje a la escala adecuada según Grayson et al. (1992).

## 2.2.- MODELOS FÍSICAMENTE BASADOS Y MODELOS CONCEPTUALES

Un modelo distribuido conceptual adaptado a la escala espacio temporal adecuada en que los procesos hidrológicos son determinantes durante un evento de crecida, puede llegar a ser tan preciso como un modelo distribuido físicamente basado, siendo más económico y fácil de utilizar según lo expuesto por Beven (1989). Aunque se disponga de los elementos matemáticos necesarios para el desarrollo de un modelo matemático físicamente basado, este tipo de modelos requieren de muchísima información, la mayor parte de ella no se encuentra disponible o es muy costosa, adicionalmente exigen rutinas complejas con gran cantidad de parámetros, ya que la realidad es heterogénea y las ecuaciones matemáticas no siempre incluyen estas heterogeneidades, finalmente este tipo de modelos son costosos en cuanto a tiempo, almacenamiento y manejo de la información dentro del ordenador.

Grayson et al. (1992) exponen que existen dos razones para el desarrollo de un modelo. La primera es entender el sistema físico que provee un marco de datos, es la prueba de una hipótesis. La segunda es proporcionar una herramienta de predicción. Éstas no deben confundirse, pues la primera de ellas se puede satisfacer con un ajuste empírico, pero el segundo propósito requiere un modelo que tenga experimentación extensiva y conocimiento para producir adecuadamente una salida particular bajo ciertas condiciones bien definidas, lo cual hace que sea factible producir salidas para otras condiciones con alguna confianza. El uso real de estos modelos es asistir en el análisis de datos, probar hipótesis en conjunto con estudios de campo, mejorar nuestro entendimiento de los procesos y su interacción e identificar áreas de pobre entendimiento en nuestro proceso de descripción.

Grayson et al. (1992) indican que los principios aplicados a la guía de los modelos físicamente basados en Hidrología son cuatro:

- **Parsimonia.** El número de parámetros debe ser minimizado.
- **Modestia.** El objetivo y la aplicabilidad del modelo no debe ser sobre valorado.
- **Precisión.** La precisión de la simulación o predicción no puede ser mayor que la precisión de las medidas.
- **Que se pueda probar.** Un modelo se debe poder probar así sus límites y su validez pueden ser definidos.

Otro problema de los modelos físicamente basados es que su desarrollo no es dinámico, son a menudo desarrollados aisladamente o probados sólo para garantizar su precisión y en ocasiones se pierde el objetivo inicial siendo utilizado en situaciones diferentes para las cuales fueron creados. La necesidad de la calibración y la validación en los modelos es la prueba de lo insuficientes que son para su aplicación universal.

Beven (1989) resalta que los modelos desarrollan la física de los procesos a pequeña escala sobre sistemas homogéneos y este desarrollo es aplicado al modelo que trabaja a una escala superior, la cual es representada por la celda, realizando un agrupamiento de las variables sin tener en cuenta la física del proceso en la nueva escala. Se puede decir que los modelos distribuidos físicamente basados son modelos conceptuales agrupados. Así mismo, Grayson et al. (1992) mencionan que los procesos que son modelados pueden ser agrupados en unidades homogéneas a alguna escala, de tal forma que los algoritmos y parámetros usados para definir los subprocesos son apropiados a la escala de la unidad homogénea. Aún el más riguroso de los procesos matemáticos que describe la respuesta de

la cuenca es una cruda representación de la realidad, lo cual incide en el grado de precisión esperable: no hay una base física para estimar las características del flujo superficial sobre superficies naturales, las características del flujo pueden ser simples artefactos de la estructura del modelo y muchas hipótesis y simplificaciones se deben realizar, surgiendo un gran número de parámetros en especial cuando se trata de modelos de predicción. En general, según Grayson et al. (1992) existe arrogancia al referirse a modelos físicamente basados.

Adicionalmente, los parámetros son estimados con base a la experiencia del investigador y con la información hidrológica disponible. En el caso de existir eventos registrados de lluvia - escorrentía, con posterioridad se procede a un refinamiento de la estimación o calibración, normalmente mediante un proceso iterativo de ensayo y error por comparación entre el hidrograma observado y el simulado. El número de parámetros es a menudo tal que la mayoría se hacen constantes y pocos son variables porque algunos de ellos no son obtenidos.

Beven (1989) menciona que los modelos distribuidos físicamente basados sufren los mismos problemas de los modelos agregados conceptuales, pero en diferente grado. La observación de datos y la sobre-parametrización cuando se efectúa simulación, hace difícil el proceso de la optimización. El investigador es quien decide cuales parámetros son más sensibles y cuales se determinan "a priori". La valoración de la relación existente entre los parámetros, los cuales varían en función del tipo de suelo, del tipo de vegetación, etc., hace que se reduzca el número de parámetros. Así mismo, las condiciones iniciales que son introducidas al modelo sufren de estos mismos males.

Como conclusión se puede decir que no es necesario desarrollar modelos físicamente basados, los modelos conceptuales son mejores puesto que son más simples, involucran un número de parámetros menor, requieren menos información y son más económicos, todo esto siempre y cuando se empleen a la escala adecuada.

### **2.3.- LA ESCALA DE TRABAJO**

Mamillapalli et al. (1996) sugieren que es necesario discretizar la cuenca a un nivel apropiado de detalle para considerar la variabilidad espacial, de tal forma que el número de elementos mejore los resultados de la simulación, pero enfatizan que una discretización gruesa puede conducir a una simulación pobre y una muy fina requiere un mayor número de datos de entrada y mayor tiempo y espacio en computación.

Wood et al. (1988) estudiaron los efectos de la variabilidad espacial y la escala con implicaciones a la modelación hidrológica. La idea principal fue tratar de formar a cierta escala, alguna respuesta hidrológica media invariante o que varíe muy poco con el incremento en el área. Este umbral de escala representa un área elemental representativa (Representative Elementary Area, REA) el cual será el elemento fundamental para la modelación de la cuenca. Esta área actúa como el punto discernible más pequeño que es representativo del continuo. Además, señalan que el REA es el área crítica a la cual las hipótesis implícitas pueden ser usadas sin el conocimiento de los patrones de los parámetros, aunque se pueden necesitar las hipótesis fundamentales de las distribuciones estadísticas.

Incrementar el tamaño de la celda introduce heterogeneidad en la topografía y en las lluvias. Wood et al. (1988) sugieren que las diferencias entre áreas heterogéneas de la

misma escala son menos importantes a escalas de 1 km<sup>2</sup>, para lluvia, suelo y topografía en particular. A esta escala puede ser necesario tener en cuenta la heterogeneidad para realizar predicciones pero sin considerar un patrón de heterogeneidad. Wood et al. (1994) concluyen además que la topografía influye fuertemente en el tamaño del REA. Para escalas mas pequeñas que el REA el proceso debe ser modelado exactamente.

Adicionalmente, el tamaño de las celdas del modelo digital del terreno limita la información disponible acerca de la red de drenaje a aquellos cauces cuyo ancho no es superior a dos veces el tamaño de las celdas y la precisión obtenida en este caso se limita al tamaño de la celda. Por lo tanto, la formulación de un modelo hidráulico o hidrológico donde se incluya una función de transferencia que considere la geometría de los cauces debe obviar estas limitaciones.

Por lo tanto, no se puede dar un valor exacto del tamaño celda adecuado para la modelación en cada cuenca, porque depende de la heterogeneidad de los parámetros y de las características y tamaño de cada cuenca.

También se requiere que la información de la precipitación se encuentre a escala de celda, de ser posible procedente de radar. En su defecto se puede utilizar una red de registros pluviográficos y realizar una interpolación espacial.

La resolución temporal máxima puede ser hasta de media o una hora, pues al tratarse de un modelo de evento, resoluciones mayores pueden no representar adecuadamente el caudal pico o la forma del hidrograma de salida. Intuitivamente se observa un problema de escala temporal, el cual debe ser subsanado por el usuario empleando una discretización temporal acorde con los resultados deseados y al problema que se desea estudiar. García Bartual (1991) reporta cambios cercanos a un 30% en el caudal pico (con respecto al caudal observado) para una agregación temporal cercana al tiempo de concentración de la cuenca.

Finalmente, lo que se pretende es lograr establecer un punto de equilibrio de tal modo que se seleccione una escala espacial y temporal que vayan de acuerdo con los requerimientos deseados en cuanto al tiempo de ejecución y operación de los modelos, cantidad y calidad de la información de entrada y de salida, teniendo en cuenta que en la mayoría de las situaciones la información es la condicionante para la selección de las discretizaciones.

### 3.- EL MODELO TETIS

El modelo TETIS ha sido desarrollado para realizar la simulación hidrológica en cuencas naturales. El objetivo es obtener de la mejor forma posible la respuesta hidrológica ocasionada por la precipitación de lluvia o de nieve, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual.

A continuación se presentan algunos de los métodos utilizados por TETIS para realizar interpolaciones, también se realiza una descripción de los modelos de producción de la escorrentía, fusión de nieve, laminación de embalses y traslación a lo largo de los cauces. Todo con el objeto final de justificar el uso de la modelación distribuida conceptual para la simulación hidrológica.

#### 3.1.- INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA INFORMACIÓN PUNTUAL

##### 3.1.1.- Metodología

Para la generación de la información distribuida en el espacio de una variable  $X$  basándose en datos puntuales, tradicionalmente se han empleado metodologías como la interpolación lineal, los polígonos de Thiessen, la ponderación de acuerdo al inverso de la distancia y el kriging con sus distintas variaciones. Todas ellas son aplicadas para tratar de estimar el valor de la variable en todo el espacio basándose en datos puntuales. Según Tabios y Salas (1985), cuando la densidad de la red de instrumentación pluviométrica dentro de la cuenca es baja y dispersa, los distintos métodos entre sí arrojan resultados comparables. Por lo tanto el empleo de métodos más simples como es el caso del inverso de la distancia al cuadrado es justificable.

Este método consiste en la obtención de factores de ponderación  $w_{0j}$  como una función entre la distancia de un punto o celda  $(x_0, y_0)$  donde se quiere estimar el valor de la variable y las estaciones de medición  $(x_j, y_j)$  de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$w_{0j} = \frac{1}{d_{0j}^2} \bigg/ \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{0i}^2}$$

En donde  $n$  es el número de estaciones de medición empleadas, siendo:

$$d_{0j} = \sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2}, j=1, \dots, n$$

El valor de la variable  $X$  en el punto de interés es estimado como la sumatoria del producto del respectivo factor de ponderación por el valor puntual registrado en cada una de las estaciones de medición, según la expresión:

$$X_0 = \sum_{j=1}^n w_{0j} X_j$$

Sin embargo, muchas variables hidrológicas presentan una fuerte correlación con la altura. Si la dependencia es de tipo lineal, se puede construir una nueva expresión de interpolación:

$$X_0 = \sum_{j=1}^n w_{oj} [X_j + \beta(z_0 - z_j)]$$

Donde  $\beta$  representa la variación de  $X$  con la altura.

Otra expresión empleada en el modelo TETIS es la siguiente:

$$X_0 = \sum_{j=1}^n w_{oj} [X_j + X_j \cdot \beta(z_0 - z_j)]$$

Donde  $\beta$  varía entre 0 y 1 y representa el porcentaje de incremento de  $X$  con la altura y tiene unidades de  $m^{-1}$ .

El usuario puede decidir cual de las dos expresiones prefiere utilizar en la ventana del menú de ‘Simulación’ nominada ‘Parámetros Geomorfológicos’.

Un problema común que afecta a este tipo de información es la interferencia que se ocasiona cuando se dispone de un número elevado de estaciones. Para evitar este tipo de problemas, la interpolación en el modelo TETIS es realizada hasta un número prefijado de estaciones más cercanas al punto en cuestión, agilizando el funcionamiento del modelo. Se recomienda utilizar un máximo de seis estaciones.

### 3.1.2.- Variables interpoladas

Las variables que en TETIS se interpolan espacialmente con la metodología descrita anteriormente son:

#### 3.1.2.1.- Precipitación

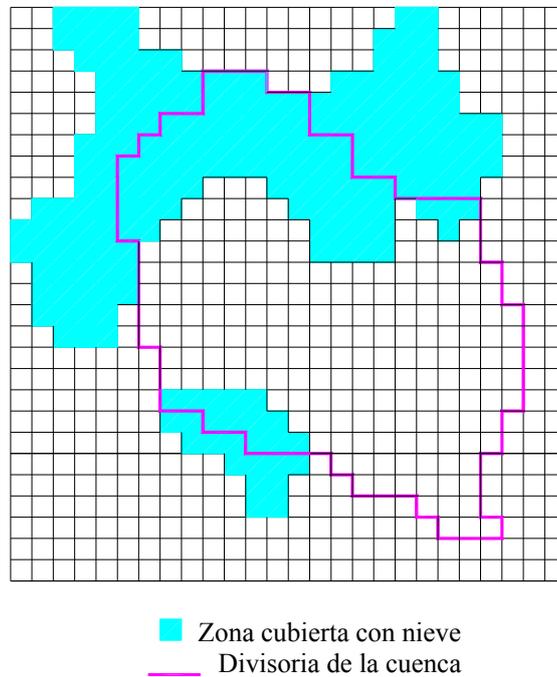
En este caso, se suele contar con una densidad de puntos de medición (pluviógrafos) suficiente como para que el método de inverso de la distancia al cuadrado sea adecuado. Como la dependencia de la precipitación con la altura puede ser variable, el factor  $\beta$  es un parámetro del modelo. En el caso de elegir la segunda expresión para el incremento de la precipitación con la cota, donde el incremento es proporcional a la variable observada, el factor  $\beta$  puede asumir valores entre 0 y 1.

#### 3.1.2.2.- Altura equivalente de agua inicial

La variable de estado que representa la altura de agua equivalente del paquete de nieve en cada celda necesita ser inicializada. La información suministrada de nieve corresponde a la altura equivalente de agua en algunas estaciones nivométricas o en puntos donde es posible obtener este valor. Con base en esta información se debe obtener la altura equivalente de agua en toda la zona cubierta con nieve para el instante de inicio de la simulación hidrológica.

Dada su importancia, el modelo TETIS requiere de un mapa con el contorno de nieve en formato tipo ráster, el cual puede ser obtenido de forma manual, automática o por sistemas remotos. En la Figura 1 se observa un ejemplo con una zona cubierta con nieve y una divisoria de aguas de una cuenca. Internamente el programa identifica las zonas que pertenecen a la cuenca en estudio y selecciona las celdas que contienen nieve. El valor  $\beta$

puede ser muy distinto en cada caso, por lo que es un parámetro del modelo. En el caso de elegir la segunda expresión para el incremento de la precipitación con la cota, donde el incremento es proporcional a la variable observada, el factor  $\beta$  puede asumir valores entre 0 y 1.



*Figura 1. Delimitación del contorno de la zona cubierta por nieve necesaria para el modelo TETIS.*

### 3.1.2.3.- Temperatura

La estimación de la temperatura en cada una de las celdas se realiza en función de la altura sobre el nivel mar empleando un gradiente térmico que, según Marco (1981), se encuentra entre 5 – 8 °C por cada mil metros de elevación, con un valor medio reportado en la literatura de 6.5 °C/1000m. Dunn y Colohan (1999) emplean un valor de 6 °C/100m para un estudio realizado en Escocia.

Dada la estabilidad del incremento de la temperatura con la altura, para este caso el factor  $\beta$  se fija en TETIS al valor de -6.5 °C/1000m.

### 3.1.2.4.- Evapotranspiración potencial, ETP

Los factores que afectan a la ETP son tan variados y normalmente la densidad de puntos de medición es tan baja, que en este caso se utiliza el método de inverso distancia al cuadrado sin corrección con la altura.

## 3.2.- LA PRODUCCIÓN DE LA ESCORRENTÍA

La representación de la producción de escorrentía se hace mediante esquemas conceptuales simples adaptados a la escala de la celda (inferior al tamaño de las laderas) y al intervalo de tiempo que se considera en la modelación de eventos (entre 1 hora y 10 minutos). En

cualquier otra escala espacio-temporal aparecerán inevitablemente efectos de escala en los valores de los parámetros. Si se trata de simulación continua (un periodo largo y no un evento) el intervalo puede ser hasta de 1 día, pero nunca superior.

En la literatura se encuentran muchos esquemas conceptuales para representar la producción de escorrentía, la mayoría de ellos coincide en una representación esquemática que incluye varios tanques de almacenamiento interconectados entre sí. Estos esquemas se han utilizado con éxito tanto en modelos conceptuales agregados de simulación continua (Stanford, Sacramento, Tankmodel, GR-3, etc.) como en modelos que se pueden considerar distribuidos (Watflood, DVSM, SLURP, etc.). En términos generales, en todos estos modelos se utiliza un grupo de tanques para representar conceptualmente la producción de escorrentía en lo que se puede considerar una unidad de respuesta hidrológica, HRU.

En TETIS, la producción de la escorrentía se basa en la realización de un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles o tanques de almacenamiento conceptuales y conectados entre sí (más un séptimo de cauces cuando lo haya en la celda), como puede observarse en la Figura 2.

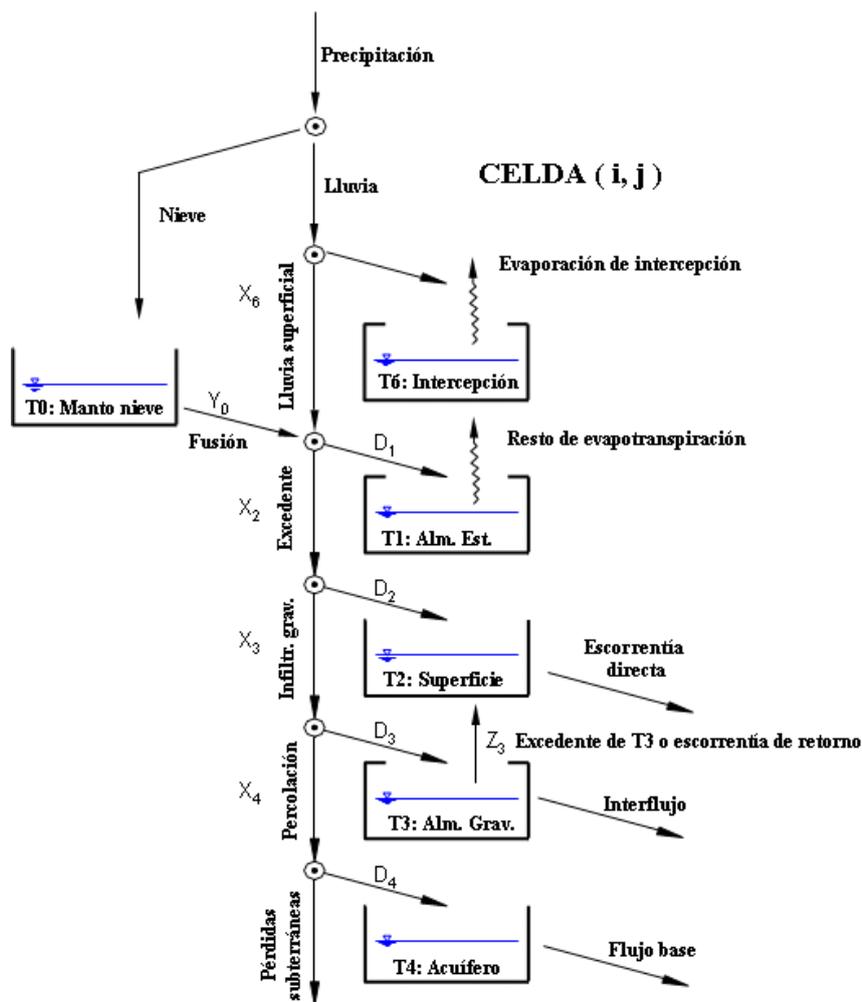


Figura 2. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS.

El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques. La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo en la misma.

En realidad, la conceptualización del modelo TETIS es una malla interconectada en tres dimensiones como se puede observar en la Figura 3. Los tres tanques inferiores drenan hacia el correspondiente tanque aguas abajo, siguiendo las direcciones del flujo propuestas por el MED, hasta alcanzar la red de drenaje constituida por cárcavas y cauces.

Para las celdas que no pertenecen a un área de karst, el sistema presenta tres elementos diferenciados, definidos por las áreas umbrales para que las diferentes componentes de la escorrentía salgan a la superficie. Además, estas áreas coinciden con la presencia de una incisión permanente en el terreno en donde se concentran los flujos, ya sea en cárcavas o en cauces. En la Figura 4 se observa un esquema de la relación entre las áreas umbrales para las diferentes componentes de la escorrentía y el área de captación.

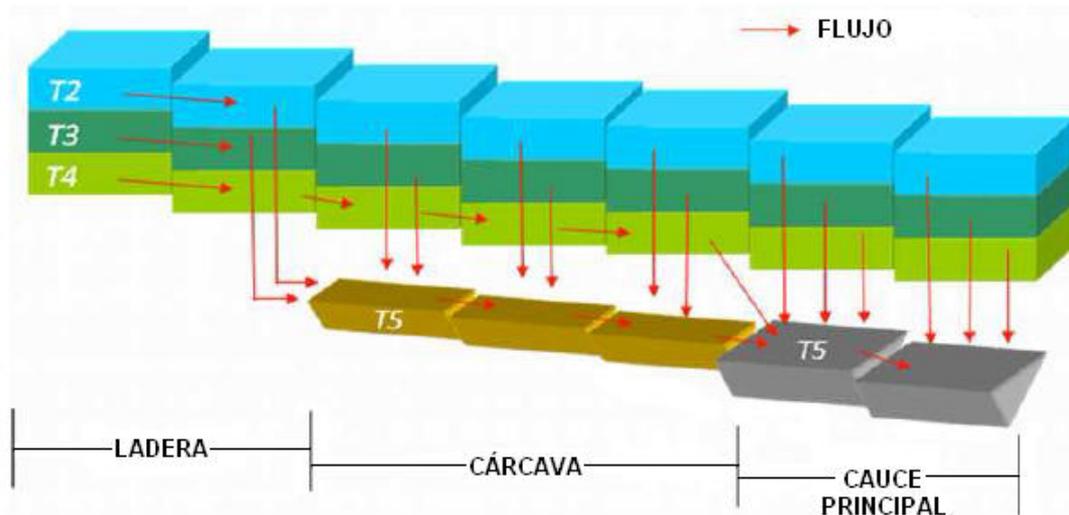


Figura 3. Movimiento horizontal propuesto por el modelo TETIS (tomado de Bussi, 2011).

La ladera está definida por el área máxima para que el flujo superficial se concentre en una cárcava o un cauce. La escorrentía superficial en ladera termina cuando se encuentra un canal, ya sea una cárcava o un cauce. El inicio de las cárcavas coincide con el área necesaria para que el interflujo en ladera retorne a la superficie. El interflujo en ladera se presenta en eventos de lluvia y normalmente sale a la superficie cuando se encuentra con una hendidura permanente del terreno, la cual en periodos de recesión no lleva agua. Estas hendiduras, conocidas como cárcavas, marcan el comienzo del interflujo. La escorrentía superficial en las celdas con área de captación mayor que el área umbral para el interflujo y menor que el área umbral para el flujo base se da en cárcavas. Esta escorrentía superficial es la suma entre la escorrentía directa y el interflujo. Las celdas cauces están definidas por el área necesaria para que el flujo subterráneo en el acuífero alcance la superficie del terreno. El flujo base coincide con la presencia de cauces que permanentemente llevan agua. En las celdas con área de captación mayor que área umbral para el flujo base, la escorrentía superficial se presenta en cauces y es la suma de la escorrentía directa, el interflujo y el flujo base.



Figura 4. Elementos del sistema, áreas umbrales y componentes de la escorrentía (tomado de Montoya 2008).

Para las celdas que pertenecen a un área de **karst** la transferencia del flujo a la red de drenaje no ocurre de acuerdo al concepto previamente mencionado de áreas umbrales. Para las celdas de tipo karst, el interflujo (que en este caso representa el drenaje más rápido del acuífero cárstico) y el flujo base (que actúa como el drenaje más lento) salen a la superficie, y por lo tanto a la red de drenaje, solo en correspondencia de un punto de manantial.

Un acuífero cárstico puede exceder los límites superficiales de una cuenca hidrográfica y por lo tanto el punto de manantial asociado puede estar drenando un área superior a la que calcula el modelo Tetis. Este incremento de flujo cárstico será proporcional al área del acuífero que queda excluida de la cuenca hidrográfica superficial y se expresará como porcentaje de incremento respecto al flujo cárstico calculado por el modelo Tetis. En el caso en que el área del acuífero cárstico que drena a cierto manantial sea inferior a la calculada por el modelo Tetis, el porcentaje será de decremento (negativo).

En las celdas de tipo karst, la transferencia de la escorrentía directa se sigue haciendo de acuerdo al concepto de áreas umbrales.

En los apartados siguientes se presentan, con más detalle, las relaciones funcionales para el flujo entre los almacenamientos y hacia la red de drenaje.

### 3.2.1.- El tanque de intercepción

El primer almacenamiento, denominado almacenamiento de intercepción (o interceptación) T6 se esquematiza en detalle en la Figura 5. Este tanque representa el agua interceptada por la cubierta vegetal durante un episodio de lluvia y que sólo sale de ella por evaporación directa desde la superficie de las hojas, por lo tanto no hace parte de la escorrentía. Desde el punto de vista práctico, el almacenamiento de este tanque podría ser incorporado al tanque estático T1, que se describe más adelante.

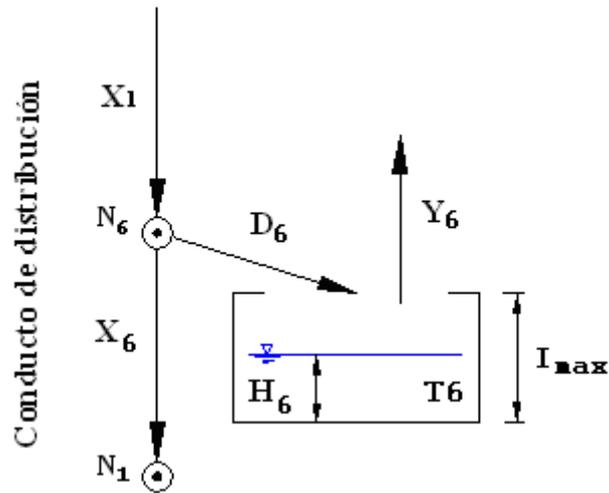


Figura 5. Esquema del tanque de intercepción.

De acuerdo con la configuración del modelo, la precipitación en forma de lluvia  $X_1$  entra al conducto distribuidor del que se deriva una cantidad  $D_6$  para el primer almacenamiento o tanque. Se supone que este tanque tiene una capacidad máxima determinada de las características de la vegetación,  $I_{\max}$ .

La cantidad de agua que se deriva del primer nodo del conducto distribuidor  $N_6$  y que no ingresa al almacenamiento de intercepción,  $X_6$  denominada lluvia superficial, depende del contenido de humedad sobre la superficie de las hojas (representado por la cantidad de agua almacenada en el tanque,  $H_6$ ), de las características de la cubierta vegetal (representadas por  $I_{\max}$ ) y de la cantidad de lluvia  $X_1$ . TETIS emplea la siguiente relación:

$$X_6 = \text{Max}[0, X_1 - I_{\max} \cdot \lambda_v(t) + H_6]$$

$I_{\max}$  representa la capacidad máxima de intercepción de agua del grupo funcional de vegetación en condiciones de máximo follaje.

Siendo  $\lambda_v$  el factor de vegetación o cubierta del suelo que tiene en cuenta del estado de la vegetación durante los 12 meses ( $t=1, 12$ ). El factor  $\lambda_v$  puede variar entre 0 y 1, donde el valor 0 corresponde a ausencia de vegetación y el valor uno a su estado óptimo.

A este almacenamiento no puede ingresar una cantidad superior a la que corresponde al espacio disponible en el almacenamiento de intercepción. Dada la estructura del modelo y que la conservación de masas no permite ingresar más agua que la existente en el conducto distribuidor, la cantidad de agua que se deriva hacia el tanque es estimada mediante:

$$D_6 = X_1 - X_6$$

En este punto es necesario actualizar la cantidad de agua  $H_6$  dentro del tanque T6 empleando la siguiente expresión.

$$H_6 = H_6 + X_1 - X_6$$

Se procede a estimar la cantidad de agua que representa la evaporación directa  $Y_6$  mediante una formulación simple:

$$Y_6 = \text{Min}[ETP \cdot \lambda_v(t) \cdot FC_2, H_6]$$

En donde  $ETP$  es la evapotranspiración potencial (variable a lo largo del tiempo en cada estación de medición),  $\lambda_v$  es el factor de vegetación o cubierta del suelo que modifica la  $ETP$  (12 valores mensuales para cada tipo de cubierta) y  $FC_2$  es un factor corrector que debe ser cercano a uno.

Luego, se hace necesario actualizar la cantidad de agua  $H_6$  dentro del tanque T6:

$$H_6 = H_6 - Y_6$$

En este caso, a menos que se llene el almacenamiento de intercepción, no se deja pasar nada a los siguientes tanques, siendo claramente esta una aproximación a lo que ocurre en la realidad.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua excedente del proceso de intercepción o lluvia directa, continúa su recorrido por el conducto distribuidor donde en los nodos siguientes se va derivando hacia los almacenamientos de las distintas componentes de la escorrentía.

### 3.2.2.- El almacenamiento estático y las pérdidas por evapotranspiración

El segundo almacenamiento, denominado almacenamiento estático T1 se esquematiza en detalle en la Figura 6. Este tanque representa el agua que transita por la cuenca y que sólo sale de ella por evapotranspiración, por lo tanto no hace parte de la escorrentía. Es decir, este almacenamiento tiene en cuenta la detención del agua en charcos (podría también incluir la intercepción) y el agua que se retiene en el suelo por las fuerzas capilares.

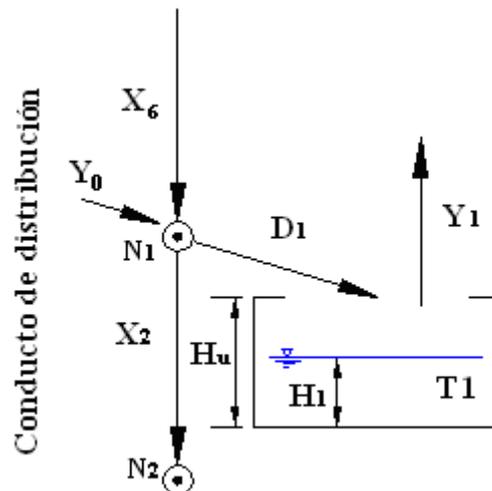


Figura 6. Esquema del almacenamiento estático.

De acuerdo con la configuración del modelo, la lluvia superficial  $X_6$  entra al conducto distribuidor del que se deriva una cantidad  $D_1$  para el primer almacenamiento o tanque. Se

supone que este tanque tiene una capacidad máxima igual a la suma de la capacidad de almacenamiento de “agua útil” en el suelo y la capacidad de la superficie para almacenar agua en los charcos. La capacidad de almacenamiento de “agua útil” está relacionada con la cantidad de agua que hay que agregar a una columna de suelo muy seco (que tiene un contenido de humedad igual al punto de marchitez) hasta alcanzar el mayor almacenamiento estático posible sin que el agua fluya por la acción de la gravedad (en el que se tiene un contenido de humedad igual a la capacidad de campo), multiplicada por la profundidad de raíces.

La cantidad de agua que se deriva del segundo nodo del conducto distribuidor  $N_I$  y que ingresa al almacenamiento estático,  $D_I$ , depende en general del contenido de humedad del suelo (representado por la cantidad de agua almacenada en el tanque,  $H_I$ ), de las características del suelo (representado parcialmente por el agua útil,  $H_u$ ), de la cantidad de lluvia superficial  $X_6$ . A este almacenamiento no puede ingresar una cantidad superior a la que corresponde al espacio disponible en el almacenamiento estático del suelo. TETIS emplea la siguiente relación:

$$D_I = \min \left\{ (X_6 + Y_0) \cdot \left( 1 - \frac{H_I}{H_u \cdot FC_1} \right)^{p_1} ; H_u \cdot FC_1 - H_I \right\}$$

Donde  $Y_0$  representa el aporte por fusión de nieve,  $H_I$  el contenido de agua del tanque  $T_1$ ,  $H_u$  representa la capacidad máxima del tanque  $T_1$  y  $p_1$  un exponente que determina cuando empieza a haber un excedente  $X_2$ . Un exponente igual a cero ( $p_1=0.0$ ) significa que para que haya un excedente  $X_2$  el tanque estático  $T_1$  tiene que haber superado su capacidad máxima. Un exponente superior a 0 significa que habrá un excedente antes de que se supere la capacidad máxima del tanque estático  $T_1$ . De esta manera se quiere tener en cuenta también el flujo a través de los macroporos. Por lo tanto, esto hará que la cuenca responda antes y que más agua esté disponible para dar lugar a escorrentía directa, interflujo y flujo base. En el modelo HBV (Bergström, 1995) el exponente  $p_1$  puede tomar valores entre 1 y 3 y es un parámetro que define el analista. Otro caso es el de los modelos GR-3j y GR-3H (Arnaud y Lavabre, 1996) en los que  $p_1$  se asume igual a 2.

$FC_1$  es un factor corrector que multiplica de forma directa el almacenamiento estático o agua útil y que debe ser cercano a uno. Un aumento de este factor a valores mayores que uno, indica que se incrementa la capacidad de almacenamiento estático y por lo tanto se retiene mayor cantidad de agua, la cual no entra dentro del proceso de infiltración y el hidrograma de salida debe disminuir en volumen con respecto al original. Este decrecimiento se realiza de forma global. Así mismo, una disminución del factor corrector, a valores menores que uno, reducen la cantidad de agua en el almacenamiento estático y permiten que entre al suelo una mayor cantidad de agua, por lo tanto la respuesta del hidrograma se espera que sea mayor. Este valor puede estar condicionado por las variables de estado de humedad inicial.

Para describir la cantidad de agua que se deriva del segundo nodo del conducto distribuidor  $N_I$  y que no ingresa al almacenamiento estático,  $X_2$ , TETIS emplea la siguiente relación:

$$X_2 = \text{Max}[0, X_6 + Y_0 - D_1]$$

En este punto es necesario actualizar la cantidad de agua  $H_1$  dentro del tanque T1 empleando la siguiente expresión.

$$H_1 = H_1 + X_6 + Y_0 - X_2$$

Durante la ocurrencia de eventos cortos el efecto de la evapotranspiración generalmente es despreciado, pero este valor puede llegar a ser importante en cuencas grandes y en grandes superficies de agua, razón por la cual se incluye dentro del modelo TETIS. Se procede a estimar la cantidad de agua que representa la evapotranspiración  $Y_1$  (descontada la evaporación desde la intercepción  $Y_6$ , si la hubiere) mediante una formulación simple:

$$Y_1 = \text{Min}[(ETP \cdot FC_2 - Y_6) \cdot \lambda_v(t) \cdot f(\theta), H_1]$$

En donde  $ETP$  es la evapotranspiración potencial (variable a lo largo del tiempo en cada estación de medición),  $\lambda_v$  es el factor de vegetación o cubierta del suelo que modifica la  $ETP$  (12 valores mensuales para cada tipo de cubierta),  $FC_2$  es un factor corrector que debe ser cercano a uno y  $f(\theta)$  es la función de humedad que representa el contenido de humedad en el suelo en función de tres umbrales según se esquematiza en la Figura 7.

El objetivo de  $f(\theta)$  es incluir en la transpiración el efecto de la humedad del suelo que influye sobre la transpiración por un fenómeno de regulación interna de las plantas. Esta función de humedad introduce un umbral llamado punto óptimo  $\theta^*$  [ $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ], dependiente del tipo de grupo funcional de vegetación y cuyo significado hace alusión al punto por debajo del cual la vegetación comienza a percibir el estrés y a regular sus funciones vitales, por ejemplo el cierre estomático. Cuando el contenido de humedad en el suelo  $\theta$  está entre el valor óptimo  $\theta^*$  y la capacidad de campo  $\theta_{CC}$ , la transpiración depende del tipo y cantidad de vegetación y condiciones atmosféricas (radiación solar, temperatura, humedad relativa, etc.). Cuando  $\theta$  decrece por debajo de  $\theta^*$ , se reduce gracias al control estomático que se realiza en las hojas con el fin de prevenir la pérdida innecesaria de agua; el cierre parcial de los estomas se convierte en cierre total cuando se alcanza el punto de marchitez permanente  $\theta_{MP}$ .

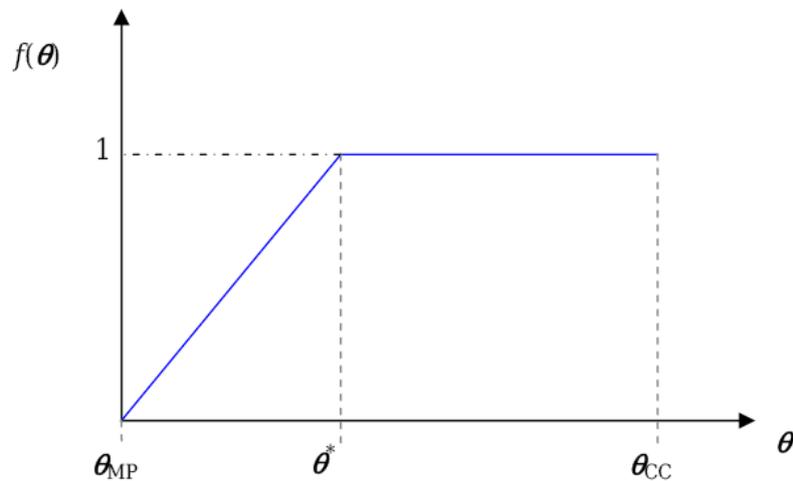


Figura 7. Esquema de la función humedad en el suelo (tomado de Pasquato, 2011).

La estimación de la evapotranspiración potencial *ETP* cuando no se dispone de datos de campo puede ser realizada con base en los datos de temperatura media, (Singh, 1989a).

El índice de cobertura se obtiene según el tipo de cobertura vegetal, para diferentes tipos de cobertura la variabilidad en el tiempo es diferente, un ejemplo de este índice se puede observar en la Figura 8, en la cual se asocia el índice de cobertura vegetal al factor de cultivo sugerido por Burman y Pochop (1994).

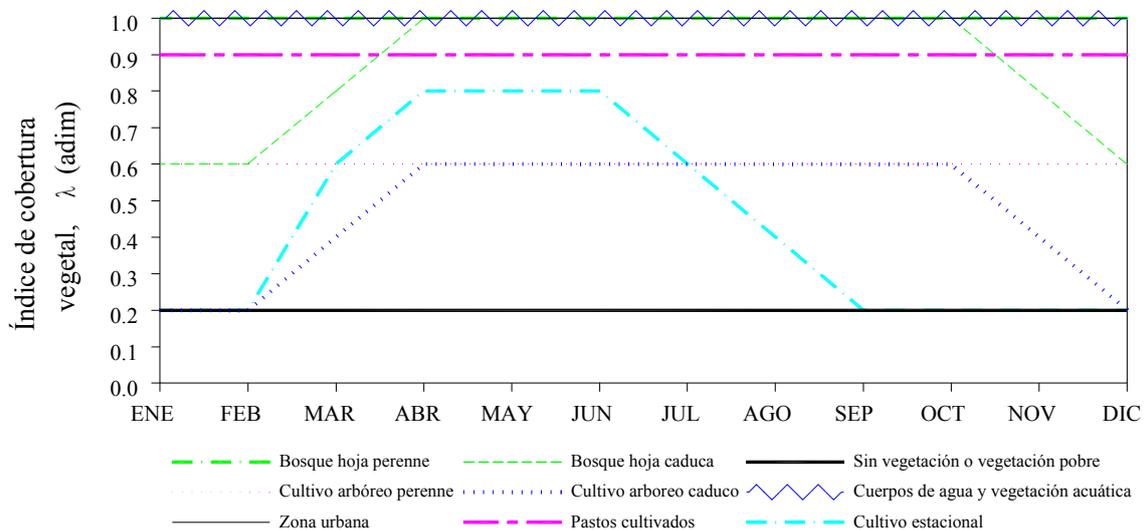


Figura 8. Variación temporal del índice de vegetación  $\lambda_v$ , utilizado para estimar la evapotranspiración en el modelo TETIS.

En caso que no se desee considerar el efecto de la evapotranspiración debe ser igual a cero. Un aumento del factor corrector  $FC_2$ , valores mayores que uno, implica un aumento en las salidas del modelo a causa de la evapotranspiración, por esta razón se produce una disminución del hidrograma, incluso puede llegar a anularlo. Del mismo modo, una

disminución de este factor, valores menores que uno, se traduce en un aumento del hidrograma de salida, pero tan solo hasta cierto punto.

Este factor está condicionado a la presencia de datos de evapotranspiración, si no se dispone de información no hay necesidad de tenerlo en cuenta, lo cual es justificable para el caso de los eventos de crecida pero es discutible cuando se trata de escalas temporales mayores.

Luego, se hace necesario actualizar la cantidad de agua  $H_1$  dentro del tanque T1:

$$H_1 = H_1 - Y_1$$

En este caso, a menos que se llene el almacenamiento estático, no se deja pasar nada a la escorrentía. En la realidad puede haber escorrentía sin que necesariamente se haya llenado el almacenamiento estático en el suelo y más aún cuando es posible que el flujo en el suelo se desarrolle preferiblemente a través de la red de macroporos.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, el agua que no ingresa al almacenamiento estático T1, sigue su camino por el conducto de distribución, donde en los nodos siguientes se va derivando hacia los almacenamientos de las distintas componentes de la escorrentía.

### 3.2.3.- El almacenamiento superficial y la escorrentía directa (respuesta rápida)

El segundo nivel representa el agua que se encuentra en la superficie y es susceptible de moverse superficialmente por la ladera (escorrentía directa) o de infiltrarse al nivel inferior. En este modelo el almacenamiento del flujo superficial T2 se muestra en la Figura 9, en donde se ilustra el segundo nodo en el que hay una derivación  $D_2$  hacia el almacenamiento del flujo superficial en la ladera (mecanismo de *Horton* de producción de escorrentía) y el excedente  $Z_3$  que se produce cuando se excede la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional T3 (mecanismo de *Dunne* de producción de escorrentía), que se explicará con más detalles en el siguiente capítulo.

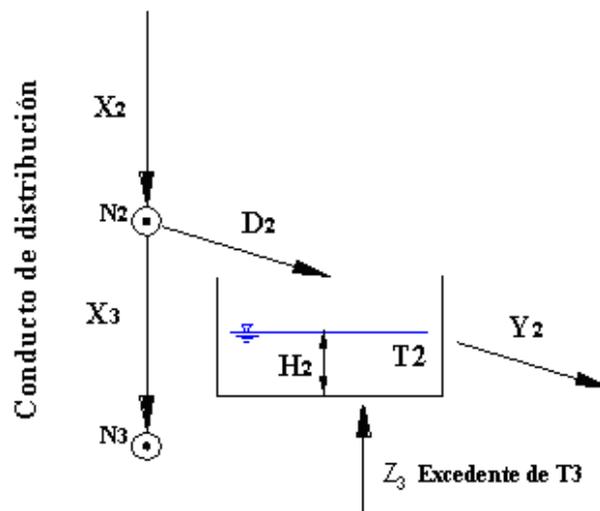


Figura 9. Esquema de almacenamiento sobre la superficie de la ladera cuando se presenta escorrentía superficial.

En este almacenamiento se representa el agua mientras fluye por la ladera y, al respecto, se pretende que tanto la cantidad almacenada como el tiempo de residencia sean coherentes

con las laderas reales en la cuenca. Se considera que el flujo en la ladera ocurre en una delgada capa que se va concentrando en una pequeña red de surcos y pequeñas depresiones o canales hasta que pasa a los elementos de la red de drenaje.

El almacenamiento superficial se alimenta del flujo derivado del conducto distribuidor en  $N_2$  y del excedente  $Z_3$  proveniente del almacenamiento gravitacional T3. La cantidad que se deriva desde el nudo  $N_2$  para escorrentía superficial depende de la capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional y del estado del almacenamiento en la capa superior del suelo. El excedente que se deriva desde el almacenamiento gravitacional depende de la capacidad máxima del tanque T3 y del estado del mismo almacenamiento.

El almacenamiento superficial se alimenta, por un lado, del flujo derivado del conducto distribuidor en  $N_2$ , cuando la intensidad de la tormenta excede la capacidad de infiltración del suelo, (Horton,1933). Por el otro lado, se puede generar una escorrentía de retorno de agua infiltrada que fluye a través del subsuelo y puede retornar a la superficie por la saturación del suelo, representada por el excedente  $Z_3$  (Dunne et al., 1975).

La cantidad que se deriva para escorrentía superficial depende de la capacidad del suelo para dejar pasar el agua gravitacional y del estado del almacenamiento en la capa superior del suelo. La capacidad para dejar pasar el agua gravitacional se puede asociar a la conductividad hidráulica en la capa superior del suelo (en condiciones de saturación). En este caso nos referimos a una conductividad en la que se tiene en cuenta tanto la macroporosidad como la microporosidad. Se supone entonces que mientras no se tengan otras limitantes se puede dejar pasar al almacenamiento en la capa superior del suelo tanta agua como lo indica esta conductividad hidráulica del suelo. Hay que recordar que del flujo en el canal distribuidor ya se ha derivado previamente cierta cantidad de agua para el almacenamiento estático en el suelo y por lo tanto parece razonable considerar que la conductividad del suelo es la conductividad saturada,  $k_s$ .

Se supone que la capa superior del suelo a la escala de la celda tiene una conductividad hidráulica representativa o característica y que se asocia al tipo de suelo y su estructura, lo cual está estrechamente relacionado con la posición de la celda en la ladera, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo. Se supone que a nivel regional, es posible hacer unos mapas con la información de la conductividad del suelo a la escala de la celda y que estos mapas son representativos de la variabilidad espacial de la conductividad máxima de la capa superior del suelo.

La cantidad de agua que sigue por el conducto distribuidor  $X_3$  (infiltración gravitacional), se relaciona con la capacidad del suelo para dejar pasar el agua a su interior con humedades por encima de capacidad de campo  $k_s$ , por el intervalo de tiempo  $\Delta t$  y con el flujo excedente del almacenamiento estático  $X_2$ , de acuerdo a la siguiente expresión:

$$X_3 = \text{Min}[X_2, \Delta t \cdot k_s \cdot FC_3]$$

Siendo  $FC_3$  el factor corrector correspondiente, que debido al efecto de escala espacial y temporal, cabe esperar que se encuentre en el entorno de 0.2. Por lo tanto, un aumento de este factor corrector a valores mayores, indica que se incrementa la conductividad hidráulica del suelo o la velocidad de infiltración, por lo tanto una mayor parte del flujo se infiltra hacia estratos más profundos del suelo. Se puede decir que se obtiene una disminución de la respuesta rápida del hidrograma de salida, el efecto que se observa es un hidrograma más plano con caudales punta más suaves y menores. Por el contrario, si se

disminuye este valor a valores menores que uno, se produce una disminución de la velocidad de infiltración a estratos más profundos, quedando una mayor cantidad de agua disponible para escurrir rápidamente, lo cual se refleja en el aumento de los caudales punta y en variaciones más fuertes del hidrograma (picos más pronunciados).

Por balance hídrico se estima la cantidad de agua que se deriva al tanque T2:

$$D_2 = X_2 - X_3$$

Se hace necesario actualizar el estado del tanque mediante la ecuación:

$$H_2 = H_2 + X_2 - X_3$$

El estado del tanque T2 se actualiza también después de haber resuelto el balance en el tanque gravitacional T3 mediante la ecuación:

$$H_2 = H_2 + X_2 - X_3 + Z_3$$

Para el flujo superficial en cada celda se supone que la ladera se puede representar por un canal equivalente. Este canal es tal que si se pone toda la escorrentía superficial a pasar a través de él, al final del período tenemos la misma cantidad almacenada que se tiene en la realidad sobre la ladera, entre los pequeños surcos de la microtopografía. Se supone que las características de este canal equivalente se pueden determinar en función de las características de la celda (morfológicas y de cobertura) y que en este canal se puede aplicar la ecuación de continuidad:

$$S_t - S_{t-1} = \sum_j I_j - O_t$$

En donde  $S_t$  representa el volumen almacenado al tiempo  $t$  y las variables  $I_j$  y  $O_t$  representan los flujos de entrada y salida al elemento  $j$ . Considerando que no existen controles aguas abajo, la ecuación anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_t = A_t \Delta x$$

$$S_t = \frac{Q_t}{v_t} \Delta x$$

Reemplazando  $S_t$  en la ecuación de continuidad:

$$\frac{Q_t}{v_t} \Delta x + O_t = \sum_j I_j + S_{t-1}$$

Considerando que  $Q_t \cdot \Delta t = O_t$  se obtiene:

$$\frac{O_t}{\Delta t} \frac{\Delta x}{v_t} + O_t = \sum_j I_j + S_{t-1}$$

$$O_t \left( \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot v_t} + 1 \right) = \sum_j I_j + S_{t-1}$$

$$O_t \left( \frac{\Delta x + \Delta t \cdot v_t}{\Delta t \cdot v_t} \right) = \sum_j I_j + S_{t-1}$$

$$O_t = \left[ \frac{\Delta t \cdot v_t}{\Delta x + v_t \cdot \Delta t} \right] \left[ \sum_j I_j + S_{t-1} \right]$$

$$O_t = \left[ \frac{\Delta t \cdot v_t + \Delta x - \Delta x}{\Delta x + v_t \cdot \Delta t} \right] \left[ \sum_j I_j + S_{t-1} \right]$$

$$O_t = \left[ 1 - \frac{\Delta x}{\Delta x + v_t \cdot \Delta t} \right] \left[ \sum_j I_j + S_{t-1} \right]$$

Por lo tanto, de la ecuación de continuidad en el canal que representa el almacenamiento superficial se puede obtener la siguiente expresión:

$$O_t = \alpha \left[ \sum_j I_j + S_{t-1} \right]$$

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{v_t \cdot FC_4 \cdot \Delta t + \Delta x}$$

Para la velocidad del flujo  $v_t$  se consideran distintas posibilidades. Una de ellas es asumir que la velocidad es estacionaria y constante sobre toda la cuenca y determinar como parámetro del modelo un valor entre 1 y 0.01 m/s. Otra posibilidad es definir que la velocidad del flujo es estacionaria pero diferente en las distintas celdas de acuerdo a la pendiente  $s_o$ . Así se tendría una expresión del tipo:

$$v_t = 1.4 \cdot s_o^{0.5}$$

El valor de 1.4 mostrado en esta expresión de velocidad corresponde a una estimación previa realizada para que el rango de velocidades se encuentre entre 1 y 0.01 m/s para un amplio rango de pendientes. Finalmente,  $FC_4$  es el factor corrector correspondiente a este flujo.

En la Figura 10 se muestra la variación del coeficiente de descarga  $\alpha$  considerando diferentes escalas espaciales y temporales en un amplio rango de pendientes. Este tipo de gráficas es útil para determinar la relación entre la escala temporal y la espacial.

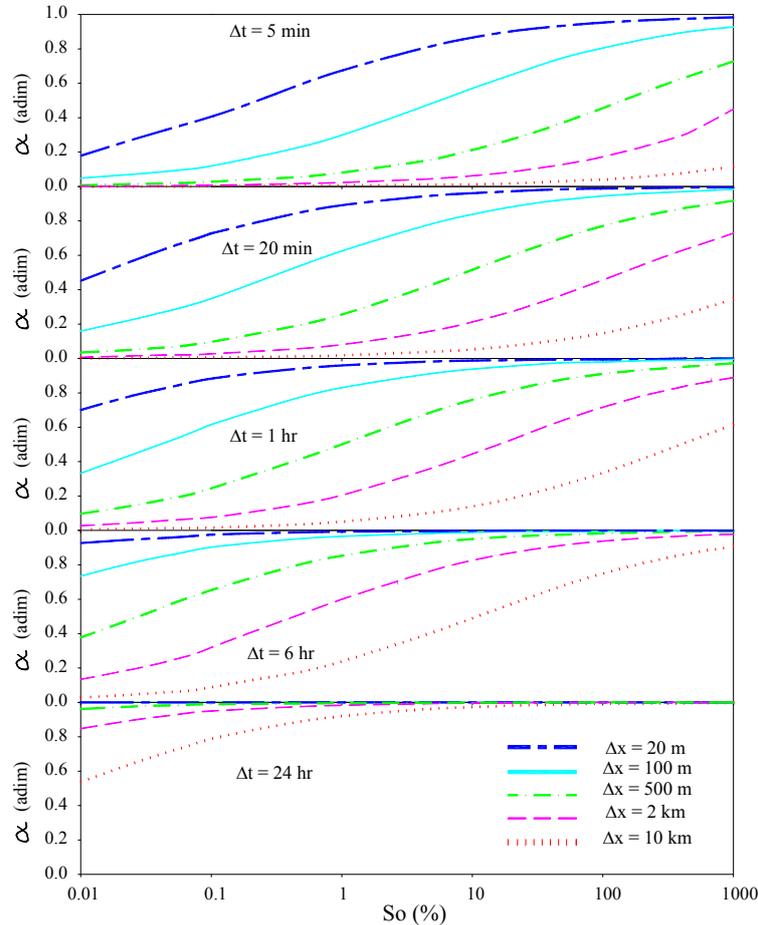


Figura 10. Efecto de escala espacio temporal del coeficiente de descarga  $\alpha$  y su variación con respecto a la pendiente  $s_o$

La dependencia de este valor con la pendiente es lógica puesto que se pretende que pendientes fuertes favorezcan la escorrentía y viceversa.

El modelo TETIS emplea para la estimación del flujo que escurre por la ladera una expresión del siguiente tipo:

$$Y_2 = H_2 \cdot \alpha$$

Nuevamente, se debe actualizar el estado del almacenamiento T2 mediante la expresión:

$$H_2 = H_2 - Y_2$$

El valor del factor corrector  $FC_4$  es bastante variable, pero puede decirse que debe encontrarse entre 0.01 y 10.0. Un aumento en el factor corrector  $FC_4$  implica un aumento en el hidrograma, esto se aprecia puesto que el coeficiente  $\alpha$  aumenta hasta que se acerca a uno, por esto el aumento es limitado. Así mismo, una disminución de este factor se traduce

en una disminución del hidrograma de salida pero tan solo hasta un tope, porque el factor  $\alpha$  se hace cero. Este factor es dependiente de las escalas temporal y espacial, tal como se aprecia en la Figura 10.

Debe tenerse muy en cuenta que el valor de la escorrentía depende de la cantidad almacenada en el tanque, por lo tanto en ocasiones puede observarse insensibilidad en este parámetro, pero se debe a que no hay suficiente agua dentro del almacenamiento T2.

El modelo considera que el almacenamiento gravitacional en el suelo se puede dividir en dos partes: una capa superior donde por lo general se tiene una mayor permeabilidad y una capa inferior donde se tienen permeabilidades más bajas (trayectorias más largas, menores gradientes) y la respuesta es más lenta.

### 3.2.4.- El almacenamiento gravitacional y el interflujo (respuesta intermedia)

El tercer nivel se puede entender como el agua gravitacional almacenada en el suelo. Parte de este volumen pasa al nivel inferior por percolación, otra parte produce el interflujo y otra parte puede volver en superficie como escorrentía de retorno.

El almacenamiento en la capa superior de suelo T3, mostrado en la Figura 11, representa el almacenamiento del agua mientras fluye lateralmente a través de la capa superior del suelo y hacia la red de drenaje. En esta representación se pretende que, tanto la cantidad almacenada como el tiempo de residencia, sean coherentes con lo que en realidad ocurre en las laderas de la cuenca durante los eventos de crecida. El tanque representa el interflujo que, a través de la capa superior del suelo, se desarrolla inicialmente sobre una delgada capa que fluye lateralmente hacia abajo en la ladera y se va concentrando en pequeñas depresiones, grietas o pequeños conductos por el interior de esta capa, hasta que sale a los elementos de la red de drenaje.

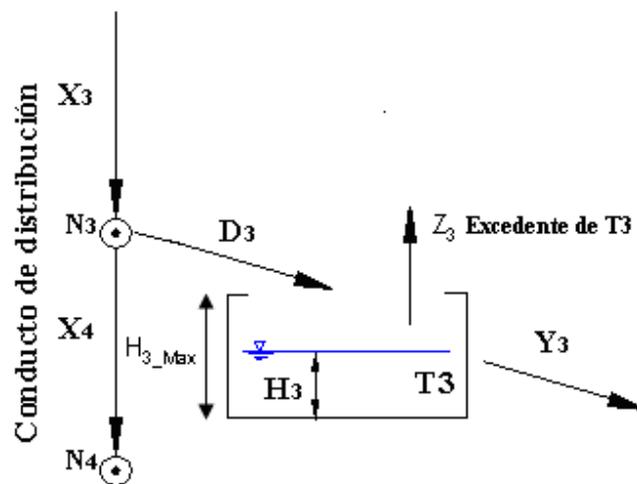


Figura 11. Esquema del almacenamiento gravitacional en la capa superior del suelo donde se tiene interflujo.

En el esquema de la Figura 11 se ilustra el nodo N3 donde hay una derivación hacia el almacenamiento de la capa superior del suelo en la que se da el interflujo en la ladera y un excedente  $Z_3$  que deriva la escorrentía de retorno al almacenamiento superficial cuando la capacidad máxima  $H_{3\_Max}$  del almacenamiento gravitacional viene superada.

De acuerdo con lo propuesto en el modelo, (en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ ), se tiene una cantidad de agua gravitacional  $X_3$  que se mueve verticalmente hacia el interior del suelo. De esta cantidad, una parte  $X_4$  podrá percolar o seguir hacia la zona inferior del suelo, mientras que el resto del agua se deriva al almacenamiento superior del suelo por encima de capacidad de campo, donde se convertirá en interflujo o en escorrentía de retorno si se excede la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional,  $H_{3\_Max}$ .

Se supone igualmente que la capa inferior del suelo a la escala de la celda tiene una capacidad de percolación representativa o característica y que se asocia al tipo de subsuelo y su estructura, lo cual puede estar estrechamente relacionado con las características geológicas (litológicas y estructurales) y geomorfológicas de las capas inferiores del suelo. En algunos casos la capacidad de percolación y su variabilidad espacial se pueden inferir por características del relieve, algunos rasgos morfológicos, el desarrollo de la vegetación, el uso y manejo del suelo y la producción de flujo base aguas abajo. Se supone que, a escala regional, es posible hacer unos mapas con la información de la capacidad máxima de percolación a la escala de la celda y que estos mapas son representativos de su variabilidad espacial.

Donde la cantidad de agua que puede continuar hacia la zona inferior del suelo durante el intervalo de tiempo se puede asociar con el flujo excedente del almacenamiento del flujo superficial en ladera  $X_3$  y la conductividad hidráulica en la capa inferior del suelo (subsuelo) en condiciones de saturación que se conoce como capacidad de percolación  $k_p$ .

$$X_4 = \text{Min}[X_3, \Delta t \cdot k_p \cdot FC_5]$$

Siendo  $FC_5$  un factor corrector que, debido a los efectos de escala espacial y temporal se debe situar en el entorno de 0.2. Así, un aumento de este factor corrector indica que se incrementa la conductividad hidráulica saturada del substrato del suelo, es decir, se aumenta la velocidad de percolación, por lo tanto una mayor parte del flujo se infiltra hacia estratos más profundos del suelo. Como resultado se obtiene una disminución del hidrograma de salida, pero hasta un valor máximo. El efecto que se observa es un hidrograma más plano con caudales punta suaves y menores. Por el contrario, si se disminuye este valor se produce una disminución de la velocidad de percolación, quedando una mayor cantidad de agua disponible para fluir sub superficialmente, lo cual se refleja en el aumento de los caudales punta y en variaciones más fuertes del hidrograma (más picudo), pero hasta cierto punto.

La cantidad de agua que se deriva del conducto distribuidor al tanque gravitacional depende de la cantidad de agua que puede percolar hacia el nivel inferior  $X_4$ , y de acuerdo con la ecuación de continuidad, es la siguiente:

$$D_3 = X_3 - X_4$$

Se procede actualizar el estado del almacenamiento T3 mediante la expresión:

$$H_3 = \text{min}(H_3 + X_3 - X_4; H_{3\_Max})$$

Si se excede la capacidad máxima del almacenamiento gravitacional se produce un excedente  $Z_3$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Z_3 = \text{Max}(0.0; H_3 + X_3 - X_4 - H_{3\_Max})$$

Para la producción de escurrentía subsuperficial en la ladera se hace una formulación análoga a la presentada en el almacenamiento T2 para obtener la siguiente relación:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{FC_6 \cdot k_{ss} \cdot \Delta t + \Delta x}$$

En donde se considera que  $FC_6$  es un factor corrector de la conductividad horizontal saturada  $k_{ss}$ .

La Figura 12 muestra la variación del coeficiente de descarga  $\alpha$  considerando diferentes escalas espaciales y temporales para un amplio rango de conductividades. En esta gráfica se observa que existe variación del factor  $\alpha$  si se emplean valores de conductividad horizontal muy altos, por lo que el factor corrector  $FC_6$  puede llegar a tomar valores muy altos si se adopta la hipótesis de  $k_{ss} = k_v$ . También se observa que a medida que el tamaño de celda es pequeño y el intervalo temporal es menor, los  $FC_6$  tienden a ser pequeños, lo que indica que se cumple la hipótesis de similitud entre la conductividad horizontal y vertical.

El factor corrector  $FC_6$  debe encontrarse entre 0.001 y 100000. Según la escala espacial y temporal, valores muy altos del factor corrector hacen que el coeficiente  $\alpha$  sea cercano a uno y por lo tanto la tasa de salida  $Y_3$  sea muy alta. Por el contrario, si los valores del factor corrector son bajos, el coeficiente  $\alpha$  tiende a ser cero y las salidas  $Y_3$  son bajas.

Por lo tanto, un incremento del factor corrector  $FC_6$  implica un aumento en el hidrograma, con caudales más altos, descensos más rápidos y más picos, todo hasta un tope. Así mismo, una disminución de este factor se traduce en una recesión más larga del hidrograma de salida, disminuyendo los caudales punta, también hasta cierto umbral.

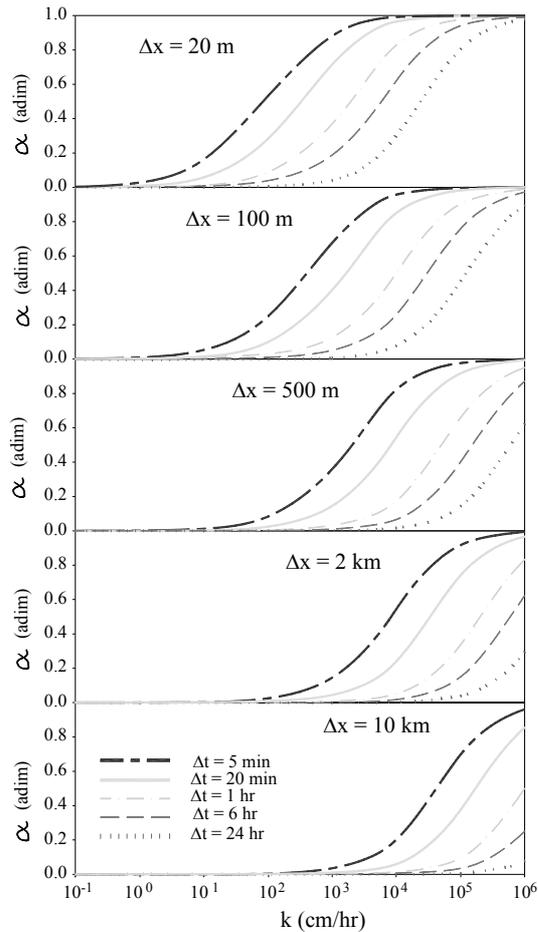


Figura 12. Efecto de escala espacio temporal del coeficiente de descarga  $\alpha$  y su variación con respecto a la conductividad hidráulica horizontal saturada  $k_{ss}$ .

El modelo TETIS utiliza la siguiente expresión para estimar la cantidad del flujo que escurre subsuperficialmente:

$$Y_3 = H_3 \cdot \alpha$$

Se necesita actualizar el estado almacenamiento T3, lo cual se hace mediante:

$$H_3 = H_3 - Y_3$$

Debe tenerse muy en cuenta que este valor depende de la cantidad almacenada en el tanque, por lo tanto en ocasiones puede observarse insensibilidad en este parámetro, pero se debe a que no hay suficiente agua dentro del almacenamiento T3.

En el caso de una celda de tipo karst, este flujo representa el drenaje más rápido desde el acuífero.

### 3.2.5.- El almacenamiento subterráneo y el flujo base (respuesta lenta)

El cuarto nivel representa al acuífero. Las salidas corresponden a las pérdidas subterráneas (para la cuenca modelada) y el flujo base de los cauces.

El almacenamiento subterráneo se ha representado por el tanque T4 mostrado en la Figura 13, donde se considera el almacenamiento del agua gravitacional mientras fluye a través

del interior del suelo hacia la red de drenaje, en lo que se podría considerar como el acuífero, y de donde sale para formar el flujo base.

De un modo similar a lo planteado anteriormente para los otros almacenamientos, en esta representación se pretende que, tanto la cantidad almacenada como el tiempo de residencia, sean coherentes con lo que en realidad ocurre en los acuíferos de la cuenca, ya sea que allí el suelo esté formado por depósitos de materiales granulares, medios porosos, sistemas cársticos o sistemas de fracturas.

En el esquema de la Figura 13 se ilustra que el tanque T4 recibe agua del conducto de distribución en el nodo  $N_4$ . El volumen de agua que durante el intervalo de tiempo ingresa por percolación  $X_4$  se lleva por el conducto distribuidor hasta el nudo  $N_4$  donde se tiene la posibilidad de que una cantidad de agua siga hacia las pérdidas subterráneas  $X_5$  y que el resto  $D_4$  sea derivado hacia el almacenamiento subterráneo T4.

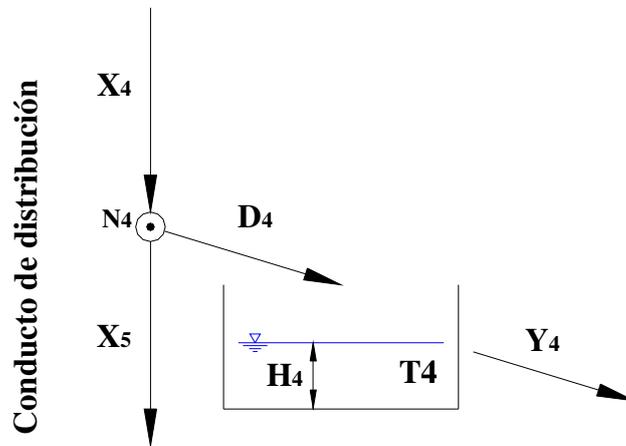


Figura 13. Esquema del almacenamiento de agua gravitacional en la parte inferior del suelo.

En algunos casos se tienen condiciones geológicas y/o de intervención humana en la cuenca en las que la magnitud de estos volúmenes de flujo es importante y por lo tanto se deben tener en cuenta para la modelación. En algunas situaciones la explotación de acuíferos involucra grandes volúmenes de agua y una buena parte del agua, que de otro modo haría parte del flujo base, fluye hacia los sitios de explotación.

Para las pérdidas subterráneas el modelo TETIS emplea la siguiente expresión:

$$X_5 = \text{Min}[X_4, \Delta t \cdot k_{ps} \cdot FC_7]$$

En donde  $k_{ps}$  es la velocidad de percolación en la zona profunda del suelo. En el modelo se ha contemplado la posibilidad de que parte del agua que llega al acuífero no se incorpora al flujo base en la cuenca. En la mayoría de las cuencas naturales estas pérdidas son una parte muy pequeña del agua que circula a través de la cuenca, y por lo tanto se puede asumir que

estas pérdidas son cero, lo cual se puede hacer ajustando el factor corrector  $FC_7$  a cero y así la totalidad del agua que percola pasa al almacenamiento subterráneo.

Un aumento del factor  $FC_7$  indica que se incrementan las pérdidas subterráneas, por lo tanto una mayor parte del flujo se infiltra hacia estratos mas profundos del suelo, este volumen de agua que se pierde debe tenerse en cuenta a la hora de realizar un balance de agua. Como resultado se obtiene una disminución del hidrograma de salida, pero hasta un umbral. El efecto que se observa es un hidrograma más plano con caudales punta más suaves y menores en magnitud. Por el contrario, si se disminuye este valor queda una mayor cantidad de agua disponible para contribuir al flujo base, lo cual se refleja en el aumento de los caudales punta y en un aumento del hidrograma, pero hasta cierto punto.

La cantidad de agua que se deriva del conducto distribuidor para el flujo subterráneo depende de la cantidad de agua que ha percolado y de la cantidad que pasa a las pérdidas y de acuerdo con la ecuación de continuidad es la siguiente:

$$D_4 = X_4 - X_5$$

Actualizando el estado del almacenamiento del tanque T4:

$$H_4 = H_4 + X_4 - X_5$$

Para la representación del flujo a través del almacenamiento subterráneo, en cada una de las celdas se utiliza la ecuación de continuidad y una ecuación que relaciona la tasa de flujo que sale de este almacenamiento con la cantidad de agua almacenada. Del mismo modo que en los almacenamientos anteriores y siendo  $FC_8$  un factor corrector, el modelo TETIS emplea la siguiente relación para estimar las salidas del almacenamiento subterráneo:

$$\alpha = 1 - \frac{\Delta x}{FC_8 \cdot k_{sa} \cdot \Delta t + \Delta x}$$

En donde  $k_{sa}$  corresponde a la conductividad hidráulica horizontal saturada del sustrato.

El valor del factor corrector  $FC_8$  debe encontrarse entre 0.001 y 100000. Según la escala temporal y espacial, valores muy altos del factor corrector hacen que el coeficiente  $\alpha$  sea cercano a uno y por lo tanto la tasa de salida  $Y_4$  sea muy alta. Por el contrario, si los valores del factor corrector son bajos, el coeficiente  $\alpha$  tiende a ser cero y las salidas  $Y_4$  son pequeñas.

Aunque depende de la escala, un incremento del factor  $FC_8$  implica un aumento en el hidrograma, con caudales más altos y respuestas más rápidas, esto hasta cierto umbral. Así mismo, una disminución de este factor se traduce en una recesión más lenta en el hidrograma de salida, disminuyendo los caudales punta, también hasta un límite.

La relación para la el flujo de salida de este nivel para cada celda es la siguiente:

$$Y_4 = H_4 \cdot \alpha$$

Finalmente, es necesario actualizar el estado del almacenamiento subterráneo:

$$H_4 = H_4 - Y_4$$

La importancia de la representación del flujo subterráneo en la modelación de crecidas está en reproducir adecuadamente las recesiones del flujo en los cauces y que esto sea coherente con el volumen de agua que ha ingresado al almacenamiento subterráneo.

Posteriormente y después de hacer los cálculos en todos los tanques de almacenamiento en la celda se tiene el volumen que había en el canal más el que ingresa durante el intervalo como el volumen total del tramo. Se procede entonces a calcular la velocidad del flujo para realizar la traslación hacia las celdas aguas abajo, lo cual será expuesto con mayor detalle dentro de este informe en futuros apartados.

Debe tenerse muy en cuenta que este valor depende de la cantidad almacenada en el tanque, por lo tanto en ocasiones puede observarse insensibilidad en este parámetro, pero se debe a que no hay suficiente agua dentro del almacenamiento T4.

En el caso de una celda de tipo karst, este flujo representa el drenaje lento del acuífero.

### **3.3.- LA FUSIÓN DE LA NIEVE**

Todo modelo de fusión de nieve debe tener dos componentes básicas: una es la que tiene en cuenta la acumulación y la otra es la forma como se realiza la fusión. Para la fusión se encuentran dos aproximaciones clásicas. La primera corresponde a los métodos de tipo índice térmico o grado-día (Martinec, 1960) y los basados en conceptos físicos considerando el balance energético (Dunn y Colohan, 1999).

Lettenmaier y Wood (1992) resaltan que la precisión en la predicción de la fusión de nieve esta condicionada por:

- La precisión a la cual el agua almacenada en la nieve puede ser medida al comienzo del período de predicción
- El conocimiento de la humedad del suelo y su distribución espacial al comienzo del período de derretimiento
- Disponibilidad de energía para la fusión de la capa de nieve durante el período de predicción
- La precipitación y su forma, ya sea en forma de lluvia o nieve, durante el período de predicción
- La precisión del modelo usado para realizar la infiltración y la traslación del agua
- Las predicciones más precisas son obtenidas cuando la acumulación de la nieve y el período de fusión están bien definidos y hay poca precipitación durante la fusión.

Debido a la escasez de la información se emplean métodos tipo índice, siendo el más empleado el índice de temperatura.

Un modelo conceptual simple como el Snowmelt Runoff Model (SRM) desarrollado por Martinec y Rango (Martinec, 1960; Rango y Martinec, 1979, Rango, 1995) ha mostrado buenos resultados en un gran número de cuencas que varían en tamaño. La modelación confiable usando el SRM requiere una estimación precisa de los parámetros, adecuada determinación de la forma del modelo (número de términos previos de nieve/lluvia a ser incluidos) y medidas de áreas cubiertas de nieve denominadas SCA (Snow Covered Areas). El uso del modelo en modo de predicción podría ser mejorado si la información en tiempo real puede ser usada para actualizar los parámetros del modelo sobre una cuenca regular.

Haltiner y Salas (1988) emplean un modelo estocástico de series temporales tipo ARMAX o modelos de funciones de transferencia, y muestran que SRM puede ser visto como un caso particular dentro de esta clase de modelos estocásticos lineales. Los modelos ARMAX dan mejores resultados de predicción con menos parámetros que el modelo SRM.

### 3.3.1.- La medición de la cantidad de nieve

La temperatura y la cantidad de nieve presente en una cuenca varían fundamentalmente en función de la elevación sobre el nivel de mar (Dunn y Colohan, 1999), aunque la acumulación esté condicionada por otros factores como la cobertura vegetal, la dirección del viento, la orientación de las laderas y la topografía.

Para determinar la cantidad de agua almacenada en la nieve se pueden realizar:

- Medidas manuales, empleando aparatos de medida que estiman la densidad y el espesor de la nieve en puntos previamente establecidos para realizar un seguimiento temporal de estas variables.
- Medición mediante sistemas automáticos que estiman la cantidad de agua equivalente en la cobertura nival, la temperatura del aire y la precipitación y almacenan los registros para su posterior análisis. Estos medidores requieren un muestreo constante para garantizar un registro continuo y confiable.
- Sistemas remotos o satélites, por medio de los cuales es muy fácil establecer el área cubierta por nieve. Sin embargo es más difícil estimar la cantidad de nieve, aunque parece que los rayos Gamma han sido usados con éxito para espesores de coberturas de nieve menores a 30 cm de agua equivalente en zonas abiertas de los Estados Unidos. Los problemas asociados a la medición de profundidades mayores son la variabilidad topográfica y la cobertura vegetal (Lettenmaier y Wood, 1992)

### 3.3.2.- Modelo de fusión: Método Índice de Temperatura

El modelo TETIS emplea el método índice de temperatura para la estimación de la fusión de la nieve, básicamente porque no se dispone de información completa de radiación solar neta, energía sensible, energía latente, calor del suelo y energía advectiva. Esta información es necesaria para la estimación de la fusión de la nieve en modelos que tienen en cuenta el balance energético aplicando leyes de conservación (Kraijenhoff y Moll, 1986). Además hay que decir que el método índice de temperatura o grado-día es el más utilizado. Las hipótesis en las que se basa según Dingman (1993) son:

- La energía de radiación de onda larga se puede suponer como una función lineal de la temperatura del aire.
- Existe una correlación entre la radiación solar y la temperatura del aire.
- Durante la fusión, la temperatura de la nieve es cercana a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Este método es ampliamente utilizado debido a que requiere poca información y es fácilmente adaptable a los modelos lluvia escorrentía, siendo su forma general la siguiente:

$$M = M_f (T_a - T_b), \quad T_a \geq T_b$$

$$M = 0 \quad T_a < T_b$$

En donde,  $M$  [mm/día] es la tasa de fusión de nieve,  $T_a$  [°C] es la temperatura media del aire,  $T_b$  [°C] es la temperatura base y  $M_f$  [mm/°C día] es el coeficiente de fusión. La temperatura base varía entre 4 y -2 °C, siendo recomendable en España el valor de -2 °C.

El coeficiente  $M_f$  varía con la latitud, la elevación, la pendiente, la cobertura forestal, las condiciones atmosféricas, la época del año, propiedades físicas de la nieve y la orientación de la ladera. Por lo tanto, debe ser calibrado empíricamente para cada cuenca. Sin embargo, Maidment (1993) sugiere que  $M_f$  puede ser estimado mediante la siguiente relación:

$$M_f = 0.011\rho_s$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad de la nieve [Kg/m³]. Puesto que la densidad de la nieve se encuentra en un rango entre 300 y 500 kg/m³, el coeficiente de fusión puede variar entre 3 y 6 mm/°C día. Los valores mas bajos son los recomendados para la nieve fresca.

También se recomiendan valores entre 0.9 y 1.8 mm/°C día para zonas con cubierta forestal, y valores entre 1.5 y 7.0 mm/°C 6-horas para zonas planas.

Se ha mostrado también que el coeficiente  $M_f$  aumenta mientras avanza la época de fusión de nieve, debido principalmente a que se incrementa la densidad de la nieve, aumenta la radiación solar y disminuyen el albedo y la energía interna en la capa de nieve. Existen metodologías que tienen en cuenta este factor incrementando el coeficiente de fusión.

Otro factor importante a tener en cuenta dentro del proceso de la fusión de nieve corresponde al calor aportado por la lluvia, el cual hace que el factor aumente. Es por ello que en el modelo de fusión desarrollado en TETIS se emplean dos coeficientes de fusión: uno para el caso que involucra la precipitación y otro para la fusión de nieve únicamente. Es importante tener en cuenta que el modelo TETIS adopta la tasa de fusión de nieve con precipitación con que haya al menos una estación con precipitación diversa de cero.

Maidment (1993) muestra una ecuación para la fusión de la nieve mientras hay lluvia dada por la siguiente expresión:

$$M = (0.74 + 0.007P)(T_a - T_b)$$

Siendo  $P$ , la precipitación de 24 horas dada en mm.

El viento es otro factor que debe tenerse en cuenta, sin embargo, dado que la física de los efectos del viento en la nieve son complejos no se han considerado. Sin embargo, una aproximación válida sería aumentar el número de parámetros con un método tipo índice como lo proponen Dunn y Colohan (1999), pero dada la parsimonia deseada para el modelo TETIS, esto no se realiza. Algo similar sucede con los parámetros densidad de la nieve, la pendiente y la orientación de laderas, los cuales se desprecian dentro del modelo TETIS buscando la parsimonia.

En las Tablas 1 se muestran algunos valores del coeficiente de fusión propuestos por diferentes autores para estimar la fusión de la nieve en diferentes partes del mundo.

| Referencia               | Coefficiente de fusión<br>(mm/°C día) |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Yoshida (1962)           | 4.0-8.0                               |
| Borovikova et al. (1972) | 3.0-5.0                               |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| Anderson (1973)                | 1.3-3.7 |
| Abal'yan et al. (1980)         | 5.0     |
| Braithwaite y Olesen (1988)    | 2.5     |
| Woo y Fitzharris (1992)        | 3.0     |
| Jóhannesson et al. (1995)      | 4.4-5.6 |
| Laumann y Reeh (1993)          | 3.5-4.5 |
| Singh y Kumar (1996)           | 5.9     |
| Sing et al. (2000)             | 5.7-6.4 |
| Río Tajo en España (CHT, 1996) | 1.0-3.0 |

Tabla 1. Valores medios del coeficientes de fusión (Índice térmico) para la estimación de la fusión de la nieve. Tomado de Maidment (1993, pág 7.24), Lang (1986), Ponce (1989, pág 378) y Singh et al. (2000, pág 3)

La cantidad de agua estimada proveniente del proceso de fusión de nieve se ingresa al modelo de producción de escorrentía como un valor adicional a la entrada por lluvia.

En la Tabla 2 se presenta una breve recopilación tomada de la literatura científica en donde se presentan diferentes valores y metodologías para la estimación de la tasa de fusión de nieve, basándose en el método del índice térmico en todo el mundo.

| Lugar (Referencia)                | Medio                                       | Mínimo | Máximo |
|-----------------------------------|---|--------|--------|
|                                   | Ecuación                                    |        |        |
| Alpes Suizos (Zingg, 1951)        | 4.5   |        |        |
| Escocia (Dunn y Colohan, 1999)    |   | 7.5    | 10.0   |
| U.S.A. Cuerpo de Ingenieros       | 2.3   | 0.7    | 9.1    |
| Unión Soviética (Kuzmin, 1966)    | 7.5   | 3.9    | 24.1   |
| Finlandia (Kuusisto, 1980)        | 3.5   | 2.8    | 4.9    |
|                                   | 2.04  | 1.8    | 3.4    |
| Aletschglacier (Lang et al. 1977) | 5.3   | 5.3    | 47.0   |
| A 3366 y 2220 m.s.n.m.            | 11.7  | 4.4    | 34.5   |
|                                   | 6.6   | 3.0    | 22.5   |
|                                   | 6.0   | 3.0    | 11.1   |
| Montañas al Oeste de Canadá       | $M=3(T_m+\beta(T_{max}-T_{min}))/8+T_{min}$ |        |        |
|                                   | Para $T_{min}\leq 0$ , $\beta=0$            |        |        |
|                                   | Para $T_{min}>0$ , $\beta=T_{min}/4.4$      |        |        |
| Río Rojo (Manitoba)               | $M=(0.9 \rightarrow 2.7) T_m$               |        |        |
| Sur de Ontario                    | $M=(3.66 \rightarrow 5.7) T_m$              |        |        |
| Montañas Rocosas                  | $M=4.08 T_m$ ó $M=1.10 T_{max}$ (Abril)     |        |        |
|                                   | $M=4.58 T_m$ ó $M=1.42 T_{max}$ (Mayo)      |        |        |
| Western Cascades, Oregon          | $M=1.70 T_m$ ó $M=0.46 T_{max}$ (Abril)     |        |        |
|                                   | $M=3.30 T_m$ ó $M=1.42 T_{max}$ (Mayo)      |        |        |
| Sierra Nevada, California         | $M=1.78 T_m$ ó $M=0.96 T_{max}$ (Abril)     |        |        |
|                                   | $M=1.92 T_m$ ó $M=1.14 T_{max}$ (Mayo)      |        |        |
| Cuenca al este de Canadá          | $M=1.82 (T_m+2.4)$                          |        |        |
| Bosque Boreal                     | $M=0.58 T_m$                                |        |        |
|                                   | $M=1.83 (T_m-3.5)$                          |        |        |
| Taiga                             | $M=0.91 (T_m-2.5)$                          |        |        |
|                                   | $M=1.66 T_m$                                |        |        |

| Lugar (Referencia) | Medio   | Mínimo | Máximo |
|--------------------|---|--------|--------|
|                    | Ecuación  |        |        |
| Sierra Central     | M=4.07 T <sub>m</sub> ó M=1.10 T <sub>max</sub> (Abril) |        |        |
|                    | M=4.57 T <sub>m</sub> ó M=1.97 T <sub>max</sub> (Mayo)  |        |        |
| Upper Columbia     | M=1.69 T <sub>m</sub> ó M=0.46 T <sub>max</sub> (Abril) |        |        |
|                    | M=3.29 T <sub>m</sub> ó M=1.41 T <sub>max</sub> (Mayo)  |        |        |
| Cuenca Willamette  | M=1.78 T <sub>m</sub> ó M=0.96 T <sub>max</sub> (Abril) |        |        |
|                    | M=1.92 T <sub>m</sub> ó M=1.14 T <sub>max</sub> (Mayo)  |        |        |

Tabla 2. Expresiones tipo Índice térmico para la estimación de la fusión de la nieve en diferentes partes del mundo. Tomado de Maidment (1993, pág 7.24), Lang (1986), Ponce (1989, pág 378) y Singh et al. (2000, pág 3)

### 3.3.3.- El efecto de la escala temporal

La escala temporal del episodio es importante a la hora de realizar un estudio sobre la fusión de nieve, principalmente por la variación de la temperatura a lo largo del día y de la noche, por esta razón a escala diaria la tasa de fusión  $M$  tiende a ser menor que a la escala horaria o quinceminutal, para un mismo intervalo temporal.

El aumento de la tasa de fusión a escalas menores a la horaria puede incluirse dentro del modelo TETIS mediante un aumento del coeficiente de fusión  $M_f$  o incrementando la Temperatura base  $T_b$ . Considerando que el rango de variación de la temperatura base es más estable debido a su carácter físico, es más lógico pensar en un aumento en el coeficiente de fusión  $M_f$  cuando se trabaja a escalas temporales menores.

### 3.4.- EL REGADÍO

El efecto del regadío en la cuenca es considerada por el modelo empleando una regla de operación de riego, para lo cual se requiere de información que explique a lo largo del año la cantidad de agua que se riega en cada celda y la frecuencia del riego en cada una.

En la Tabla 3 se muestra un ejemplo del tipo de información necesaria para incluir este efecto dentro del modelo TETIS.

| Mes        | Zona de riego 1 |                   | Zona de riego 2 |                   | Zona de riego 3 |                   |
|------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
|            | Cantidad (mm)   | Frecuencia (días) | Cantidad (mm)   | Frecuencia (días) | Cantidad (mm)   | Frecuencia (días) |
| Enero      | 0               | 0                 | 50              | 15                | 0               | 0                 |
| Febrero    | 0               | 0                 | 50              | 15                | 0               | 0                 |
| Marzo      | 0               | 0                 | 50              | 15                | 0               | 0                 |
| Abril      | 10              | 10                | 25              | 10                | 0               | 0                 |
| Mayo       | 50              | 10                | 30              | 10                | 0               | 0                 |
| Junio      | 30              | 5                 | 40              | 10                | 0               | 0                 |
| Julio      | 80              | 5                 | 50              | 10                | 20              | 10                |
| Agosto     | 110             | 10                | 40              | 10                | 50              | 10                |
| Septiembre | 80              | 10                | 30              | 10                | 50              | 10                |

|           |    |    |    |    |    |    |
|-----------|----|----|----|----|----|----|
| Octubre   | 20 | 15 | 50 | 15 | 20 | 10 |
| Noviembre | 20 | 15 | 50 | 15 | 0  | 0  |
| Diciembre | 0  | 0  | 50 | 15 | 0  | 0  |

Tabla 3. Información requerida para incluir el efecto del riego en diferentes regiones de la cuenca de estudio.

La variación temporal de la cantidad de riego debe tener en cuenta la cantidad de agua que evapotranspira, de tal forma que el efecto del riego sea favorable para la planta.

De la misma forma que el aporte por fusión de nieve, la cantidad de agua que ingresa al modelo por riego se considera como una cantidad adicional a la precipitación  $X_t$ .

### 3.5.- LAMINACIÓN EN EMBALSES

La presencia de embalses es importante dentro de toda cuenca ya que son puntos de control del hidrograma que circula por el cauce.

Para caudales pequeños un embalse puede modificar totalmente el hidrograma del río. Pero esta modificación también puede producirse durante una crecida, debido al efecto de laminación de su almacenamiento permanente (por debajo de los aliviaderos) y temporal (por encima de los aliviaderos). Dependiendo del tamaño relativo del embalse frente al volumen de la crecida, el efecto registrado puede ser pequeño o muy importante.

Para considerar el efecto de los embalses es necesario tener clara su localización y sus características físicas, dadas por las curvas en función de la altura de la lámina de agua siguientes:

- Curva de embalse, que representa el volumen embalsado en función de la cota en el embalse.
- Curva de desagüe, que representa los valores máximo (compuertas y válvulas abiertas) y mínimo (compuertas y válvulas cerradas) de capacidad de desagüe en función de la cota en el embalse.

#### 3.5.1.- Simulación de un embalse

La simulación de un embalse se realiza de forma diferente, dependiendo del tipo de información disponible respecto de los volúmenes, los niveles en el embalse y los caudales de salida. En la Figura 14 se muestra un esquema general del funcionamiento del embalse.

##### 3.5.1.1.- Balance estricto

Si se conocen los niveles o volúmenes (S) y caudales de salida (Q), la estimación del hidrograma de entrada (I) a partir de los datos medidos se realiza empleando la ecuación de continuidad del embalse:

$$S_f(t) = S_o(t) + I(t) - Q(t)$$

En donde el volumen del embalse al inicio y al final de cada intervalo de tiempo es calculado mediante interpolación de la curva de embalse. El hidrograma así calculado puede compararse con el simulado por TETIS.

Si faltan los datos de volúmenes, niveles o de caudales de salida, se utiliza la ecuación de balance considerando el hidrograma de entrada simulado por TETIS para estimar la serie faltante.

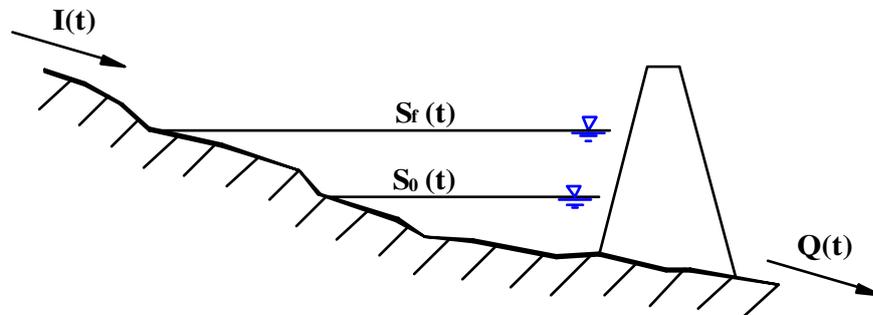


Figura 14. Esquema conceptual del efecto de los embalses en el modelo TETIS.

### 3.5.1.2.- Método Puls Modificado

Si no se conoce el hidrograma de salida del embalse ni la evolución de sus niveles, es necesario simular el proceso de laminación en el embalse. El método empleado por TETIS es el Puls Modificado. En todo caso si que es necesario suministrar el nivel inicial del embalse para poder arrancar su simulación.

En la Figura 15 se observa el efecto de laminación producido, el cual está regulado por la expresión:

$$\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} = I_j + I_{j+1} + \frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j$$

Siendo  $\Delta t$  el intervalo de tiempo,  $S_j$  y  $S_{j+1}$  los volúmenes en el tiempo  $j$  y  $j+1$ . Para  $Q_j$  y  $Q_{j+1}$  como los flujos de salida del embalse y considerando  $I_j$  e  $I_{j+1}$  como los caudales de entrada al embalse.

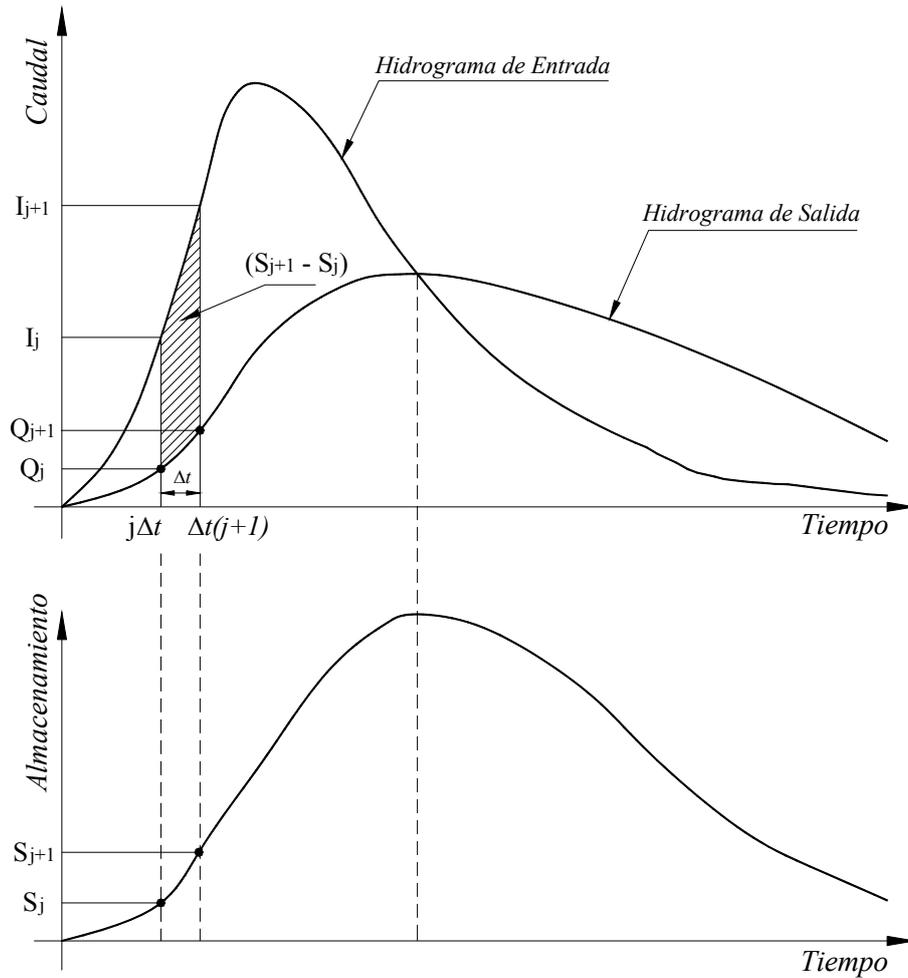


Figura 15. Esquema del método de laminación de embalses Puls Modificado. Tomado de Chow et al. (1994).

Para el Puls Modificado, Ponce (1989) sugiere el siguiente procedimiento:

- Inicio con  $j=1$

- Calcular  $I_j + I_{j+1} + \frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j$ , para el primer paso se deben conocer las condiciones iniciales.

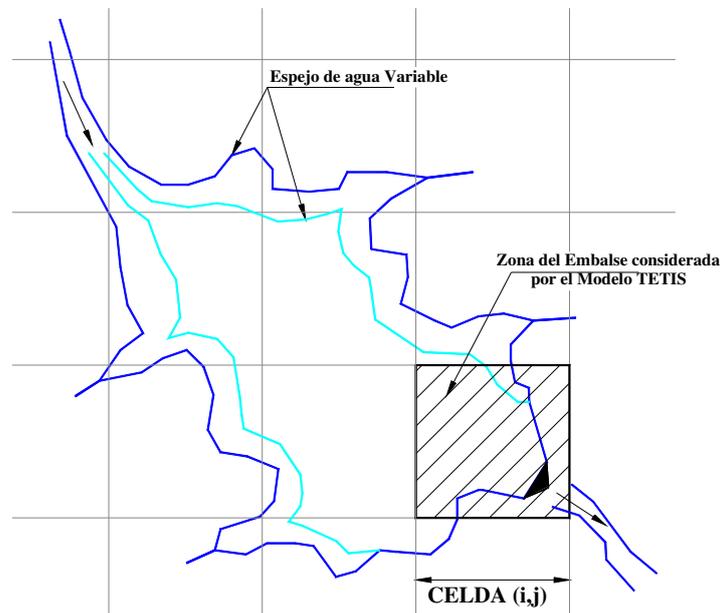
- Mediante un proceso iterativo se estiman los valores  $Q_{j+1}$  y  $S_{j+1}$  de la ecuación  $\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1}$  basándose en la curva volumen contra la descarga propia del embalse.

- Incrementar el contador  $j$  en 1 y volver al paso 2. Finalizar hasta que la recesión del flujo de salida se estabiliza.

### 3.5.2.- Localización del embalse

Para efectos de la modelación distribuida, y considerando que el espejo del agua varía según la cantidad de agua que contiene el embalse, el modelo identifica como embalse a

una sola celda cuya localización será lo más cercana a la salida del embalse, tal como se indica en la Figura 16.



*Figura 16. Simplificación realizada por el modelo TETIS para la localización de los embalses.*

Esta simplificación del modelo no involucra el efecto de la evaporación variable con el nivel en el embalse, ni la mayor velocidad de propagación que existe en sus celdas. Sin embargo, salvo grandes embalses, tanto en crecidas como en simulación continua esta aproximación se considera aceptable.

### **3.6.- LA TRASLACIÓN DE LA ESCORRENTÍA: LA ONDA CINEMÁTICA GEOMORFOLÓGICA**

Para la traslación de la escorrentía TETIS presenta una formulación que incluye elementos de la geometría hidráulica. Con estos elementos se puede hacer un análisis hidráulico razonable de las transferencias entre las celdas, sin requerir grandes volúmenes de información (generalmente bastante costosa) y sin recurrir a simplificaciones exageradas a escala cuenca. Esta formulación aprovecha al máximo la información disponible, siendo al mismo tiempo un esquema bastante robusto.

La traslación de la escorrentía a lo largo de la cuenca se realiza considerando que el agua no abstraída circula sobre las laderas hasta alcanzar algún canal perteneciente a la red de drenaje natural de la cuenca, y a partir de allí circula por la red drenaje en sí. Su estimación se puede hacer de acuerdo con las leyes de la Hidráulica de los cauces naturales o con simplificaciones conceptuales. En el caso de TETIS, el modelo empleado es de la “onda cinemática”, que es una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant al desprestigiar en la ecuación de conservación de la energía los términos correspondientes a los efectos inerciales y de presión.

Por otra parte, las características hidráulicas de los cauces se van a obtener con base en parámetros propios de la cuenca (o regionales si no se dispone de los propios) que se

extraen de la información geomorfológica de la cuenca. Por eso, esta nueva metodología se ha denominado de la Onda Cinemática Geomorfológica (en adelante OCG).

### **3.6.1.- Bases teóricas**

En cuencas de montaña y a escala de la cuenca se puede considerar que en la red de drenaje prácticamente toda la energía potencial se disipa por fricción en los cauces y la fracción de energía potencial que se transforma en energía cinética es una fracción muy pequeña. Esta fracción es comparable (si no es menor) al error acumulado que se podría obtener mediante la aplicación rigurosa del método mas complejo y preciso que incluyera la ecuación de conservación de energía incluso disponiendo de la mejor información de campo que es posible obtener en la actualidad.

Para las cuencas de montaña, a la escala de la cuenca y sin temor a grandes errores se puede proponer un modelo de flujo en la red de drenaje a partir de las siguientes hipótesis:

- El método se basa en el principio de conservación de masa (ecuación de continuidad).
- En la red de drenaje la pendiente de la línea de energía es aproximadamente igual a la pendiente del terreno.
- La cantidad de movimiento se ajusta en todos los elementos de la red de tal forma que las aceleraciones sean despreciables y que a nivel local solo se presentan las requeridas para que la nueva velocidad y las deformaciones en el cauce sean tales que la resistencia al flujo alcance a contrarrestar a la acción de la fuerza de gravedad.
- La resistencia al flujo es función de velocidad, del radio hidráulico y de la rugosidad del cauce.
- La sección del cauce se modifica (tanto en la profundidad de la lámina de agua como en las características del cauce) hasta que su nueva forma produce una resistencia al flujo similar a la acción de la gravedad.
- La velocidad del flujo en la que se presenta esta condición de cuasi-equilibrio se puede obtener por medio de expresiones como las de Chezy o Manning.
- La forma del cauce depende del ambiente geomorfológico, del área drenada y del flujo. Se puede decir que es regionalizable en función del área y del caudal
- El coeficiente de rugosidad se puede obtener de acuerdo al tamaño característico de los sedimentos, aplicando expresiones como las de Strickler, Limerinos, Kennedy, Hey, etc.
- A todas y cada una de las celdas en que se ha discretizado la cuenca le corresponde un elemento de red de drenaje.

La red drenaje se obtiene a partir de la estructura de conexión de las celdas en el MED, con base en las direcciones de flujo. La calidad de la red obtenida depende de la resolución y calidad del MED y de los algoritmos utilizados para su procesamiento. Se elaboraron algoritmos específicos para construir los mapas de dirección de flujo y de celdas acumuladas no descritos en este informe.

### 3.6.2.- La forma de la sección del cauce

La forma de la sección de flujo en cada uno de los elementos que conforman la red puede obtenerse a partir de las relaciones de geometría hidráulica previa validación de sus parámetros en la región. Estas relaciones fueron propuestas por Leopold y Maddock (1953), quienes relacionaron las dimensiones de la sección de flujo: profundidad  $y$ , el ancho  $w$  y la velocidad en la sección  $v$  con el caudal en el cauce  $Q$  mediante ecuaciones de tipo potencial de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}y &= bQ^\beta \\w &= cQ^\varepsilon \\v &= pQ^\lambda\end{aligned}$$

En donde los parámetros  $b$ ,  $c$ ,  $p$ ,  $\beta$ ,  $\varepsilon$  y  $\lambda$  son constantes. La ecuación de continuidad y la homogeneidad dimensional exigen que  $b \cdot c \cdot p = 1$  y  $\beta + \varepsilon + \lambda = 1$ .

De acuerdo a fuertes evidencias empíricas se han determinado dos grupos de valores para estos coeficientes y exponentes que han sido denominados “para la estación” y “para aguas abajo”. Los valores para aguas abajo predicen las variaciones para diferentes sitios a lo largo de un canal y están basadas en caudales con nivel de referencia geomorfológico común. La mayor evidencia empírica se ha obtenido para la sección del cauce expuesta como una cicatriz permanente en el terreno conocido como “caudal a sección llena”. En algunos ambientes geomorfológicos el caudal responsable de la forma del cauce no necesariamente es el que llena la sección, por lo que para evitar confusiones se habla en estos casos del caudal dominante  $Q_d$ .

El caudal dominante posee una frecuencia relativamente alta (desde el punto de vista geomorfológico) y una buena capacidad de transporte. La combinación de estos dos elementos induce a pensar que la mayor parte del trabajo geomorfológico lo realizan caudales de este orden de magnitud.

El caudal dominante se ha asociado a periodos de retorno entre 1.5 y 10 años, dependiendo de las condiciones morfológicas y climáticas regionales según Richards (1979).

Leopold y Maddock (1953) reportan valores promedio de los exponentes para regiones áridas en los Estados Unidos de América  $\beta_1 = 0.4$ ,  $\varepsilon_1 = 0.5$  y  $\lambda_1 = 0.1$ . Por otra parte, Wolman (1955) encontró valores de  $\beta_1 = 0.45$ ,  $\varepsilon_1 = 0.42$  y  $\lambda_1 = 0.05$ , mientras que Brush (1961) reportó valores de los coeficientes  $\beta_1 = 0.36$ ,  $\varepsilon_1 = 0.55$  y  $\lambda_1 = 0.09$ . El subíndice 1 se refiere a los coeficientes “para aguas abajo”.

Para las relaciones entre las características de la sección y la descarga en un sitio determinado, Leopold y Maddock (1953) reportan los siguientes valores promedio de los exponentes para regiones áridas en los Estados Unidos de América:  $\beta_2 = 0.34$ ,  $\varepsilon_2 = 0.26$  y  $\lambda_2 = 0.4$ . El subíndice 2 se refiere a los coeficientes “en la estación”.

### 3.6.3.- Ecuaciones para la cuenca

Según Leopold, Wolman y Miller (1964) para una zona con condiciones climáticas y morfológicas homogéneas existe una relación entre el caudal a sección llena  $Q_b$  en un sitio y el área de cuenca que drena a través de este sitio  $A$ , de la siguiente manera:

$$Q_b \propto \Lambda^\varphi$$

$$Q_b = \kappa \Lambda^\varphi$$

Los parámetros  $\kappa$  y  $\varphi$  son constantes de validez regional. En distintas regiones del mundo donde se ha analizado esta expresión se han obtenido valores para el exponente  $\varphi$  entre 0.65 y 0.80. Leopold, Wolman y Miller proponen como valor promedio de gran aplicabilidad 0.75.

La combinación de una relación como la anterior y las ecuaciones de la geometría hidráulica permite obtener una relación entre características geométricas de la sección de flujo o la velocidad del flujo y el área drenada a través del cauce. Este tipo de relaciones puede ser de gran aplicación en la Hidrología distribuida ya que permite una caracterización muy eficiente de los cauces de toda la red de drenaje.

Reemplazando la expresión anterior, en las relaciones de geometría hidráulica “para aguas abajo”, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$y_b = b_1 (\kappa \Lambda^\varphi)^{\beta_1}$$

$$w_b = c_1 (\kappa \Lambda^\varphi)^{\varepsilon_1}$$

$$v_b = p_1 (\kappa \Lambda^\varphi)^{\lambda_1}$$

Estos coeficientes y exponentes son constantes. Reemplazando los elementos geométricos o hidráulicos asociados al caudal dominante por los valores obtenidos de las expresiones aguas abajo en función del área de cuenca drenada, se llega a las siguientes expresiones:

$$y = b_1 \kappa^{(\beta_1 - \beta_2)} \Lambda^{\varphi(\beta_1 - \beta_2)} Q^{\beta_2}$$

$$w = c_1 \kappa^{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \Lambda^{\varphi(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} Q^{\varepsilon_2}$$

$$v = p_1 \kappa^{(\lambda_1 - \lambda_2)} \Lambda^{\varphi(\lambda_1 - \lambda_2)} Q^{\lambda_2}$$

Si la cuenca se puede considerar dentro de una región homogénea, los coeficientes y exponentes que aparecen en estas ecuaciones se pueden suponer constantes para todos los elementos de la red de drenaje. Se presenta entonces una relación de validez regional para las características de geometría hidráulica en una sección del cauce ante cualquier caudal, en función del caudal y del área de cuenca que se drena a través de la sección.

### 3.6.4.- Relaciones empleadas en el modelo

El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos según las relaciones potenciales geomorfológicas que se presentan a continuación:

- Relación entre el caudal a sección llena  $Q_b$  con el área acumulada de la cuenca  $A$ . Siendo  $\kappa$  el coeficiente y  $\varphi$  el exponente según la expresión:

$$Q_b = \kappa \cdot \Lambda^\varphi$$

- Relación entre el ancho de la sección transversal a sección llena  $w_b$  y el caudal a sección llena  $Q_b$ . Siendo  $c_1$  el coeficiente y  $\varepsilon_1$  el exponente según la expresión:

$$w_b = c_1 \cdot Q_b^{\varepsilon_1}$$

- Relación entre el ancho de la sección transversal  $w$  y el caudal  $Q$ . Siendo  $c_2^{(*)}$  el coeficiente y  $\varepsilon_2$  el exponente según la expresión:

$$w_t = c_2 \cdot Q_t^{\varepsilon_2}$$

(\*): En la expresión anterior, no es necesario estimar un valor para el coeficiente  $c_2$ , al estar completamente determinado en función del caudal a banca llena y del ancho de la sección dominante. En efecto, si  $Q_t = Q_b$ :  $w = w_b$ ,  $\therefore c_2 = w_b \cdot Q_b^{-\varepsilon_2}$

- Relación entre el diámetro característico del sedimento  $d$ , la pendiente del cauce  $s_0$  y el calado  $y$ . Siendo  $c_d$  el coeficiente y  $\theta$  el exponente, según la expresión:

$$d = c_d \cdot (y s_0)^\theta$$

- Relación entre el coeficiente de rugosidad  $n$  y el diámetro característico del sedimento  $d$ . Siendo  $c_n$  el coeficiente y  $\xi$  el exponente según la expresión:

$$n = c_n \cdot d^\xi$$

### 3.6.5.- La rugosidad del cauce

En la hidráulica fluvial se utilizan distintas expresiones para obtener la rugosidad en función de un tamaño representativo del material del lecho. Para la rugosidad, se tienen un buen número de ecuaciones que la relacionan con el diámetro del sedimento o con la rugosidad relativa. Algunas de ellas son:

$$n = 0.0477 d_{50}^{1/6} \quad \text{Strickler (1924)}$$

$$n = \frac{0.113 R^{1/6}}{(1.16 + 2 \log(R/d_{84}))} \quad \text{Limerinos (1970)}$$

$$\left( \frac{8}{\sqrt{f}} \right)^{1/2} = 5.75 \log \left( \frac{aR}{3.5 d_{84}} \right) \quad \text{Hey (1979) para ríos con lecho de grava}$$

Otra forma de obtener el valor de  $n$  es utilizando expresiones que representan la pendiente de cuasi-equilibrio dinámico del perfil del cauce en función del diámetro y área drenada (Hack, 1957).

$$\begin{aligned} S &= 18 d_{50}^{0.6} / \Lambda \\ d_{50} &= (S \Lambda / 18)^{5/3} \\ n &= 0.008 (S \Lambda)^{0.277} \end{aligned}$$

Otras investigaciones realizadas por diferentes autores presentan resultados para la pendiente en función del caudal y del diámetro del sedimento. Bray (1979) para ríos con lecho de grava en Alberta propone:

$$S = 0.095 d_{50}^{0.586} Q^{-0.33} ; d_{50} = 55.46 S^{1.706} Q^{0.56} ; n \approx (S^{0.284} \Lambda^{0.094})$$

Mientras que Pickup y Warner en ríos tropicales proponen:

$$S = 0.0132d_{95}^{0.425} Q^{-0.584} ; d_{95} = 26100S^{2.35} Q^{1.37} ; n \approx (S^{0.392} \Lambda^{0.228})$$

El diámetro de las partículas que no son transportadas por el flujo y la rugosidad que ellas proveen, pueden calcularse a partir del esfuerzo cortante crítico en el lecho. Church (1978) encontró que la relación entre esfuerzo cortante y diámetro de la partícula para partículas mayores de 7 mm era diferente a la relación de Shields y recomienda la utilización de una ecuación simplificada. Esta ecuación es recomendada por Graf (1988) para partículas relativamente grandes:

$$\tau_c = 1.78d ; d = 5.5y_s$$

Otra función, que según Graf cubre un amplio rango de datos precedentes de varios ambientes y que incluye un amplio rango de partículas, es la ecuación de Baker y Ritter (1975) recalculada por Williams (1984):

$$\tau_c = 0.030d^{1.49}$$

Reemplazando en la expresión propuesta por Strickler se obtiene:

$$n = 0.0776(y_s)^{1/6}$$

Como conclusión de los distintos casos analizados sobre la variación de la rugosidad con la posición e incluso con el flujo, se puede proponer la siguiente ecuación general para la rugosidad:

$$n = \Omega \cdot \Lambda^{\sigma_1} y^{\sigma_2} S^{\sigma_3}$$

Esta ecuación puede representar adecuadamente todos los casos analizados. El valor del coeficiente y los exponentes dependen de cada caso en particular, pueden ser regionalizados y en la práctica se determinan con el criterio experto del analista.

En la deducción del método de la OCG es posible asumir según Vélez (2001):

$$\sigma_1=0.0; \quad \sigma_2=\xi \theta ; \quad \sigma_3=\sigma_2 \quad \text{y} \quad \Omega = c_d^{\xi} \cdot c_n$$

Por lo que la expresión general para el modelo TETIS sería:

$$n = c_n c_d^{\xi} \cdot y^{\xi\theta} S^{\xi\theta}$$

### 3.6.6.- La velocidad del flujo

En la literatura hidráulica se tienen distintas expresiones que relacionan la velocidad del flujo con el radio hidráulico de la sección  $R$ , la pendiente de la línea de energía  $s$  y los diferentes coeficientes empíricos de rugosidad o de resistencia al flujo. Las más comunes son:

i) La ecuación análoga a la ecuación de Chezy y obtenida de la ecuación de Darcy Weisbach:

$$v = \sqrt{(8g/f)Rs}$$

ii) La ecuación de Manning:

$$v = \frac{R^{2/3} s_0^{1/2}}{n}$$

Si se supone que el canal es suficientemente ancho, entonces:  $R_t = A_t / w_t$ . Por lo que reemplazando, por ejemplo en la ecuación de Manning, se tiene:

$$v_t = \frac{(A_t / w_t)^{2/3} s_0^{1/2}}{n}$$

En el caso de tener información adecuada de la pendiente, del coeficiente de rugosidad y de la geometría del cauce, se podría configurar una expresión para estimar el área en función del caudal. Reemplazando en la ecuación anterior las expresiones para el ancho de la sección y el coeficiente de rugosidad, obtenidas a partir de las relaciones geomorfológicas y de la geometría hidráulica, y reordenando se obtiene:

$$v_t = \left[ \frac{A_t^{(2/3-\xi\theta)(1-\varepsilon_2)} s_0^{(1/2-\xi\theta)}}{c_n c_d^\xi \cdot (c_1 \kappa^{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)} \Lambda^{\varphi(\varepsilon_1-\varepsilon_2)})^{(2/3-\xi\theta)}} \right]^{\frac{1}{(1+\varepsilon_2)(2/3-\xi\theta)}}$$

La ecuación anterior se puede simplificar en la forma:

$$v_t = \left[ \frac{A_t^{ey \cdot (1-\varepsilon_2)} s_0^{(ey-1/6)}}{c_n c_d^\xi \cdot (c_1 \kappa^{(\varepsilon_1-\varepsilon_2)} \Lambda^{\varphi(\varepsilon_1-\varepsilon_2)})^{ey}} \right]^{ez}$$

Donde:

$$ey = \frac{2}{3} - \xi\theta$$

$$ez = \frac{1}{1 + ey \cdot \varepsilon_2}$$

O en síntesis:

$$v_t = K_a \cdot A_t^{\varpi 1} \cdot \Lambda^{\varpi 2} \cdot s_0^{\varpi 3}$$

Donde las expresiones para el coeficiente  $K_a$  y los exponentes del área de la sección de flujo, del área drenada de la cuenca y de la pendiente del tramo de interés son:

$$K_a = (c_n \cdot c_d^\xi \cdot c_1^{ey} \cdot \kappa^{ey(\varepsilon_1-\varepsilon_2)})^{-ez} \rightarrow f(\text{todos los parámetros})$$

$$\varpi 1 = ey \cdot ez \cdot (1 - \varepsilon_2) \rightarrow f(\xi\theta, \varepsilon_2)$$

$$\varpi 2 = -ez \cdot ey \cdot \varphi \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \rightarrow f(\varphi, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \xi\theta)$$

$$\varpi 3 = ez \cdot (ey - 1/6) \rightarrow f(\xi\theta, \varepsilon_2)$$

Estas expresiones indican que a nivel regional y en las condiciones en que son válidas, es posible hacer una estimación aproximada, razonable y representativa de los parámetros de flujo para cualquier sitio de la cuenca a partir de las relaciones geomorfológicas.

### 3.6.7.- La ecuación de Continuidad en la Formulación de la “Onda Cinemática Geomorfológica”

La simplificación de la onda cinemática suponen que durante todo el periodo  $\Delta t$  y a lo largo de todo el trayecto  $\Delta x$  la pendiente de la línea de energía es igual a la pendiente del terreno ( $s=s_0$ ). O sea, que la velocidad y la profundidad del flujo se relacionan mediante una expresión de flujo uniforme como la ecuación de Manning.

La ecuación de continuidad puede plantearse de la siguiente manera:

$$S_t - S_{t-1} = \sum_j I_{j,t} - O_t$$

donde  $S$  es volumen en el cauce,  $I$  son los volúmenes de entrada en el intervalo de tiempo (escorrentía directa, fusión de nieve y/o caudal desde la celda de aguas arriba de la celda  $j$ ) y  $O$  representa el volumen de salida hacia la celda receptora de aguas abajo.

Se supone que el flujo no está controlado aguas abajo y por lo tanto el volumen que se entrega aguas abajo  $O_t$  depende únicamente de la variable de estado  $S_t$ . El canal es prismático, o sea que la sección no cambia en toda la longitud del elemento y el almacenamiento en el cauce de la celda es constante en toda la longitud. Por tanto, reemplazando en la ecuación de continuidad se obtiene:

$$A_t \Delta x - S_{t-1} = \sum_j I_{j,t} - A_t v_t \Delta t$$

Esta ecuación se puede obtener en función del caudal y el área de la sección:

$$A_t \Delta x + Q_t \Delta t = \sum_j I_{j,t} + S_{t-1}$$

En la realidad esta ecuación no es lineal, ya que  $A_t$  y  $Q_t$  no son independientes. En el subapartado anterior se mostró como utilizando los elementos de la geometría hidráulica en la ecuación de Manning se obtiene una expresión para la velocidad en función del área de la sección, el área de la cuenca drenada y la pendiente del terreno. Aplicando estas expresiones en la ecuación de continuidad se obtiene:

$$A_t (\Delta x + K_a \cdot A_t^{\sigma_1} \cdot \Lambda^{\sigma_2} \cdot s^{\sigma_3} \cdot \Delta t) = \sum_j I_{j,t} + S_{t-1}$$

$$A_t + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot K_a \cdot A_t^{\sigma_1+1} \cdot \Lambda^{\sigma_2} \cdot s^{\sigma_3} = \frac{1}{\Delta x} \left( \sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right)$$

Reduciendo la expresión anterior se obtiene:

$$A_t + B \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot A_t^{\sigma_1+1} = \frac{1}{\Delta x} \cdot C$$

Donde:

$$B = K_a \cdot \Lambda^{\sigma_2} \cdot s^{\sigma_3}$$

$$C = \left( \sum_j I_{j,t} + S_{t-1} \right)$$

Este sistema resultante es una ecuación no lineal que puede resolverse numéricamente. El coeficiente  $B$  y el exponente  $ea$  dependen de las características geomorfológicas regionales y son válidos para toda la región, ya que son independientes de las características locales del sitio de análisis y del tiempo. El término independiente  $C$  es variable en cada sitio de la cuenca y en cada tiempo.

La ecuación resultante se puede resolver iterativamente para  $A_t$  por el método de Newton Raphson si se expresa en la forma:

$$f(A_t) = 0$$

$$f(A_t) = \frac{1}{\Delta x} \cdot (C - B \cdot \Delta t \cdot A_t^{ea+1}) - A_t = 0$$

La solución iterativa por el método de Newton Raphson para esta función es del tipo:

$$A_{t(n+1)} = A_{t(n)} - \frac{f(A_{t(n)})}{f'(A_{t(n)})}$$

$f'(A_t)$  es la primera derivada de la función  $f(A_t)$ , la cual se puede expresar como:

$$f'(A_t) = -(ea + 1) \cdot B \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot A_t^{ea} - 1$$

Reemplazando se tiene:

$$A_{t(n+1)} = A_{t(n)} + \frac{\frac{1}{\Delta x} \cdot (C - B \cdot \Delta t \cdot A_{t(n)}^{ea+1}) - A_{t(n)}}{(ea + 1) \cdot B \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot A_{t(n)}^{ea} + 1}$$

Una vez encontrada la solución iterativa, se puede calcular la velocidad de flujo y el caudal de salida para el cauce de la celda como:

$$v_t = A_t^{ea} \cdot B$$

$$Q_t = A_t^{ea+1} \cdot B$$

Para el primer  $\Delta t$ , los cálculos se inicializan en todas las celdas de la cuenca asumiendo en la ecuación anterior para la velocidad un valor inicial arbitrario de 1 m/s:

$$A_{t(0)} = B^{-\frac{1}{ea}}$$

Para un  $\Delta t$  cualquiera, el cálculo se inicializa con el  $A_t$  obtenido en el paso de tiempo anterior.

El factor corrector  $FC_9$  empleado en el modelo TETIS multiplica directamente la velocidad de la onda y por lo tanto debe ser cercano a uno, de no ser así se recomienda revisar el ajuste de los parámetros geomorfológicos estimados para la cuenca, o en su defecto utilizar los coeficientes recomendados en la literatura técnica para estudios geomorfológicos regionales a nivel mundial.

Este factor corrector no afecta el volumen del hidrograma, interviene directamente en la velocidad del flujo, es decir, valores del factor corrector mayores a uno implican un

aumento en la velocidad y por lo tanto respuestas más rápidas, lo cual se traduce en caudales punta mayores, recesiones más fuertes y un adelanto en el tiempo al pico. Así mismo, factores correctores menores a uno indican una disminución de la velocidad en los cauces, por lo tanto se produce un retraso en el hidrograma de salida con valores menores de caudal punta y un tiempo al pico mayor.

En conclusión, definiendo para cada región geomorfológicamente homogénea los valores de los exponentes y coeficientes geomorfológicos, utilizando la información del MED de la cuenca que permite conocer en cada celda de la red de drenaje el área de cuenca que drena a través de ella,  $A$ , al igual que su pendiente  $s_0$  y conociendo los valores de ingreso de esorrentía se puede obtener numéricamente el valor de  $A_t$ .

Una vez conocida el área se procede a la estimación de la velocidad según lo indicado anteriormente y entonces es posible estimar el flujo circulante en cada instante para todas las celdas.

## **4.- CAPAS DE INFORMACIÓN, PARÁMETROS Y FACTORES CORRECTORES**

Con el fin de dar un poco de claridad a la información, los parámetros y a los factores correctores incluidos dentro del modelo TETIS, se presenta a continuación un desglose de los principales aspectos a tener en cuenta en cada uno de ellos.

### **4.1.- INFORMACIÓN BÁSICA**

La información básica se trata de aquella que proviene del modelo digital de elevación del terreno MED, y de la cual se pueden obtener los siguientes mapas:

- Mapa con las direcciones de drenaje, para establecer las conectividades entre las diferentes celdas.
- Área de drenaje acumulada en cada celda. Se requiere para la estimación de la velocidad y el área del flujo en la metodología de traslación por medio de la OCG.
- Mapa de pendientes, necesario para estimar la velocidad superficial de la escorrentía y para determinar la velocidad y el área del flujo mediante la metodología de la OCG
- Altura sobre el nivel del mar, es necesaria para la interpolación de la precipitación, la temperatura y de la altura de agua equivalente de nieve en cada celda.
- Mapa de la zona cubierta con nieve en el instante inicial de la simulación.

La información del episodio de lluvia también es considerada como básica, ella debe incluir las series temporales de lluvia, volúmenes y niveles de embalses, caudales de salida en los embalses, caudales en las estaciones de aforo, evapotranspiración, altura equivalente de agua, temperatura y aportes o retenciones de caudal.

Finalmente, toda la información relacionada con los embalses y sus curvas características es también necesaria para poder realizar los cálculos.

### **4.2.- ESTIMACIÓN PREVIA DE PARÁMETROS**

Los parámetros del modelo tienen que ser estimados previamente y, por lo tanto, pueden tratarse como información disponible. Básicamente se trata de los parámetros del suelo, de la cubierta vegetal, de los parámetros geomorfológicos con validez regional y de los parámetros de la fusión de nieve.

#### **4.2.1.- Parámetros del suelo, cubierta vegetal y zonas de riego**

Con base en información de topología, usos de suelo, litología y geología se obtienen tres mapas con las características del suelo, representadas por:

- Almacenamiento estático  $H_u$ . Incluye la capacidad de almacenamiento capilar del suelo y las abstracciones iniciales.
- Permeabilidad superficial o conductividad hidráulica saturada del suelo  $k_s$ . Para involucrar la infiltración y el interflujo.

- Conductividad hidráulica horizontal saturada del suelo  $k_{ss}$ . Para involucrar el interflujo.
- Capacidad de percolación o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso  $k_p$ . Pretende incluir el proceso de percolación, las pérdidas subterráneas y el flujo base.
- Conductividad hidráulica horizontal saturada del estrato rocoso  $k_{sa}$ . Pretende incluir el proceso del movimiento del flujo base.
- Capacidad de percolación profunda o conductividad hidráulica saturada del estrato rocoso  $k_{ps}$ . Pretende incluir el proceso de las pérdidas subterráneas.
- Velocidad del flujo superficial en ladera  $v_t$
- Contenido óptimo de humedad en el suelo ( $\theta^*$ )
- Tipo de cubierta vegetal y su factor de vegetación a lo largo del año  $\lambda_v$ .
- Mapa con índices de Zonas de riego

Estos mapas deben tener la misma resolución espacial que el modelo digital del terreno.

#### 4.2.2.- Parámetros geomorfológicos

El modelo TETIS emplea nueve parámetros geomorfológicos según las siguientes relaciones geomorfológicas de tipo potencial entre:

- Área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena:  $\Lambda = \kappa \cdot Q_b^\varphi$
- Ancho de la sección transversal a sección llena y el caudal a sección llena:  $w_b = c_1 \cdot Q_b^{\varepsilon_1}$
- Ancho de la sección transversal y el caudal:  $w_t = Q_t^{\varepsilon_2}$
- Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo:  $d = c_d \cdot (ys_o)^\theta$
- Coeficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento:  $n = c_n \cdot d^\xi$

En donde  $\kappa$ ,  $c_1$ ,  $c_d$ , y  $c_n$  son los coeficientes y  $\varphi$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\theta$  y  $\xi$  corresponden a los exponentes. Estos coeficientes y exponentes se pueden estimar a partir de un estudio geomorfológico por regiones homogéneas de la evolución de las características hidráulicas a lo largo de la red de drenaje.

Por tratarse de parámetros que sólo se actualizan cuando se dispone de nueva información geomorfológica, también se pueden considerar como datos.

En caso de no disponer de un estudio geomorfológico en las distintas regiones homogéneas se pueden utilizar los valores medios recomendados en la literatura:

- Área acumulada de la cuenca y caudal a sección llena:  $\Lambda = 0.6 \cdot Q_b^{0.75}$
- Ancho de la sección a sección llena y el caudal a sección llena:  $w_b = 3.26 \cdot Q_b^{0.5}$
- Ancho de la sección transversal y el caudal:  $w = Q^{0.2}$

- Diámetro del sedimento, la pendiente y la profundidad del flujo:  $d = 20 \cdot (y s_o)^{1.25}$
- Coeficiente de rugosidad y el diámetro del sedimento:  $n = 0.047 \cdot d^{1/6}$

#### 4.2.3.- Parámetros de fusión nieve

La calibración de un modelo tipo índice de temperatura se realiza empleando la técnica de ensayo y error a los parámetros: Temperatura base  $T_b$ , coeficiente de fusión  $M_f$  incluyendo la lluvia y coeficiente de fusión sin lluvia. Si no se dispone de información sobre estos parámetros se pueden emplear los valores indicados en la literatura.

Estos tres parámetros son de carácter global, es decir, afectan del mismo modo a todas las celdas en todo el intervalo temporal.

#### 4.2.4.- Mapas tipo índice

Los mapas tipo índice sólo son necesarios cuando el respectivo proceso asociado ha sido incluido en el análisis, de tal forma que los mapas que requieren son:

- Mapa de índices de Regiones homogéneas, se emplean estos índices para indicar las diferentes regiones homogéneas incluidas en la cuenca y necesarias para el cálculo de la traslación del flujo mediante la OCG.
- Mapa de índices de cobertura vegetal, el cual es necesario cuando se desea incluir la variabilidad temporal en la estimación de la Evapotranspiración.
- Mapa de índices de Regadío, encargao de señalar las diferentes zonas con riego. Cada índice indica la presencia de un tipo de riego diferente en la cuenca.

Estos mapas deben tener la misma resolución espacial que el modelo digital del terreno.

### 4.3.- FACTORES CORRECTORES

El modelo de producción y el modelo de traslación presentados en TETIS incluyen unos factores correctores que corrigen de forma global los diferentes parámetros, permitiendo una calibración (manual o automática) rápida y ágil de los diferentes procesos representados, aprovechando la información utilizada en su estimación previa.

Estos factores correctores tratan de corregir los errores siguientes:

- De estimación inicial de los parámetros
- En la información hidrometeorológica de entrada al modelo
- En el propio modelo
- Efectos de escala espacio-temporal

Los factores correctores que afectan directamente la producción de escorrentía son:

- $FC_1$ . Almacenamiento estático
- $FC_2$ . Evapotranspiración
- $FC_3$ . Infiltración

- $FC_4$ . Escorrentía directa
- $FC_5$ . Percolación
- $FC_6$ . Interflujo
- $FC_7$ . Pérdidas subterráneas
- $FC_8$ . Flujo base

Para la traslación de la onda cinemática geomorfológica se emplea un factor corrector para la velocidad de la onda,  $FC_9$ .

#### **4.4.- INICIACIÓN DE LAS VARIABLES DE ESTADO**

El estado al inicio del proceso de simulación en cada uno de los posibles almacenamientos dentro de un modelo hidrológico, es la variable que presenta una incertidumbre mayor y que, en muchas ocasiones, su mala estimación distorsiona gravemente los resultados de la simulación. Además, en un modelo distribuido hay que resolver el problema de la asignación de un valor a cada una de las celdas en las que se descompone la cuenca.

Las variables de estado que necesitan su inicialización son las siguientes:

##### **4.4.1.- Tanques del suelo**

El estado inicial de los cuatro tanques que representan los distintos almacenamientos del suelo se resuelve utilizando la división en regiones geomorfológicamente homogéneas para asignar valores iniciales distintos si es necesario. Este valor, común para cada tanque dentro de una región, se asigna de la siguiente forma:

- $H_1$ . El almacenamiento estático, que está dado como un porcentaje de su capacidad máxima.
- $H_2$ . El almacenamiento superficial, como una cantidad de agua disponible, normalmente nula o muy baja.
- $H_3$ . El almacenamiento gravitacional, está dado como una cantidad de agua disponible desde el inicio del episodio.
- $H_4$ . Estado inicial del acuífero, está dado como una cantidad de agua al inicio del evento.
- $H_5$ . Estado inicial de cárcavas y cauces, está dado como un porcentaje del caudal a sección llena
- $H_6$ . Estado inicial del tanque de intercepción, está dado como un porcentaje del valor máximo de almacenamiento
- $H_0$ . Estado inicial del tanque de nieve, está dado como un altura equivalente de agua.

##### **4.4.2.- Cauces**

En el caso de los cauces, presentes en todas las celdas, el almacenamiento inicial que va a determinar el caudal circulante inicial  $H_5$ , se introduce como un porcentaje del caudal a sección llena. El porcentaje puede ser mayor del 100%, y en este caso se estaría indicando una situación de desbordamiento generalizado en toda la red de cauces.

El caudal a sección llena es obtenido a partir de las relaciones geomorfológicas que se utilizan en la OCG.

#### **4.4.3.- Tanque de nieve**

El tratamiento del almacenamiento inicial en el tanque de nieve de cada celda es más detallado. Como se ha visto al describir los métodos de interpolación espacial, son necesarios los siguientes elementos:

- El valor de la altura de agua equivalente en alguna estación, para poder interpolar en el espacio.
- Estimar para ese momento el parámetro  $\beta$  de correlación con la altura.
- Contorno de la capa de nieve, para limitar el área de interpolación.

## **5.- CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA CON TETIS**

### **5.1.- CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO**

Según Beven (2000) la calibración de un modelo tiene las mismas características de un ajuste por regresión múltiple, en donde los parámetros óptimos serán tales que minimicen los errores residuales, pero si hay residuales implica que existe incertidumbre en el modelo calibrado. De la misma forma que en una regresión, durante la validación estas incertidumbres son mayores a medida que las condiciones son más extremas o distintas a las empleadas durante la calibración.

Beven (1989) indica que se requieren registros lo suficientemente largos, los cuales no siempre se encuentran disponibles. Además, la calibración se debe realizar bajo un punto de vista físico para interpretar adecuadamente los parámetros y darle una correcta interpretación a la variabilidad espacial.

La calidad en los resultados de salida de un modelo conceptual lluvia-escorrentía depende de la calidad de los datos de entrada, de la estructura del modelo y del proceso de calibración, (Sorooshian et al., 1993; Madsen, 2000 y Lidén y Harlin, 2000). Así mismo, los modelos conceptuales tienen una gran capacidad de compensación de los errores en los datos de entrada y son difíciles de calibrar porque han sido creados para unas condiciones muy específicas.

Para realizar la calibración automática en modelo conceptuales lluvia-escorrentía se debe tener en cuenta el tipo de información que emplea el modelo, analizando la calidad y su proceso de obtención, para hacerla compatible con el modelo. Todo esto conlleva a entender el tipo de información de entrada para observar los resultados que se genera con la calibración y analizarlos correctamente.

Los elementos que pueden ser calibrados manual o automáticamente en TETIS son:

- Los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía.
- Los valores iniciales de las variables de estado de almacenamiento.
- Los coeficientes de correlación con la altura para la interpolación espacial.
- Los parámetros agregados del submodelo de nieve

La calibración automática puede realizarse de todos o de un subconjunto de los elementos anteriores.

### **5.2.- LA CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA**

Duan et al. (1992) y Beven (2000) señalan los principales problemas que afectan a los algoritmos automáticos de calibración de parámetros son:

- Múltiples regiones de atracción, donde el óptimo encontrado depende del valor inicial.
- Óptimo local menor, cuando existen pequeños fosos en la superficie de respuesta.

- Rugosidad en la superficie de respuesta, en donde existen singularidades, puntos con derivadas discontinuas.
- Sensibilidad, en donde hay pobre sensibilidad del modelo a los parámetros en la vecindad de un óptimo. Una sensibilidad variable entre los parámetros y una interacción no lineal entre ellos.
- Zonas planas, que indican insensibilidad del modelo.
- Zonas de igual valor de la función objetivo con diferentes parámetros.
- Forma, la superficie es no convexa y contiene riscos largos y curvos.
- Emplean mucho tiempo.
- Dependen de la función objetivo seleccionada

Gan y Burges (1990) mencionan que como criterio de convergencia en los procesos iterativos es más eficiente si se emplea el balance de masa. Una inadecuada elección del criterio de convergencia y una relajación pueden causar errores de balance que limiten el esquema numérico. Sugieren que no existe un esquema universal y válido para calibrar un modelo conceptual siguiendo procedimientos manuales o automáticos. Además recomiendan como algoritmo de optimización aquellos que emplean patrones de búsqueda directa, por considerarlos más robustos. Sorooshian et al. (1993) señalan que los modelos conceptuales lluvia escorrentía son difíciles de calibrar mediante metodologías automáticas.

Gan y Burges (1990) y Gan y Biftu (1996) mencionan que los algoritmos de calibración automática para obtener buenos parámetros dependen de:

- Estructura y base conceptual del modelo.
- Potencia y robustez del algoritmo de optimización.
- Calidad y cantidad de datos usados en calibración y validación.
- El criterio de estimación y función objetivo empleada durante la optimización

El criterio de convergencia en los diferentes métodos de optimización conlleva a diferentes tiempos de ejecución, lo cual influye en la medición de su comportamiento (Thyer et al., 1999). El rendimiento de un algoritmo de optimización está definido por:

- **Robustez.** Es la probabilidad de encontrar el mismo óptimo partiendo de varios ensayos diferentes.
- **Eficiencia.** Número de evaluaciones de la función en cada algoritmo para lograr la convergencia hacia el óptimo.
- **Efectividad.** Que tan cerca al óptimo global llega el algoritmo.

Los procedimientos automáticos de calibración, requieren de una región inicial de los parámetros (valores factibles, que suelen ser de cuencas vecinas o regiones climatológica o hidrológicamente parecidas), Boyle et al., (2000).

Toth et al. (2000) emplean dos procesos de calibración:

- **Calibración “Split-Sample”.** El número de eventos es dividido en dos partes, una para calibración o entrenamiento y la segunda para la validación, siendo la longitud del período de calibración el doble que en validación

- **Calibración adaptativa.** No existe una base de datos y se emplean los valores observados disponibles (pero recientes). En la medida que se disponga de un mayor número de datos se puede realizar una recalibración en línea “on-line”.

Los métodos de búsqueda global son más populares, entre ellos se destacan según Madsen (2000) los algoritmos genéticos y el “Shuffled Complex Evolution – University of Arizona”, por sus siglas en inglés es conocido como SCE-UA. Sorooshian et al. (1993) realizan una comparación entre el MultiStart Simplex, MSX” y el SCE-UA destacando que éste último se comporta mejor porque los parámetros obtenidos se encuentran más agrupados, se requiere de un número de evaluaciones de la función objetivo menor y los criterios de estimación son más bajos. Gan y Biftu (1996) mencionan que el SCE-UA es ideal para ser operados por usuarios que no conocen el modelo, a pesar de ser más ineficiente a nivel computacional que el modelo Simplex, pero el Simplex requiere de un proceso por etapas y la compañía de un usuario experto y es más ineficiente a nivel computacional mientras que el SCE-UA obtiene resultados en una sola ejecución.

Aunque un criterio de un sólo objetivo en la aproximación de calibración automática suministra un conjunto de parámetros aceptable, puede llegar a ser irreal. Un sólo criterio dentro de un proceso automático de calibración puede degenerar en “un ajuste a una curva”, es decir, se obtiene un óptimo pero hidrológicamente irreal, (Peck, 1976; citado por Boyle et al., 2000).

El *MOCOM-UA* es el algoritmo de optimización multiobjetivo que estima el conjunto de Pareto de forma eficiente basándose en el método del SCE-UA (Boyle *et al.*, 2000). La característica dominante del *MOCOM-UA* es que la solución no es única. Cuando se cambia de una solución a otra, el resultado es la mejora en una función objetivo, pero existe deterioro de al menos otra función (Yapo *et al.*, 1998).

Yapo *et al.* (1998) presentan una aplicación sobre la cuenca del río Leaf de 1.950 km<sup>2</sup> en Mississipi, Estados Unidos Emplean 40 años de datos y el modelo *Sacramento* que tiene 13 parámetros. Como criterio utilizaron una función multiobjetivo. Emplearon el *MOCOM-UA* encontrando resultados satisfactorios. Sin embargo, al tratarse métodos multiobjetivo se están incluyendo más variables al método de optimización.

El modelo TETIS ha seleccionado al método del SCE-UA para realizar la calibración automática. A continuación se explica brevemente el método.

### 5.3.- MÉTODO DEL SCE-UA

Método desarrollado en la Universidad de Arizona que es robusto y eficiente para la calibración de modelos lluvia-escorrentía, (Eckhardt y Arnold, 2001; Madsen, 2000; Thyer et al., 1999; Boyle et al., 2000; Yapo et al., 1998; Gan y Biftu, 1996; Duan et al., 1994 y Sorooshian et al., 1993).

Una descripción general del método se observa en Duan et al. (1994), quienes destacan los pasos a seguir:

- 1) Generar una muestra de  $s$  puntos aleatorios en el espacio factible y calcular el valor de la función objetivo en cada punto. Si no hay información previa sobre el máximo, entonces utilizar una distribución de probabilidad uniforme para generar la muestra.
- 2) Clasificar los puntos. Ordenar los  $s$  puntos en orden decreciente (primero el más pequeño) asumiendo que la meta es minimizar la función objetivo.

- 3) Partición en complejos. Dividir los  $s$  puntos en  $p$  complejos, de modo que cada uno contenga  $m$  puntos. El primer complejo contiene los  $p(k-1)+1$  clasificados y el segundo complejo contiene los  $p(k-1)+2$  clasificados, y así sucesivamente para los valores de  $k=1, \dots, m$ .
- 4) Evolución de un complejo. Evolución de cada complejo de acuerdo a un algoritmo de evolución competitiva de complejos, "Complex Competitive Evolution, CCE". El algoritmo CCE está basado en el procedimiento propuesto por Nelder y Mead desarrollado en 1965 para generar descendencia. El CCE utiliza el método Simplex de búsqueda hacia abajo combinado con la búsqueda aleatoria propuesta por Price en 1987 y la evolución competitiva sugerida por Holland en 1975. El método Simplex se puede resumir según Duan et al. (1994) en los siguientes pasos:
  - a) Construir un subcomplejo de forma aleatoria, seleccionando  $q$  puntos de una distribución de probabilidad trapezoidal. El mejor punto (con el mayor valor de la función) tiene la mayor oportunidad de ser elegido para formar un subcomplejo y el peor punto tiene una probabilidad menor.
  - b) Identificar el peor punto del subcomplejo y calcular el centroide del subcomplejo sin incluir el punto más malo.
  - c) Intentar reflejar el peor punto a través del centroide. Si el nuevo punto generado está dentro del espacio factible, ir al siguiente paso, de lo contrario, aleatoriamente generar un punto dentro del espacio factible e ir al siguiente paso.
  - d) Si el nuevo punto generado es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto por el nuevo punto e ir al paso (g), de lo contrario ir al siguiente paso.
  - e) Intentar un paso de contracción, calculando un punto a medio camino entre el centroide y el peor punto. Si el punto de contracción es mejor que el peor punto, reemplace el peor punto por el de contracción y vaya al paso (g), de lo contrario ir al siguiente paso.
  - f) Aleatoriamente generar un punto dentro del espacio factible y reemplazar el peor punto por el punto generado aleatoriamente.
  - g) Repita los pasos (b)-(f)  $\alpha$  veces, donde  $\alpha \geq 1$  es el número de descendientes consecutivos generados por el mismo subcomplejo.
  - h) Repita los pasos (a)-(g)  $\beta$  veces, donde  $\beta \geq 1$  es el número de pasos de evolución tomado por cada complejo antes de que los complejos sean barajados.
- 5) Barajar los complejos. Combinar los puntos en los complejos evolucionados en una sola muestra, ordenar la muestra en orden creciente según la función objetivo y volver a hacer la repartición de la población en  $p$  complejos según el paso 3.
- 6) Chequear la convergencia. Si se satisfacen los criterios previamente establecidos de convergencia, se puede parar, de lo contrario seguir.
- 7) Chequear la reducción en el número de complejos. Si el mínimo número de complejos requerido en la población  $p_{min}$  es menor que  $p$ , eliminar el complejo con el rango más bajo en sus puntos. Hacer  $p=p-1$  y  $s=pm$ . Regresar al paso 4. Si  $p_{min}=p$  regresar al paso 4.

En el algoritmo CEE cada punto de un complejo es un “padre” potencial con la capacidad de participar en el proceso de reproducción de la descendencia. Duan et al. (1994) recomiendan  $m \geq 2$ ,  $m = 2n + 1$  donde  $n$  es el número de parámetros, también sugieren  $\alpha = 1$  y  $\beta = m$ . Destacan que  $q$  varía entre 2 y  $m$ , en donde  $q \approx n + 1$  y  $p_{min}$  debe encontrarse entre 1 y  $p$  recomendando  $p_{min} = p/2$ .

En la Figura 17 se puede observar de forma gráfica el proceso de evolución de complejos del SCE-UA, mientras que la Figura 18 muestra el proceso de evolución para un sólo complejo.

Una modificación a esta metodología es la propuesta por Sorooshian et al. (1993), quienes obtienen una reducción hasta de una tercera parte en las iteraciones. Además, concluyen que el SCE-UA se comporta satisfactoriamente durante la optimización de los parámetros del modelo Sacramento.

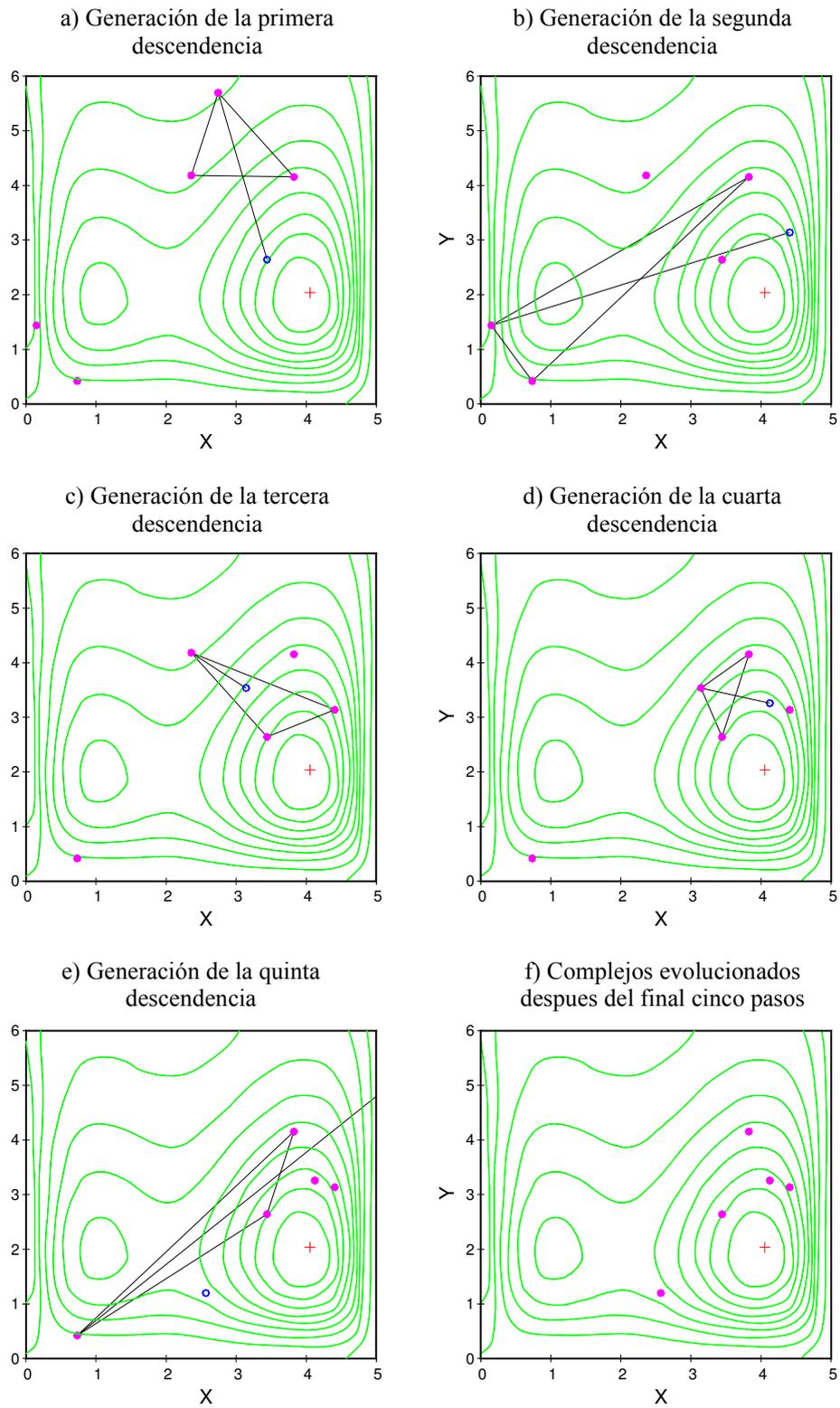


Figura 17. Ilustración del método de evolución y barajado de complejos, SCE-UA. (Gráfico tomado de Duan et al.; 1992).

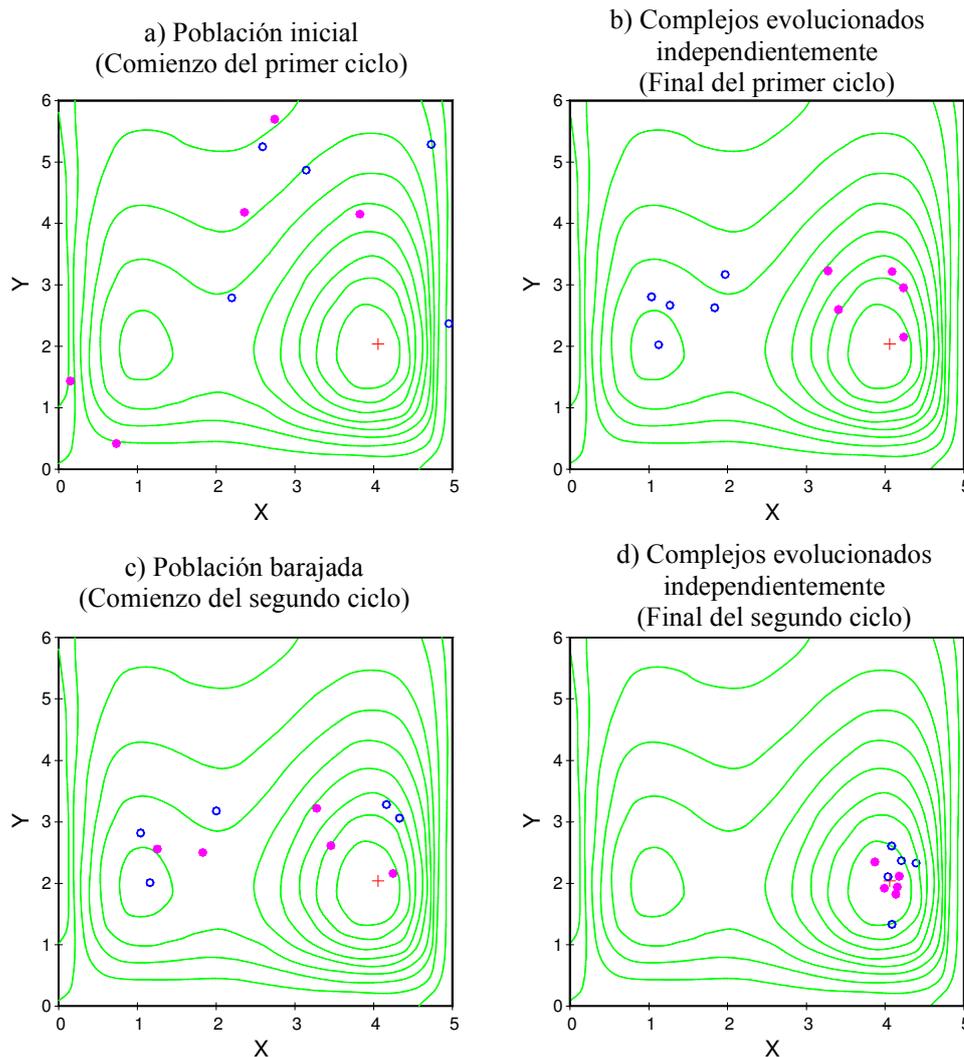


Figura 18. Ilustración de los pasos evolutivos realizados por cada complejo, ECC (Tomado de Duan et al.; 1992)

#### 5.4.- LA VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

La validación del modelo es el proceso de demostrar que se están simulando apropiadamente los procesos físicos dominantes en un sitio específico, siendo capaz de realizar predicciones que satisfagan los criterios de precisión previamente establecidos (Klemeš, 1988; Refsgaars y Knudsen, 1996; Senarath et al., 2000; Andersen et al., 2001).

Un principio fundamental en el proceso de validación es que el modelo debe ser validado para el mismo tipo de aplicaciones para el cual fue desarrollado (Klemeš, 1986). Además, los datos empleados durante validación deben ser distintos a los empleados durante la calibración.

La validación se realiza en escenarios distintos al de calibración. En el caso de un modelo hidrológico distribuido como TETIS, estos escenarios pueden ser:

- Validación temporal: en otro período de tiempo del mismo punto de calibración.

- Validación espacial: en otro punto de la cuenca y mismo período de tiempo de calibración.
- Validación espacio-temporal: en otro punto de la cuenca y período de tiempo distinto al de calibración.

Los esquemas para la validación de modelos de simulación hidrológica según Klemeš (1986) son:

- **“Split-Sample”-SS.** Es el método clásico, se utiliza cuando existen suficientes datos para la calibración y cuando las condiciones son estacionarias. El período de validación es similar al período de calibración y ambos deben arrojar resultados aceptables.
- **“Differential Split-Sample”-DSS.** Este método se emplea cuando un modelo se usa para simular flujos, niveles u otras variables en una cuenca aforada bajo condiciones diferentes de aquellas a los datos disponibles. Se realiza la calibración de la cuenca antes de que ocurra algún cambio. Se cambia el parámetro que refleja la modificación. La validación se realiza en un período posterior. Por ejemplo, se deben identificar dos registros históricos que reflejen un cambio, uno con registros mayores a la lluvia media y otro con datos bajos. Si el modelo pretende modelar los caudales para el período húmedo, entonces se debe calibrar en el período seco y validar en el período húmedo.
- **“Proxy Basin”-PB.** No permite calibración directa, se emplea cuando no se dispone de información suficiente para la calibración de la cuenca. Una calibración y validación previa son realizadas en dos cuencas pertenecientes a una región similar. Primero se calibra en una de ellas y se valida con la otra y luego se calibra la segunda y se valida con la primera, ambos resultados de validación deben ser satisfactorios para que se puedan transferir los parámetros a la cuenca no aforada.
- **“Proxy Basin”-PB-DSS.** Es la prueba más difícil para un modelo hidrológico, porque trata casos donde no se dispone de información alguna. No permite calibración directa y el modelo debe predecir bajo condiciones no estacionarias. La calibración se realiza en otra cuenca, luego se transfieren los parámetros a la cuenca no aforada y se seleccionan los parámetros antes y después del cambio. Se realiza la validación en ambos, tanto antes como después (es una combinación de los dos métodos anteriores).

Un problema común durante la validación de modelos hidrológicos distribuidos es que se dispone de buena información espacial de topografía, suelo y cobertura vegetal. Este tipo de datos espaciales rara vez pueden ser calibrados y validados. Por lo tanto, los modelos distribuidos generalmente son calibrados y validados sólo para los caudales observados, limitando su comportamiento.

Una limitación de los modelos de tipo conceptual según Gan y Burges (1990) es que no son “interpolativos” y no hay garantía que el modelo prediga exactamente un valor cuando se usa más allá del rango de calibración y de validación. Así mismo, se recomienda que un modelo sea probado en un rango dramáticamente diferente del empleado durante la calibración.

## 5.5.- CRITERIOS PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL MODELO

La precisión en la simulación o predicción está dada por la medida de las diferencias entre lo simulado o predicho y lo realmente observado. Estas diferencias pueden ser sistemáticas (que se repiten) o aleatorias (Lettenmaier y Wood, 1992). Una recopilación de criterios con los resultados obtenidos para diferentes modelos hidrológicos, puede consultarse en Ragab (1999).

Según Refsgaars y Knudsen (1996) los criterios principales para la evaluación del rendimiento de un modelo hidrológico se pueden describir así:

- Visualización conjunta de los hidrogramas observado y simulado
- Diagramas de dispersión de la escorrentía mensual
- Curvas de duración de flujos
- Diagramas de dispersión de descargas máximas anuales
- Balance general de agua
- Coeficientes de eficiencia

Lidén y Harlin (2000) mencionan que el riesgo de obtener un mal rendimiento en un modelo conceptual lluvia-escorrentía aumenta a medida que disminuye el estado de humedad inicial de la cuenca.

Los modelos más complejos no necesariamente son más confiables, no se ha podido demostrar que un modelo complejo arroje mejores resultados que un modelo simple. Esto es verdad siempre que la incertidumbre y los grados de libertad añadidos al modelo complejo no estén bien representados ni sean tenidos en cuenta dentro de la modelación.

Debe tenerse mucho cuidado con algunos de estos indicadores, puesto que confiabilidad y validez no son equivalentes y uno no implica el otro, es decir, aumentar el tamaño de una muestra no hace la estimación más precisa con respecto a la predicción, sólo hace que disminuya el error estándar. Es así como un modelo no puede ser estimado de forma confiable basándose en una muestra pequeña, pero obtener un muestra más larga no garantiza una predicción más precisa, (Duckstein et al., 1985).

Existen numerosos criterios para definir la función objetivo dentro del proceso de optimización automática. El modelo TETIS emplea como posibles criterios de optimización la raíz cuadrada del error medio, conocido por sus siglas en inglés como RMSE.

Aunque para el análisis de los resultados también se incluyen los siguientes criterios:

### 5.5.1.- Error en el volumen

Se obtiene de la siguiente forma:

$$\%errVol = \frac{V_o - \hat{V}_p}{V_o} \times 100\%$$

Siendo  $\hat{V}_p$  el volumen total simulado y  $V_o$  el volumen total observado. Valores positivos indican subestimación y valores negativos sobrestimación, siendo cero el valor deseado.

### 5.5.2.- Error cuadrático medio, *RMSE*

Es un medidor de eficiencia ampliamente usado:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_i - \hat{Q}_i)^2)}{n}}$$

Donde  $\hat{Q}_i$  el caudal simulado,  $Q_i$  el caudal observado y  $n$  es el número de observaciones. Este es el criterio empleado durante el proceso de calibración, el cual busca el valor mínimo posible del RMSE.

### 5.5.3.- El coeficiente de eficiencia, *NSE*

Se estima según la siguiente expresión:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2}$$

Siendo  $\bar{Q}_i$  el valor medio de los caudales observados. También es conocido como el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (1970). Este criterio es usado comúnmente para la evaluación de modelos dado que involucra estandarización de la varianza residual y su valor esperado no cambia con la longitud del registro o la magnitud de la escorrentía (Kachroo y Natale, 1992; citado en Kothiyari y Singh, 1999). Un perfecto ajuste sugiere un valor igual a uno, cuando el valor es cero indica que el modelo no es mejor si se compara con un modelo de una sola variable (por ejemplo un valor medio) y valores negativos indican que el modelo se comporta peor, (Beven, 2000).

El criterio para aceptar una calibración es muy subjetivo. En la literatura parece que es aceptable una calibración con un índice de Nash - Sutcliffe superior a 0,6, y se considera como excelente un valor superior a 0,8. Lógicamente, los criterios de ajuste en validación son peores que en calibración. Por ello, se considera en la literatura como aceptable un índice de Nash - Sutcliffe superior a 0,5, siendo muy buenas las validaciones por encima de 0,7. Moriasi et al., (2007) presenta una serie de índices y los rangos en los que estos se consideran como aceptables, buenos y muy buenos.

Hay la posibilidad también de calcular un índice de Nash – Sutcliffe como media pesada de los índices de Nash – Sutcliffe correspondientes a hasta 3 rangos de magnitud diferente de caudal (por ejemplo: caudales pequeños, medios y grandes) definidos escogiendo hasta un máximo de dos umbrales ( $Q^*$  y  $Q^{**}$ ).

El Nash promedio por rangos se obtiene siguiendo la siguiente expresión:

$$NSE_{\text{promedio}} = \frac{P_1 \cdot NSE_{\text{rango}_1} + P_2 \cdot NSE_{\text{rango}_2} + P_3 \cdot NSE_{\text{rango}_3}}{P_1 + P_2 + P_3}$$

Donde  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  [0;1] son los pesos para cada uno de los índices de Nash – Sutcliffe correspondientes a los rangos de caudales elegidos.

Los rangos de caudales se definen con base en hasta un máximo de 2 umbrales de manera que:

$$NSE_{rango\_1} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n1} (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{n1} (Q_i - \bar{Q}_i)^2}; \quad \forall Q_i \leq \alpha \quad \alpha = Q_i^*$$

$$NSE_{rango\_2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n1} (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{n1} (Q_i - \bar{Q}_i)^2}; \quad \forall \alpha < Q_i \leq \beta \quad \beta = Q_i^{**}$$

$$NSE_{rango\_3} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n1} (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{n1} (Q_i - \bar{Q}_i)^2}; \quad \forall Q_i > \beta$$

#### 5.5.4.- El estimador de máxima verosimilitud heteroescadástico, HMLE

El HMLE ha sido empleado por Yapo et al. (1996 y 1998) y Beven (2000):

$$HMLE(\Theta, \lambda) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i(\lambda) [Q_i - \hat{Q}_i(\Theta, Y)]^2}{\left[ \prod_{i=1}^n w_i(\lambda) \right]^{1/n}}$$

Siendo  $\hat{Q}_i(\Theta, Y)$  el valor simulado con las series temporales de entrada  $Y$  y el conjunto de parámetros  $\Theta$ , donde  $w_i$  es un factor de ponderación según el factor de forma  $\lambda$ . Se trata de un estimador de máxima verosimilitud bajo la hipótesis que los errores medidos están distribuidos normalmente con media cero pero tienen varianzas no estacionarias (heteroescadásticas),  $\sigma^2$  proporcional al flujo observado. La heteroescadasticidad o variabilidad en la varianza se debe fundamentalmente a la naturaleza no homogénea de los errores en los caudales (Brath y Rosso, 1993).

El criterio del RMSE tiende a enfatizar la minimización del error en el caudal punta, mientras que el HMLE tiende a suministrar un rendimiento más consistente a lo largo de todos los rangos (Yapo et al., 1996 y 1998).

#### 5.5.5.- El error gaussiano autocorrelacionado, AMLE

El AMLE asume que los errores siguen una distribución Gaussiana o normal, tienen varianzas constantes y están correlacionados en el tiempo. Según Beven (2000),  $\varepsilon_i(\phi)$  es el error del modelo empleando los parámetros  $\phi$ . Asumiendo que el error tiene la estructura de un modelo  $AR(n)$ , siendo  $\mu$  el error medio,  $\alpha_i$  el coeficiente de correlación para el desfase  $i$ , y  $\sigma$  la desviación típica. Para el caso de  $n=1$  se tiene:

$$AMLE(Q_t / \Theta, Y, \phi) = (2\pi\sigma^2)^{T/2} (1 - \alpha^2)^{1/2} \exp \left[ -\frac{1}{2\sigma^2} (1 - \alpha)(\varepsilon_t - \mu)^2 + \sum_{i=2}^T (\varepsilon_i - \mu - \alpha(\varepsilon_{i-1} - \mu)) \right]$$

Siendo  $T$  el número de pasos del tiempo durante la simulación. El exponente  $T/2$  puede ocasionar problemas, aunque si es muy grande se convierte en ventaja porque se acentúan

los picos de la función de verosimilitud. Beven (2000) resalta que HMLE da resultados muy diferentes a los obtenidos con coeficientes de eficiencia como el de Nash y Sutcliffe.

Resultados obtenidos por Sorooshian et al. (1983) resaltan que RMSE se desempeña mejor que AMLE y HMLE durante calibración pero no durante la validación del modelo Sacramento.

#### 5.5.6.- El error de los Logaritmos

$$Err\_Log = \sum_i^n (\log Q_i - \log \hat{Q}_i)^2 \quad \text{Expresión Provisional!}$$

## 6.- REFERENCIAS

- Andersen, J., Refsgaard, J. C. y Jensen, K. H., 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal river basin - model construction and validation. *Journal of Hydrology*, Vol. 247, p. 200-214.
- Anderson, M. G. y T. P. Burt. 1985. *Hydrological Forecasting*. John Wiley and Sons Ltd.
- Awwad, H. M.; J. B. Valdés y P. J. Restrepo. 1994. Streamflow Forecasting for Han River Basin, Korea. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol 120, N° 5, p 651-673,
- Awwad, H. M. y J. B. Valdés. 1992. Adaptive Parameter Estimation for Multisite Hydrologic Forecasting. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol 118, N° 9, p 1201-1221.
- Baker, V. R y D. F Ritter. 1975. Competence of rivers to transport coarse bedload material. *Bulletin of Geological Society of America*, 86: p 975 - 978.
- Bergman, M. J. y J. W. Delleur. 1985. Kalman filter estimation and prediction of daily stream flows: I. Review, algorithm, and simulation experiments. *Water Resources Bulletin*, vol 21, 5, p 815-825.
- Bergman, M. J. y J. W. Delleur. 1985. Kalman filter estimation and prediction of daily stream flows: II. Application to the Potomac river. *Water Resources Bulletin*, vol 21, 5, p 827-832.
- Beven, K. 1986. Runoff production and flood frequency in catchments of order n: An alternative approach. En: *Scale Problems in Hydrology*. Editado por: Gupta, V.K., I. Rodriguez-Iturbe y E.F. Wood. D. Reidel Publishing Company., p 107-131.
- Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, Vol. 105, p. 157-172.
- Beven, K. J. 1994. Process, heterogeneity and scale in modeling soil moisture fluxes. En: S. Sorooshian y V. K. Gupta. *Global environmental change and land surface process in Hydrology: The trials and tribulations of modeling and measuring*. Proc. NATO ARW, Tucson, Arizona. (Eds) (2).
- Beven, K. J., 2000. *Rainfall-runoff modelling. The Primer*. John Wiley and sons Ltd. Chichester, U.K.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V. y Sorooshian, S., 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic calibration. *Water Resources Research*, Vol. 36, N° 12, p. 3663-3674.
- Brath, Armando y Renzo Rosso. 1993. Adaptive calibration of a conceptual model for flash flood forecasting. *Water Resources Research*. Vol 29, 2, p 2561-2572.
- Bray, D.I. 1979. Estimating Average Velocity in Gravel - Bed Rivers. *Journal of Hydraulics Division, ASCE 105(HY9)*, p 1103 - 1122.
- Brush, L. M. 1961. Drainage Basins, channels and flow characteristics of selected streams in central Pennsylvania. *U. S. Geol. Surv. Prof.. Paper no. 282*.

- Chavasse, D. I. y R. S. Seoane. 1997. Asociación determinístico-estocástica para predicción de caudales. *Ingeniería del Agua*, N° 2, p 55-64.
- CHT (Confederación Hidrográfica del Tajo), 1996. Trabajos para el seguimiento de las aportaciones por fusión nival de la cuenca del Tajo en el invierno/primavera de 1996. Documento realizado por el Centro de Estudios Hidrográficos.
- Church, M. 1978. Paleohydrological reconstructions from a Holocene valley fill. En: *Fluvial sedimentology*, A. D. Miell, ed., Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir 5, Calgary, AB, Canada, p 743-772.
- DIHMA 1995. (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia). Modelización de Hidrogramas de crecida en tiempo real. Informe parcial No 2 para el Centro de Estudios Hidrográficos.
- DIHMA 1996. (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia). Obtención de características geomorfológicas e hidrogramas unitarios a partir de un modelo digital del terreno. Informe para el Centro de Estudios Hidrográficos.
- Dingman, S. Lawrence. 1993. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, New Jersey.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. K., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, Vol. 24, N° 7, p. 1163-1173.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, Vol. 158, p. 265-284.
- Duckstein, L., Ambrus, S. y Davis, R. D., 1985. Management forecasting requirements. En: *Hydrological forecasting*. (Eds. Anderson, M. G. y Burt, T. P.). John Wiley and Sons Ltd. Cap. 16, p. 559-585.
- Dunn, S. M. y R. J. E. Colohan. 1999. Developing the snow component of a distributed hydrological model: a step-wise approach based on multi-objective analysis. *Journal of Hydrology*, 223, p 1-16.
- Dunne, T. (1978) Field studies of hillslope flow processes. En: *Hillslope Hydrology*. Editado por: M. J. Kirby. Wiley, 227 - 293.
- Dunne, T. y R. D. Black (1970) An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6, 478 - 490.
- Dunne, T., W. Zhang y B. Aubry (1975) Effects of rainfall, vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resources Research*, 27(9), 2271-2285.
- Eckhardt, K. y Arnold, J. G., 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, Technical note, Vol. 251, p. 103-109.
- Fontaine, Thomas A. 1995. Rainfall-Runoff Model Accuracy for an Extreme Flood. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol 121, 4, p 365-374.
- Foufoula-Georgiou, Efi y Witold Krajewski. 1995. Recent advances in rainfall modeling, estimation, and forecasting. *Reviews of Geophysics*, supplement. p 1125-1137.

- Francés, F. y J. Benito. 1995. La modelación distribuida con pocos parámetros de las crecidas. *Ingeniería del Agua*, vol 2, 4, p 7-24.
- Gan, T. Y. y Biftu, G. F., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, Vol. 32, N° 12, p. 3513-3524.
- Gan, T. Y. y Burges, S. J., 1990. An assessment of a conceptual rainfall-runoff model's ability to represent the dynamics of small hypothetical catchments 1. Models, model properties, and experimental design. *Water Resources Research*, Vol. 26, N° 7, p.1595-1604.
- García Bartual, R. 1991. Efecto de las variaciones temporales de la intensidad de la precipitación en el hidrograma de la crecida generada. *Revista de Obras Públicas*, 1991, Diciembre. p 13-21.
- Georgakakos, K. P. y W. F. Krajewski. 1991. Worth of radar data in the real time prediction of mean areal rainfall by non-advective physically based *Water Resources Research*. vol 27, 2, p 185-197.
- Graf, W. L. 1988. *Fluvial Processes and Dryland Rivers*. Springer, Berlin, Germany.
- Grayson, R. B.; I. D. Moore y T. A. McMahon. 1992a. Physically based hydrologic modeling. 1. Terrain-based Model for investigative purposes. *Water Resources Research*, Vol 28, no 10, p 2639-2658.
- Grayson, R. B.; I. D. Moore y T. A. McMahon. 1992b. Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic? *Water Resources Research*. vol 26, 10, 1992, p 2659-2666.
- Haltiner, J. P. y J. D. Salas. 1988. Short-term forecasting of snowmelt runoff using ARMAX models. *Water Resources Research*, vol 24, 5, p 1083-1089.
- Hack, J. T. 1957. Studies of longitudinal profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper no. 294-B.
- Hebson, C.S. y E. F. Wood. 1986. A study of scale effects in flood frequency response. En: *Scale Problems in Hydrology*. Editado por: Gupta, V.K., I. Rodriguez-Iturbe y E.F. Wood. D. Reidel Publishing Company. 1986. p 133-158.(2)
- Hey, R. D. 1979. Dynamic Process Response Model of River Channel Development. *Earth Surf. Processes*, 4, pp 59-72.
- Horton, R. E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446 - 460.
- Horton, R. E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am Bull*, 56, 275 -230.
- Islam, S.; Bras, R. y K. Emanuel. 1993. Predictability of mesoscale rainfall in the tropics. *Journal of Applied Meteorology*. Vol 30, 2. p 297-310.
- Klemeš, V. 1983. Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, vol 65, p 1-23.
- Klemeš, V., 1988. A hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, Vol. 100, p. 3-28.

- Kothyari, U. C. y Singh, V. P., 1999. A multiple-input single-output model for flow forecasting. *Journal of Hydrology*, Vol. 220, p. 12-26.
- Kraijenhoff, D. A. y J. R. Moll. 1986. *River Flow Modelling and Forecasting*. Water Science and Technology Library, 1.
- Krajewski, W. F.; V. Lakshmi; K. P. Goergakakos y S. Jain. 1991. A Montecarlo study of rainfall sampling effect on a distributed catchment model. *Water Resources Research*. vol 27, 2, p 119-128.
- Lang, H. 1984. Chapter 5. Forecasting meltwater runoff from snow-covered areas and from glacier basins. *Real Time River Flow Forecasting: International Postgraduate Course, 1983, Wageningen*. Agricultural University Wageningen. Wageningen.. Pages 113-146.
- Leopold, L. B. y T. Maddock. 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper no. 252*.
- Leopold, L. B.; M.G. Wolman y J. P. Miller. 1964. *Fluvial Process in Geomorphology*. Freeman, San Francisco.
- Lettenmaier, D. P. y Wood, E. F., 1992. Hydrologic Forecasting. En: *Handbook of Hydrology*. (Ed. Maidment, D. R.), Mc Graw Hill. Cap. 26, p. 26.1-26.29.
- Lidén, R. y Harlin, J., 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of Hydrology*, Vol. 238, p. 231-247.
- Limerinos, J. T. 1969. Relation of the Manning coefficient to measure bed roughness in stable natural channels. *Professional Paper United States Geological Survey*. 650D.
- Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, Vol. 235, p. 276-288.
- Maidment, D. R. (ed.) 1992. *Handbook of Hydrology*. Mc Graw Hill. New York.
- Maidment, D. R. 1993. Hidrogis93, Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. *Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Management*. ed. By K. Kovar an H.P Nachtnebel. IAHS publication nº 211, p 181-192.
- Mamillapalli, S., Srinivasan, R.; Arnold, G. y B. Engel. 1996 Effect of spatial variability on basin scale modeling. *Proceedings of Third International Conference on GIS and Enviromental modeling, Santa Fe, New Mexico, Online Paper*.
- Marco, Juan B. 1981. *Hidrología*. Ed. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia.
- Matinec, J. 1960. The degree-day factor for snowmelt runoff forecasting. *IUGG General Assembly of Helsinki, Comission of Surface Waters*. IAHS Publ 51, p 468-477.
- Michaud, J. y S. Sorooshian. 1994a. Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. *Water Resources Research*, vol 30, 3, p 593-605.
- Michaud, J. y S. Sorooshian. 1994b. Effect of rainfall-sampling errors on simulations of desert flash flood. *Water Resources Research*, vol 30, 10, p 2765-2775.
- MOPU. 1990. Instrucción 5.2-IC. Drenaje. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid. p 17.

- Moriassi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D., Veith T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulation. *Transaction of ASABE*. Vol. 50(3): 885–900 2007 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001–2351.
- Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, p. 282-290.
- Pessoa, M. L.; R. L. Bras y E. R. Williams. 1993. Use of weather radar for flood forecasting in the Sieve River Basin: A sensitivity analysis. *Journal of Applied Meteorology*, vol 32, 3, p 462-475.
- Ponce, Victor Miguel. 1989. *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall Inc. New Jersey, USA.
- Puente, Carlos E. y Rafael L. Bras. 1987. Application of Nonlinear Filtering in the Real Time Forecasting of River Flows. *Water Resources Research*, vol 23, N° 4, p 675-682.
- Ragab, R. (ed.), 1999. Survey of modelling approaches suitable for AIMWATER. Informe parcial del proyecto de UE AIMWATER, participado por el CEMAGREF e Institute of Hydrology e IT Solutions and Services de Wallingford.
- Rango, A. 1995. The Snowmelt runoff model (SRM). En: *Computer models of Watershed hydrology*. Editado por: V. P. Singh. Water Resources Publications. Colorado.
- Rango, A y J. Martinec. 1982. Snow accumulation derived from modified depletion curves of snow coverage. *Symposium On Hydrological Aspects Of Alpine High Mountain Areas*, Exeter, 19-30 July 1982, Editor J.W.Glen. IAHS Publication N° 138. IAHS. Washington. pages 83-90.
- Rawls, W. J. y D. L. Brakensiek. 1983. A Procedure to predict Green and Ampt Infiltration Parameters. *Advances in Infiltration*, pp.: 102 - 112. ASAE Publication 11-83. Chicago.
- Reed, R. J. 1983. A note on the relationship between relative precipitation frequency and percent of correct forecasts.. *Bulletin of the American Meteorological Society*. (Boston). Vol. 64, No. 2, pages 148-149.
- Refsgaars, J. C. y Knudsen, J., 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, Vol. 32, N° 7, p. 2189-2202.
- Richards, K. S. 1979. Prediction of drainage density from surrogate measures. *Water Resources Research*. vol 15, 2, p 435-442.
- Senarath, S., Ogden, F. L., Downer, C. W. y Sharif, H. O., 2000. On the calibration and verification of two-dimensional distribute, Hortonian, continuous watershed models. *Water Resources Research*, Vol. 36, N° 6, p. 1495-1510
- Singh, V. P. 1989. *Hydrologic Systems*. Vol II. *Watershed Modeling*. Prentice Hall, New Jersey 320 p.
- Singh, P.; Kumar, N. y M. Arora. 2000. Degree-day factors for snow and ice for Dokriani glacier, Garhwal Himalayas. *Journal of Hydrology*, 235, p 1-11

- Sorooshian, S. y V. K. Gupta. 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: the question of parameter observability and uniqueness. *Water Resources Research*, vol 19, 1, p 260-268.
- Sorooshian, S., Duan, Q. y Gupta, V. K., 1993. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and Heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, Vol. 29, Nº 4, p. 1185-1194
- Strickler, A. 1923. Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und Geschlossene Leitungen. *Mitteilungen des Eidgenössischer Amtes für Wasserwirtschaft*, Bern, Switzerland.
- Tabios, G. Q. y Salas, J. D., 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, Vol. 21, Nº 3, p. 365-380.
- Thyer, M., Kuczera, G. Y Bates, B. C., 1999. Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: A comparison of the Shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms. *Water Resources Research*, Vol. 35, Nº 3, p. 767-773.
- Toth, E., Brath, A. y Montanari, A., 2000. Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, Vol. 239, p. 132-147.
- Vélez, J. I., 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
- Williams, G. P. 1984. Palaeohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments. II – Rivers meanders. *Geografiska Annaler*, 66A, p 89 – 102.
- Wolman, M. G. 1955. The natural channel of Brandywine Creek, PA, USA. *U. S. Geol. Surv. Prof. Paper*, no 271.
- Wood, E. F.; P. A. Troch.; M. Mancini y C. Paniconi. 1994. Distributed approach to catchment scale hydrologic modeling. En: Rosso, R.; A. Peano.; I. Becchi y G. A. Bemporad. *Advances in Distributed Hydrology* Water Resources Publications. Michigan, U.S.A. pag 31-55.
- Wood, Eric F. y András Szöllösi-Nagy. 1978. An Adaptive Algorithm for Analyzing Short-Term Structural and Parameter Changes in Hydrologic Prediction Models. *Water Resources Research*, vol 14, Nº 4, p 577-581.
- Wood, Eric F.; Sivapalan, M.; Beven, Keith y Larry Band. 1988. Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102, p 29-47.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V. y Sorooshian, S., 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, Vol. 204, p. 83-98.
- Yu, Pao-Shan y Tsain-Yih Tseng. 1996. A model to forecast flow with uncertainty analysis. *Journal of Hydrological Sciences*, vol 41, 3, 1996, p 327-344.