

## 1. Introducción

El proceso de diseño hidrológico implica la recopilación y análisis de datos climáticos, la estimación de la escorrentía superficial, la determinación de las características de las precipitaciones y la modelización de eventos extremos. Estos datos son fundamentales para dimensionar adecuadamente las estructuras hidráulicas y garantizar la seguridad y eficiencia de los proyectos.

En el trabajo del Ingeniero Agrónomo, frecuentemente hay que tener evaluar recursos procedentes de la lluvia o trabajar con la seguridad de las obras en lugares cercanos a los cauces. En cualquiera de estos supuestos se necesita comprender y evaluar la circulación del agua por una cuenca de drenaje. Para esta operación, complicada de calcular en la mayoría de los casos, tendremos que recurrir a modelos hidrológicos y otras herramientas auxiliares.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas y tecnologías diseñadas para recopilar, almacenar, analizar y visualizar datos geoespaciales. Los datos geoespaciales son aquellos que tienen una referencia espacial, es decir, están vinculados a ubicaciones geográficas específicas en la Tierra. Una de SIG empleadas en el diseño hidrológico es el denominado QGIS. Se trata de un software libre que puede resolver la mayoría de las necesidades del trabajo con información Geográfica que precisa el Ingeniero Agrónomo.

Los fenómenos que intervienen en el estudio del riesgo hidrológico y del posible diseño de obras para paliarlo, son muy complejos y a veces mal comprendidos. En general se parte del estudio del ciclo del agua subdividiéndolo en diferentes subsistemas, como el agua atmosférica, agua superficial, agua subterránea, agua sub-superficial, océanos, etc.

Los procesos hidrológicos implicados en el intercambio de materia y energía en la tierra son muy variados, pero se podría agrupar básicamente en: Precipitación, interceptación, infiltración, escorrentía, circulación superficial, circulación subterránea, evaporación, y sublimación.

## 2. El sistema hidrológico

El sistema hidrológico a escala global es demasiado complejo para la mayor parte de las aplicaciones técnicas y es práctica habitual restringir el estudio a un determinado momento y a una fracción muy pequeña de la superficie terrestre. Con este primer nivel de simplificación se reducen también los procesos de especial importancia para cada aplicación. Así por ejemplo cuando se estudia la avenida que circula por un cauce la precipitación que cae en la propia masa de agua es prácticamente despreciable y en la mayoría de las situaciones de riesgo para las personas, la infiltración y evaporación desde la corriente fluida. Adquiere gran importancia la redistribución de la energía por el sistema y básicamente se trata de un proceso que conserva la cantidad total de agua en el mismo.

La principal diferencia entre el sistema hidrológico y otros sistemas, incluidos aquellos utilizados en mecánica de fluidos, consiste en que las entradas y gran parte de los procesos en el sistema están afectadas por un grado variable de incertidumbre. Este grado de incertidumbre, a veces es muy elevado, lo cual provoca una mayor parte error en las estimaciones y por otra obliga a la utilización de diferentes análisis estadísticos lo que complica, en cierta manera, el proceso de estimación.

Una característica adicional, que no es exclusiva de los sistemas hidrológicos, pero sí caracteriza a la mayoría de ellos, es la enorme complejidad del soporte físico por el que habrá de moverse el agua y así salvo algunas excepciones lo normal es que ésta sea la principal dificultad que se encuentre el especialista a la hora de representar el sistema.

Un modelo matemático puede utilizarse principalmente de tres maneras:

- Para predecir las salidas conocida la representación del mismo (parámetros) y un juego de variables de entrada (real o estimado). Esta es la actividad más frecuente durante el proceso de diseño en Ingeniería.
- Para definir al propio sistema o a algún parámetro del mismo, conocido un conjunto relacionado de variables de entrada y de salida. Este proceso se conoce como ajuste del modelo y es propio de las fases de desarrollo del mismo o bien de su adaptación a alguna localización específica.
- Para evaluar una hipotética entrada cuando se conocen las salidas y el propio sistema. Esta utilización es frecuente cuando los resultados han quedado registrados de alguna forma no intencionada y son puestos a nuestra disposición mediante alguna técnica no aplicada con anterioridad. Un ejemplo de esto último es el análisis de avenidas históricas a partir del estudio de los sedimentos arrastrados y depositados en un perfil de sedimento.

La mayoría de los métodos empleados en Hidrología pueden ser implementados mediante programas informáticos, con una ventaja notable en cuanto al número de pasos a realizar y tiempo invertido en ello. A esto hay que añadir la eliminación de los errores aritméticos, frecuentemente cometidos por operadores humanos. A pesar de estas ventajas, la resolución informática de estos problemas obliga a buscar nuevos métodos de resolución o a modificar los existentes.

Por otra parte, los ordenadores presentan una serie de limitaciones lógicas y fundamentalmente de precisión de las cantidades lo que, cuando aumenta el número de pasos de cálculo, redundan en

la acumulación de errores puramente matemáticos que pueden enmascarar el resultado final. En nuestro caso, se plantea estudiar determinados procesos hidrológicos íntimamente conectados entre sí, como son la infiltración del agua de lluvia, la escorrentía superficial y la escorrentía subterránea. La definición correcta de cada proceso y su importancia en el resultado final es crucial para concentrar el estudio en las partes más desconocidas del ciclo del agua.

En este libro se va a utilizar el Modelo HEC-HMS. El modelo HEC-HMS permite el cálculo de gran número de situaciones de interés en el diseño hidrológico. Además, es un software libre, lo que facilita su utilización docente.

### 3. Descarga del Programa QGIS

Es fácil de encontrar la página fuente simplemente buscando QGIS en cualquier navegador.

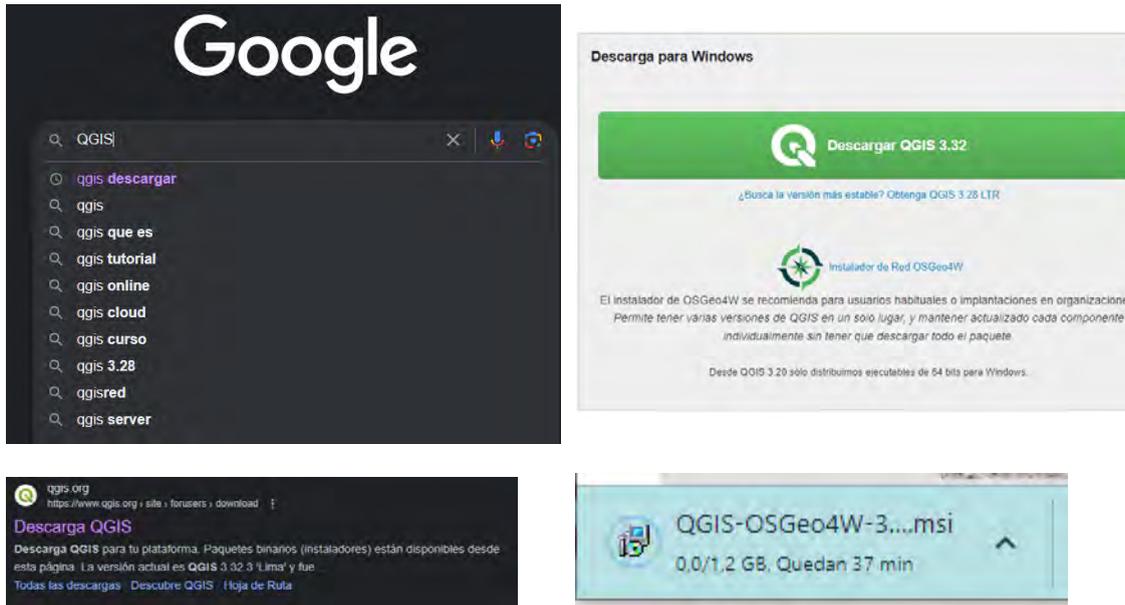


Figura 1 Búsqueda e instalación de QGIS

La instalación no ofrece ningún tipo de problema y suele colocarse en la raíz de un disco duro. Será preferible que no sea el disco donde está el sistema operativo. Una vez instalado podemos utilizarlo para diferentes operaciones de interés en el manejo de datos hidrológicos.

## 4. Descarga del MDT

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una representación matemática y digital de la superficie de la Tierra, que incluye la elevación o altitud de los puntos en el terreno. Este modelo proporciona información detallada sobre las variaciones topográficas del terreno y es esencial en diversas aplicaciones, como en nuestro caso para el diseño hidrológico.

Por tanto, para tener información del terreno debemos empezar por el Modelo Digital de Terreno (MDT). Hay numerosas fuentes de información en donde obtener este tipo de datos. Entre estas fuentes está el **Servicio Geográfico Nacional**

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=LIDAR>

Otra fuente, bastante accesible es el portal de descargas de la **Junta de Andalucía**. El enlace para entrar en el mismo es:

<https://portalrediam.cica.es/descargas?path=%2F>

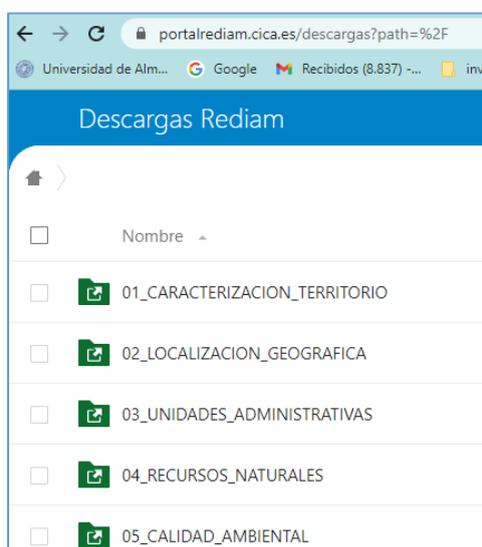


Figura 2 Imagen de la página de descargas del portal de información Ambiental de la Junta de Andalucía

Se escoge 01\_CARACTERIZACIÓN DEL TERRITORIO, y dentro de este **07 BASES REF ELEV**



Figura 3 Imagen de las carpetas con información topográfica

Dentro de esta carpeta se escoge **01 ELEVACIONES.** Y así hasta llegar el año que se desea

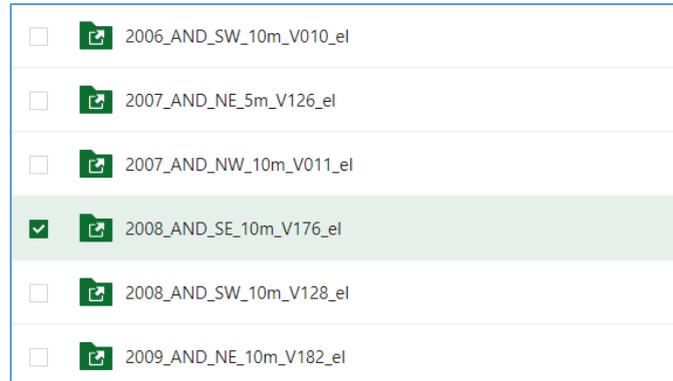


Figura 4 Carpetas de descarga de información topográfica

Y se escoge la hoja concreta del Mapa Topográfico Nacional 1:25.000 cuya distribución puede consultarse en línea en:

<https://info.igme.es/cartografiadigital/otra/bcn25.aspx#mapa>.

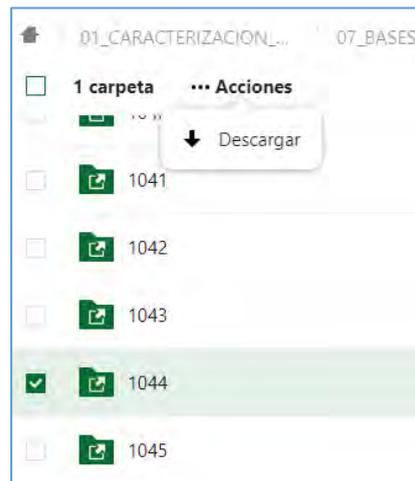


Figura 5 Selección de la descarga deseada

Vendrán varias hojas y se descargan todas.

## 5. Empezando con QGIS

El SIG permite integrar datos de diversas fuentes y representarlos de manera visual en mapas. Facilita el análisis espacial, la identificación de patrones geográficos, la toma de decisiones basada en la ubicación y la comunicación de información compleja de manera accesible. Abrimos el programa QGIS, bien desde el escritorio o desde el menú de aplicaciones instaladas. Le pedimos abrir un proyecto ya existente o iniciar uno nuevo.

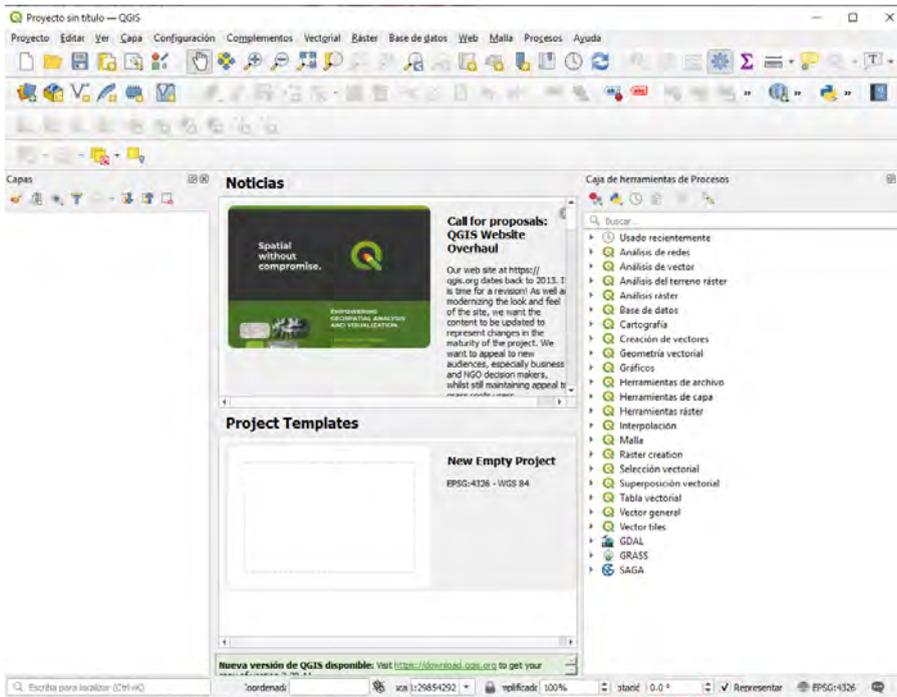


Figura 6 Imagen inicial de QGIS

Una vez nombrado el proyecto o seleccionado el que vamos a continuar, se incorporan los MDT necesarios hasta cubrir la zona de estudio. Para ello se utiliza la Caja de herramientas de Procesos. Para ello se van seleccionando mediante el botón de añadir mapa, en la barra de herramientas.

Administrador de fuentes de datos.



Figura 7 Icono del Administrador de fuentes de datos

Nos aparece un menú en el que se puede seleccionar el mapa adecuado y dotarlo de un sistema de referencia si no estuviese ya especificado.

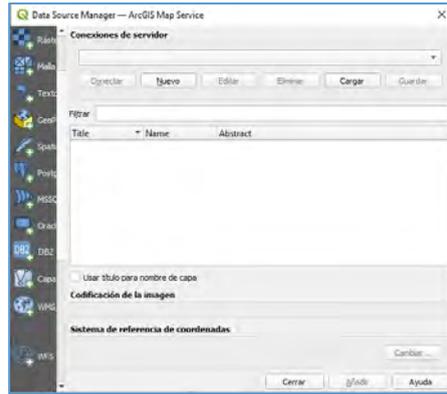


Figura 8 Pantalla de entrada al administrador de fuentes de datos

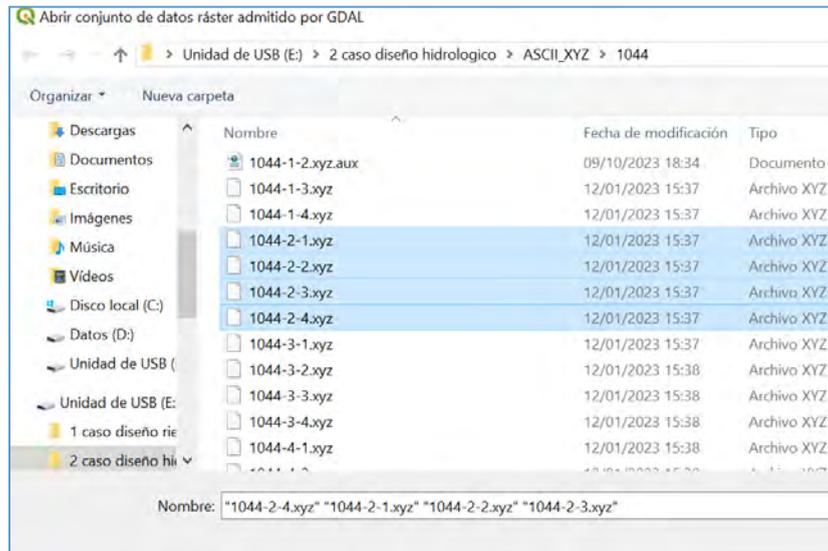


Figura 9 Selección de mapas ráster con MDT

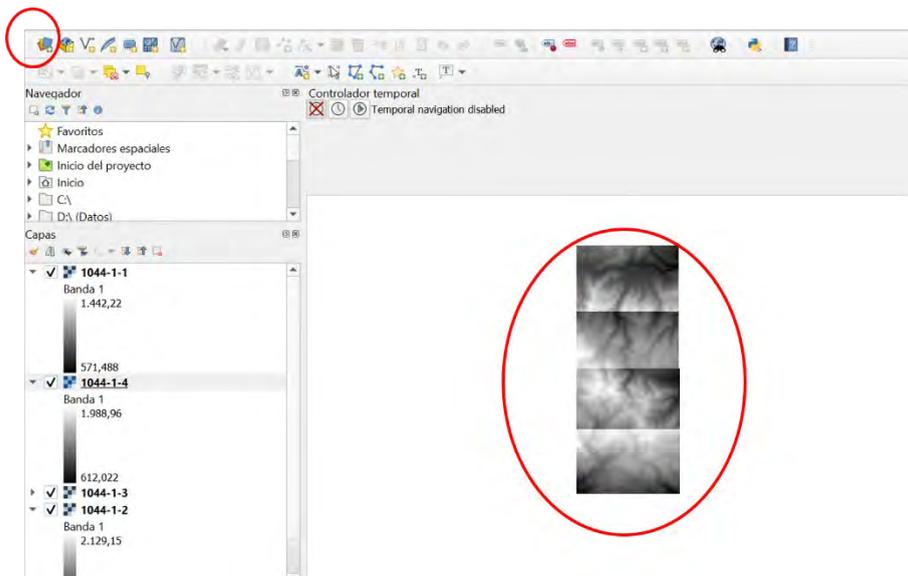


Figura 10 Aspecto de las capas importadas

5.1. Combinar las capas necesarias para cubrir la zona de interés.

Conviene ir seleccionando el sistema de referencia correcto, siempre el mismo, para cada MDT concreto. Se unen en una sola imagen ráster. Para ello se utiliza la herramienta **Combinar** de la **miscelánea** de **Ráster**

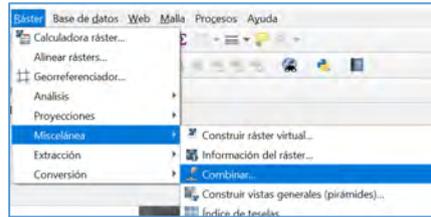


Figura 11 Aspecto de la cascada de ventanas de la herramienta Combinar

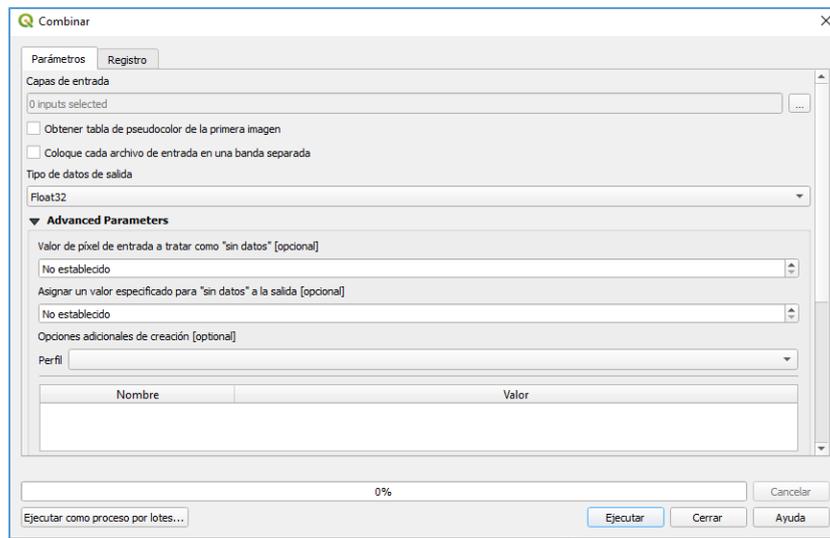


Figura 12 Herramienta combinar ráster

De este modo se seleccionan todos los MDT que cubren el cauce que deseamos analizar.

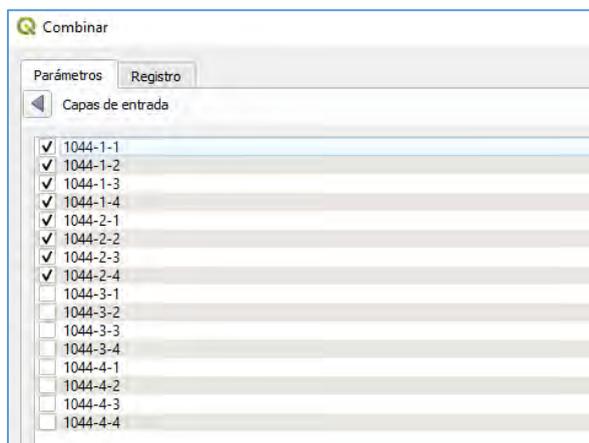


Figura 13 Selección de capas para combinar

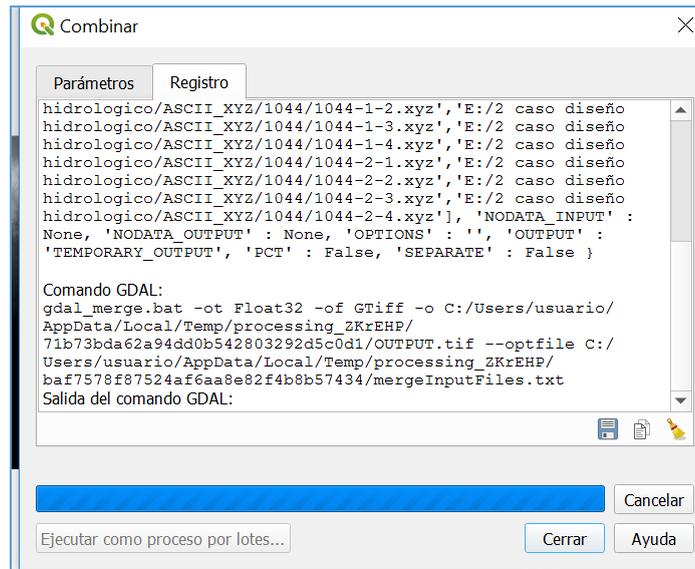


Figura 14 Proceso de la herramienta combinar

Cuando tengamos todas las hojas de los MDT combinadas saldrá el MDT único de la zona. Nos saldrá una capa de nombre **combinado** que debemos hacer permanente y eventualmente cambiar de nombre. Si todo está bien, eliminamos las capas de partida.



Figura 15 Capa ráster conteniendo un único archivo que combina todas las capas individuales

## 5.2. Sistemas de referencia

Recuérdese que un sistema de referencia en el contexto de un SIG se refiere a un marco de referencia espacial que define la ubicación de objetos y fenómenos en la Tierra. Es esencial para garantizar que los datos geoespaciales sean coherentes y puedan ser integrados y comparados de manera precisa. Un sistema de referencia consiste en dos componentes principales:

- Sistema de Coordenadas: Define cómo se asignan coordenadas (pares de valores numéricos) a puntos en la Tierra. Estas coordenadas permiten ubicar geográficamente objetos y características en un espacio tridimensional. Hay sistemas de coordenadas geográficas (latitud, longitud, altitud) y sistemas de coordenadas proyectadas (x, y, z) que

transforman la superficie curva de la Tierra en un plano para facilitar el mapeo. Por Ejemplo, las Coordenadas UTM.

- Datum: Es un conjunto de parámetros que define el tamaño y la forma de la Tierra, así como la posición de un origen específico (punto cero) en relación con el centro de masa de la Tierra. Un *datum* establece la referencia desde la cual se miden las coordenadas geográficas. Algunos *datums* comunes son el WGS 84 (utilizado en sistemas de navegación por satélite GPS) y *datums* locales o regionales adaptados a áreas específicas. En España establece ETRS89 como sistema de referencia geodésico oficial en España para la referenciación geográfica y cartográfica en el ámbito de la Península Ibérica y las Islas Baleares, en el caso de las Islas Canarias, se adopta el sistema REGCAN95.

Es importante que los sistemas de referencia sean adecuados y en numerosas ocasiones no se puede calcular bien o los comandos no funcionan debido a una mala elección de los mismos.

Muchas veces se definen en el sistema EPSG (*European Petroleum Survey Group*)

EPSG 23029: Proyección UTM ED50 Huso 29 N

EPSG 23030: Proyección UTM ED50 Huso 30 N

EPSG 23031: Proyección UTM ED50 Huso 31 N

EPSG 25829: Proyección UTM ETRS89 Huso 29 N

EPSG 25830: Proyección UTM ETRS89 Huso 30 N

EPSG 25831: Proyección UTM ETRS89 Huso 31 N

EPSG 32628: Proyección UTM WGS84 Huso 28 N

EPSG 32629: Proyección UTM WGS84 Huso 29 N

EPSG 32630: Proyección UTM WGS84 Huso 30 N

EPSG 32631: Proyección UTM WGS84 Huso 31 N

EPSG 4082: Proyección REGCAN95 Huso 27

EPSG 4083: Proyección REGCAN95 Huso 28

Ya que más tarde el modelo HEC HMS exigirá un sistema proyectado para funcionar bien. Si queremos superponer una imagen de satélite será conveniente que el sistema sea

EPSG:3857-WGS84/Pseudo-Mercator- Spherical Mercator

EPSG:4326-WGS84/Pseudo-Mercator

Estos últimos sistemas son los sistemas de coordenadas proyectados que se utiliza para representar mapas en Google Maps, OpenStreetMap, etc., en especial el EPSG:3857.

Puede que se puedan encontrar combinaciones aceptables pero las mencionadas hacen encajar bien los diferentes tipos de información disponible.

## 6. Obtención de las características hidrológicas de la cuenca

Ejecutamos ahora la herramienta `r.watershed` del conjunto GRASS

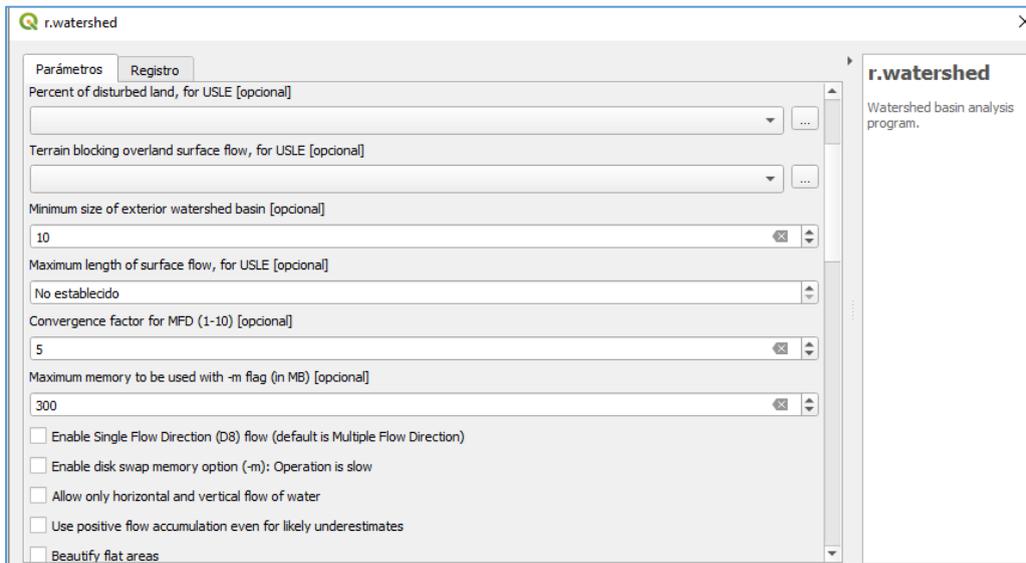


Figura 16 Ejecución de la herramienta `r.watershed`

Partimos del mejor MDT del que dispongamos; si hay algún fallo en el MDT es posible que nos lo indique y en ese caso debemos utilizar previamente el comando `r.fill` para rellenar los posibles huecos del modelo.

Hay que poner 10 o más en el `mínimo de tamaño de la cuenca` para que no salgan demasiadas unidades.

La ejecución del comando puede tardar un poco y es frecuente que de errores si el sistema de referencia no es adecuado. Si funciona correctamente aparecerán varios archivos que deberemos hacer permanentes o renombrar. Para que se ejecute correctamente es conveniente disponer de un ordenador de sobremesa o un portátil tipo *gamer*, con una tarjeta gráfica potente.

Los nombres que sugiere el programa son:

- Number of cell that drain through each cell
- Drainage direction
- Unique label for each watershed basin
- Stream segments
- Half-Basins
- Slope length and steepness (LS) factor for USLE
- Topographic index  $\ln(a/\tan(b))$
- Stream power index  $a*\tan(b)$

En el proceso subsiguiente deberemos utilizar algunos por lo que el nombre que les demos debe ser parecido a lo que sugiere el programa o anotarlo debidamente. Para ejecutar los siguientes procesos, son imprescindibles

- Number of cell that drain through each cell

- Drainage direction
- Unique label for each watershed basin

También es conveniente hacer permanente **Stream segments**. Esto último es para poder ver por donde pasan los cauces.

El aspecto de algunas de estas capas se muestra en la Figura 17

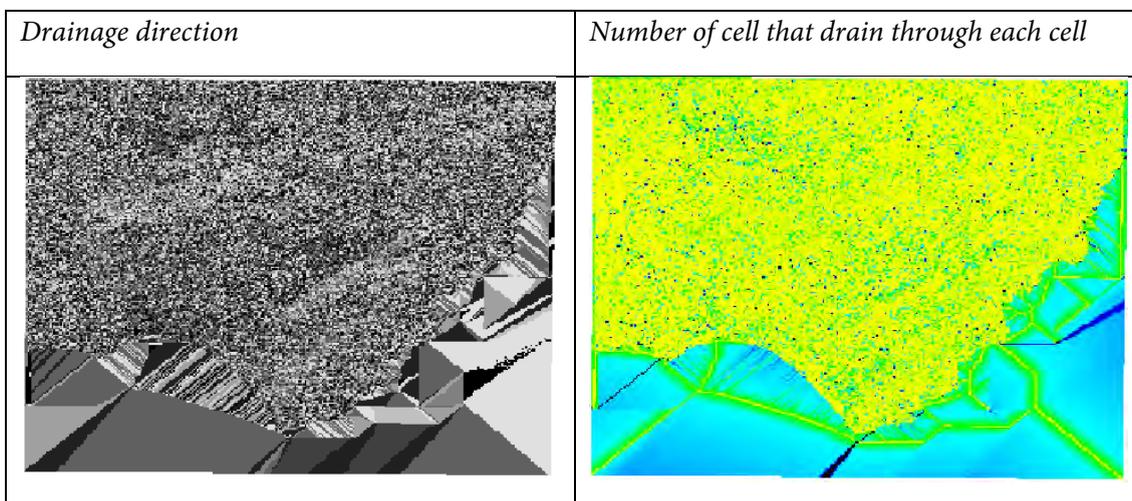


Figura 17 Aspecto de algunas capas generadas por la herramienta *r.watershed*

Ahora hay que ejecutar **r.water.outlet** tomando como dato la capa **Drainage direction**, que será una de las que han salido en el paso anterior. Conviene tener activa y visible la capa **Number of cell that drain through each cell**, para saber dónde poner exactamente el cursor para indicar el punto de salida (**Coordinates of the outlet point**). Es imprescindible que todas las capas estén en el mismo sistema de referencia.

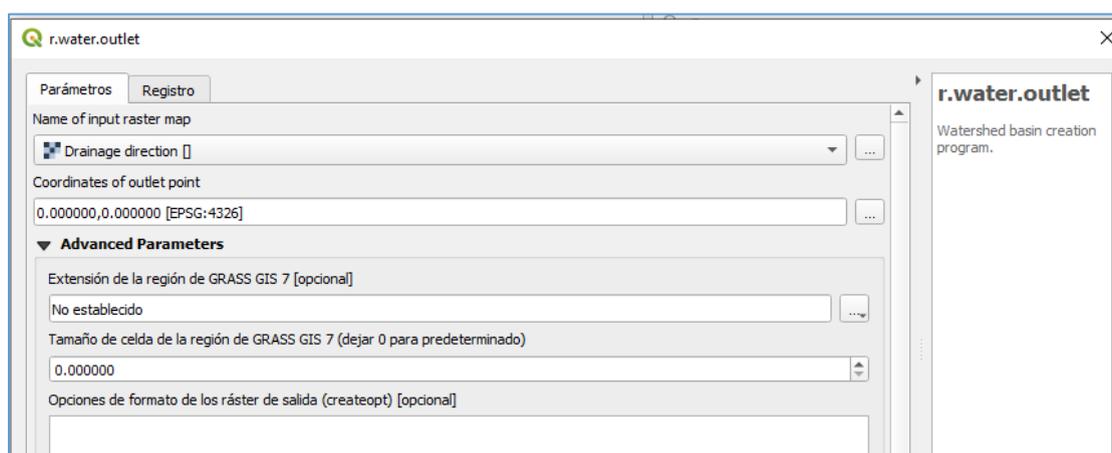


Figura 18 Aspecto de la herramienta *r.water.outlet*

Debería generar una capa marcando el perímetro de la cuenca, véase Figura 19.



*Figura 19 Perímetro de la cuenca generado por el comando `r.water.outlet`*

Para una mayor comodidad deberíamos vectorizar este recinto mediante `r.to.vect`. Si no funciona adecuadamente podemos usar el comando `vectorizar` de la herramienta GDAL.

## 7. Obtención de los cauces de la cuenca

Ahora ejecutamos el comando `r.stream.extract`, con el mejor MDT que dispongamos como capa de origen y con cuidado de indicarle en los `Advanced parameters` que queremos una salida en forma `line`.

Es preciso tener en cuenta que se debe indicar un número alto de celdillas necesarias para considerar que existe un cauce, por ejemplo 15000. De esta manera no aparecerán demasiados trozos y la labor de depuración será más cómoda.

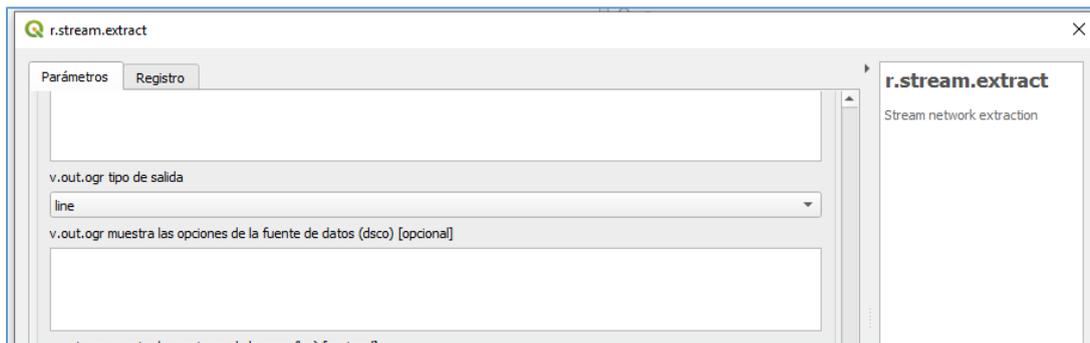


Figura 20 Herramienta `r.stream.extract`

Saldrá una figura con todos los cauces del MDT utilizado.

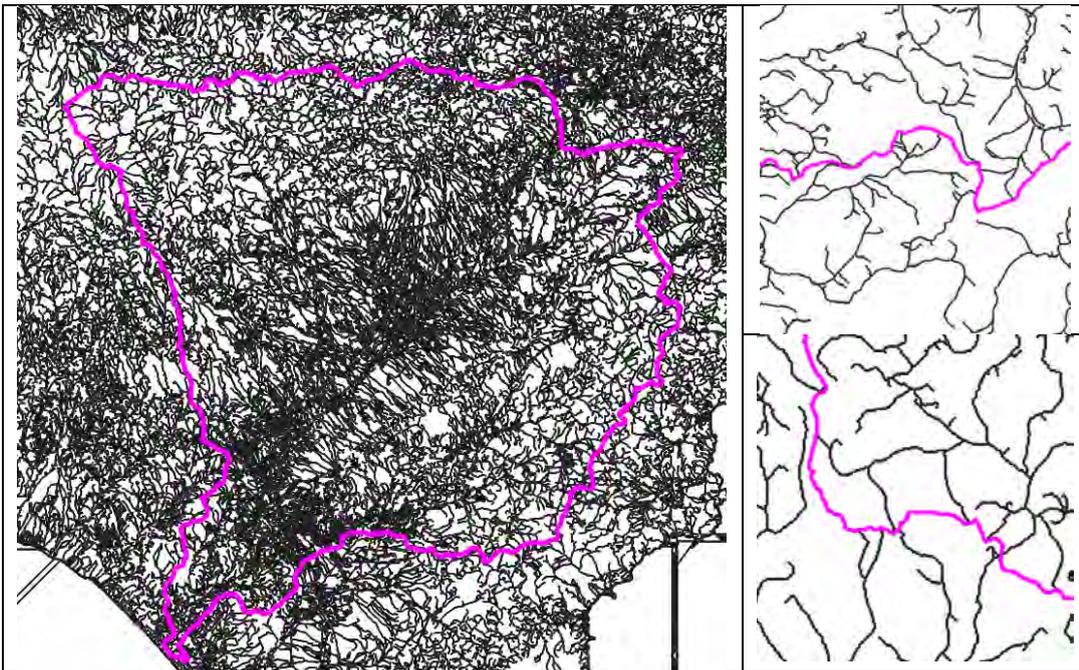


Figura 21 Capa vectorial resultado de la herramienta `r.strem.extract`

Se puede apreciar el nivel de detalle que alcanza esta herramienta en su delimitación de los cauces que vierten a la cuenca. Véase el límite de la cuenca y los cauces.

Se hace permanente la capa marcada como vectorial (se puede reconocer fácilmente porque se puede visualizar la tabla de atributos, mientras que en un ráster no es posible). Se marcan y borran a mano los cauces que no pertenecen a la cuenca que vamos a analizar. No es preciso ser muy cuidadoso con los cauces secundarios. Basta que el cauce principal esté completo. Si hemos

conseguido crear el perímetro de las cuencas mediante la herramienta `r.water.outlet`, podemos extraer los cauces del interior usando el comando intersección del menú geoproceso vectorial. En cualquiera de los casos debe quedar como se muestra en la Figura 22. Nótese que el formato Shape (.shp), es un tipo de archivo que almacena la información geométrica de los elementos de la capa en formato vectorial.



*Figura 22 Capa shp resultado de eliminar los cauces que no interesa analizar*

Ahora estamos en condiciones de usar estos archivos en el programa HEC-HMS.

## 8. Descarga de HEC-HMS

Este modelo, quizás el de uso más generalizado, se desarrolló a partir de los años 80, por el *U.S. Army Corps of Engineers* y su nombre responde a las siglas del **Hydrologic Engineering Center** (HEC) e Hydrologic Modeling System (HMS). Responde a la descripción básica de Modelo determinístico, pero contiene una serie de herramientas opcionales de generación estocástica para el análisis de caudales, cuando se dispone de datos, y para la simulación de precipitaciones de diseño. Se trata de un modelo hidrológico basado en procesos de lluvia escorrentía, en un entorno de alto nivel, accesible en régimen de *freeware* desde el organismo que lo desarrolla.

(<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>)

Este organismo suele ofrecer versiones avanzadas a modo de prueba. A veces interesa utilizarlas cuando la versión oficial da algún problema de forma persistente.

## 9. Características generales del modelo HEC-HMS

La característica básica del modelo es que trata la cuenca como un conjunto de elementos interconectados y cada uno de estos componentes trata una parte del proceso lluvia-escorrentía.

Los componentes principales de la cuenca son las subáreas, los canales y los embalses que contenga la cuenca. Por otro lado se dispone de herramientas que permiten conectar estos elementos entre sí, derivar parte del caudal hacia otro destino (p.ej una captación de un río), incorporar una fuente alternativa y tener en cuenta sumideros de agua.

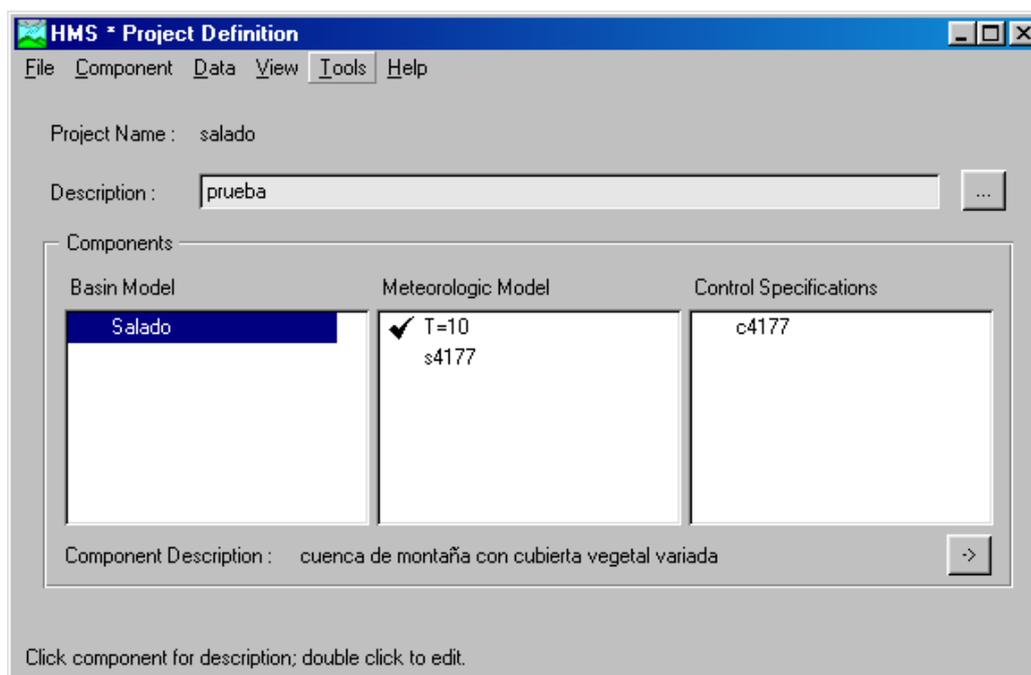


Figura 23 Aspecto de la pantalla inicial del Modelo HEC-HMS

En cada uno de estos elementos se dispone de los procedimientos matemáticos necesarios para obtener el hidrograma de escorrentía a partir de las entradas a cada uno de los elementos en cuestión (lluvia, en el caso de una subárea, otros hidrogramas, en el caso de un canal, etc.).

La escorrentía superficial para una subárea se obtiene descontando la infiltración a la precipitación, según varios métodos disponibles. La infiltración se encuentra modelada según una serie de métodos de amplio uso como el método de las abstracciones y la ecuación de Green y Ampt, aunque se proponen otras posibilidades. Por otro lado, es posible escoger entre episodios de lluvia propuestos por el usuario o bien precipitaciones de diseño con cierta probabilidad de ocurrencia. Obtenido el exceso de precipitación se genera el hidrograma de escorrentía de cada subárea mediante el método del hidrograma unitario, que puede ser definido por el usuario, e incluso este modelo incorpora la posibilidad de utilizar una opción basada en la onda cinemática para superficies regulares.

La circulación de la avenida por los cauces se puede calcular mediante el método Muskingum clásico, mediante el método de Muskingum-Cunge en cauces regulares o naturales o mediante onda cinemática. El tránsito por embalses se calcula por el método de la piscina nivelada Las

versiones actuales incorporan la posibilidad de ajustar determinados parámetros mediante técnicas de optimización, a partir de hietogramas e hidrogramas medidos.

## 10. Trazado manual de la cuenca vertiente

Se partirá de una imagen aérea de la zona a estudiar, normalmente un plano en curvas de nivel. El trazado del perímetro de cada subcuenca se realizará partiendo del punto donde se ubicará la salida de la cuenca. Se trazarán líneas de máxima pendiente, que interceptarán a cada curva de nivel hasta llegar al punto más alto de la cuenca (ver línea azul en la Figura 24). Se repetirá esta operación por el otro lado del embalse y en cada bifurcación del cauce. Lógicamente no tiene sentido continuar el trazado una vez que se ha interceptado el perímetro exterior de la cuenca, ya que se supone que, a partir de ahí, la línea continua exactamente por encima de la que ya está trazada. Como ejemplo se incluye una figura con el trazado parcialmente terminado.

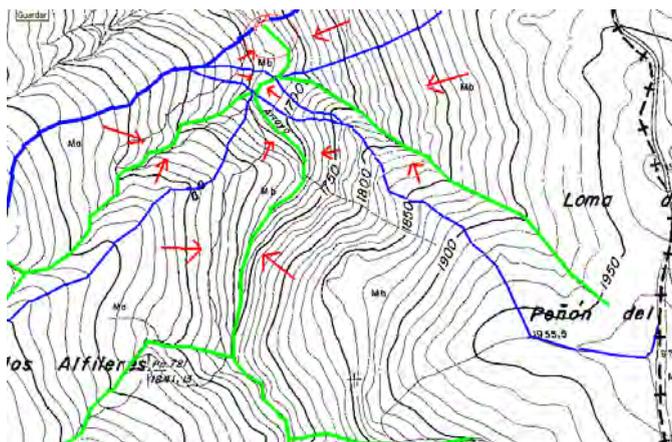


Figura 24 Trazado manual de las cuencas vertientes

Una vez determinado el contorno de cada unidad hidrológica, se procederá a su caracterización, determinando superficie, parámetros de infiltración, pendientes, etc., según los solicite el modelo.

Para el perfil de los cauces se adoptará una reducción a escala del corte transversal del valle, en el punto seleccionado, dándole una anchura tipo de 10-30 m en zonas montañosas y mayor en áreas bajas. También es posible utilizar una herramienta de QGis.

## 11. Resolviendo casos sencillos con HEC-HMS

El modelo HEC-HMS puede ser utilizado para resolver problemas sencillos de hidrología, sin necesidad de utilizar un SIG.

### 11.1. Cálculo del impacto de una urbanización en parte de una cuenca.

Sea una cuenca de superficie 1,2582 km<sup>2</sup> y número de curva CN=81,25. Se decide construir una urbanización de 0,5 km<sup>2</sup> en un trozo de la cuenca. Si  $t_{lag}$  de la cuenca inicial es 552 minutos y el trozo donde se construirá la urbanización es de L=450 m, n de Manning=0,01 y pendiente 0,001 (suponga un calado de prueba de h=0,002 m). El hietograma de diseño es

t(min)	PP(mm)	t(min)	PP(mm)	t(min)	PP(mm)
10	0,5	70	12,0	130	4,0
20	1,5	80	10,0	140	3,0
30	2,0	90	7,0	150	2,0
40	2,7	100	6,5	160	1,0
50	3,5	110	6,0	170	0,5
60	6,5	120	4,5	180	0,0

¿Cuál será el caudal punta inicial y el nuevo caudal punta después de construir la urbanización?

La primera operación será crear una cuenca nueva

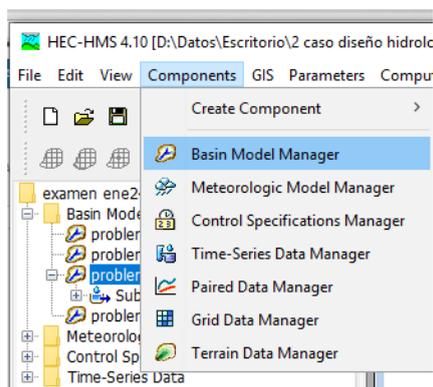


Figura 25 Crear una cuenca.

En esta cuenca se debe crear una subcuenca a la que indicarle la superficie, Número de curva y  $t_{lag}$  (esto implica escoger las herramientas **SCS Curve Number** y **SCS Unit Hydrograph**).

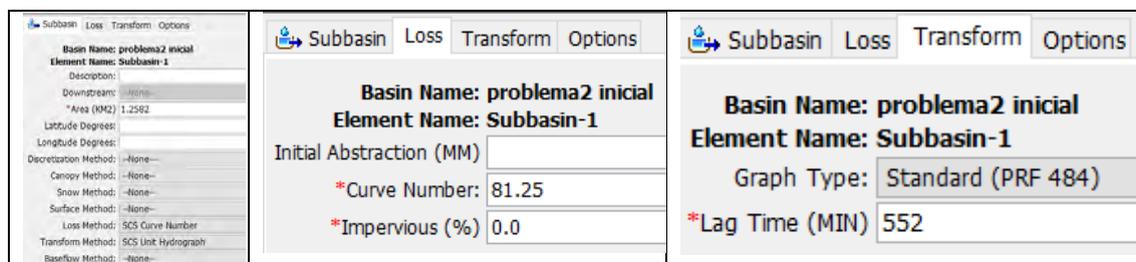


Figura 26 Procesos y datos de la subcuenca

Ahora creamos un modelo meteorológico, indicando **Specified hyetograph**. En la opción **Replace missing** hay que poner **Set to default** y en la pestaña **Basins**, marcar todas.

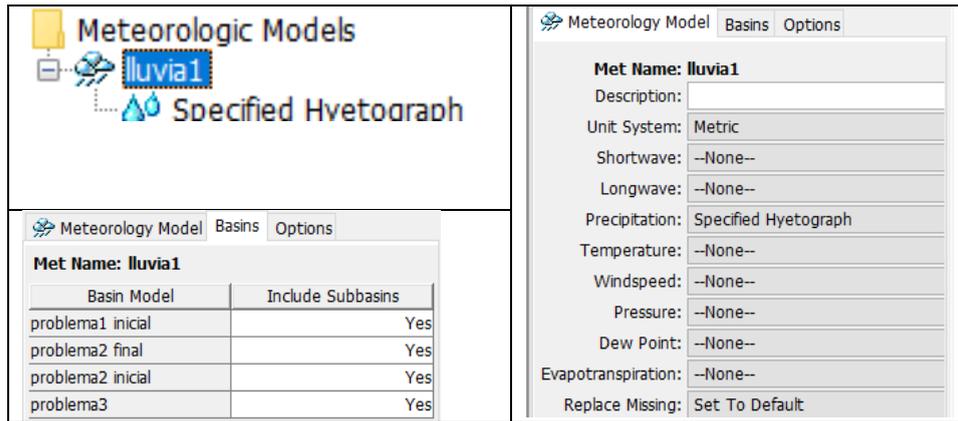


Figura 27 Modelo meteorológico y sus opciones

Ahora hay que crear una serie temporal para colocar los datos de lluvia.

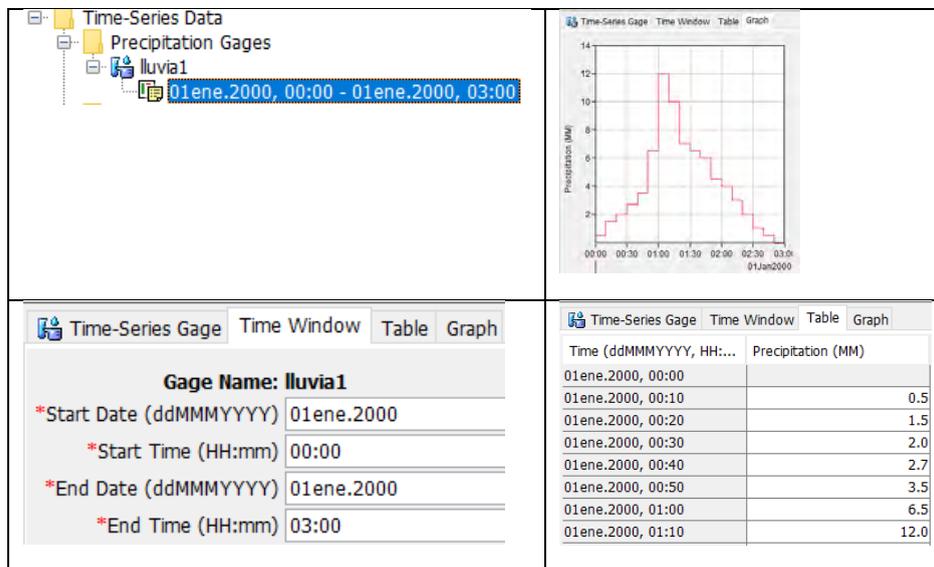


Figura 28 Datos de lluvia

Ahora será necesario crear un archivo de especificaciones de control que cubra el tiempo en donde aparecerán los hidrogramas.

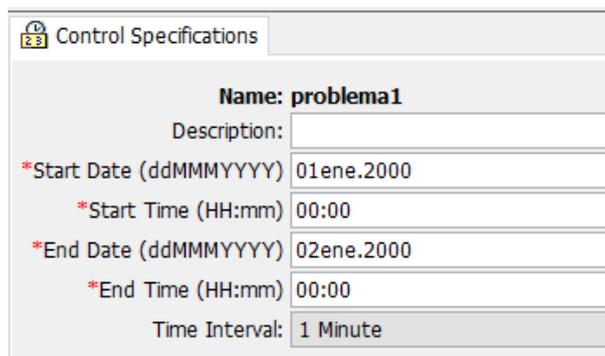


Figura 29 Especificaciones de control

Ahora podemos contestar las primeras preguntas. Desplegamos el sumario del resultado y vemos

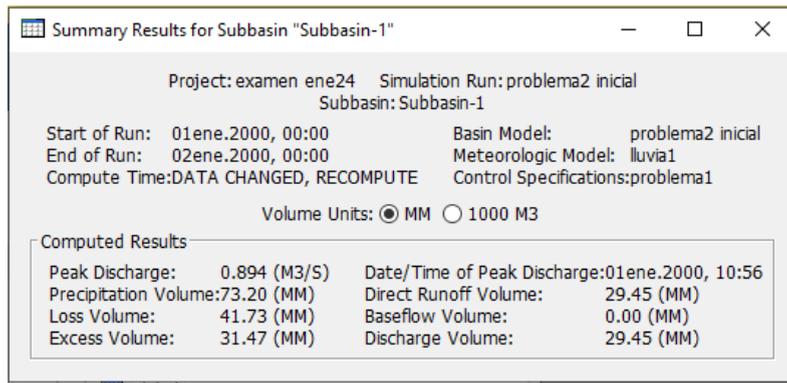


Figura 30 Resumen de resultados para la subcuenca 1

Podemos ver que la precipitación total es  $P=73,2$  mm, La infiltración total  $F=41,736$  mm, el exceso de precipitación  $E=31,47$  mm, el caudal punta  $Q_p=0,8948$  m<sup>3</sup>/s, que ocurre a las 10h, 56 minutos y el volumen es de  $29,45$  mm= $37100$  m<sup>3</sup>

Para ver el efecto de la urbanización debemos modificar la subcuenca original para desgajar los  $0,5$  km<sup>2</sup> de la urbanización.

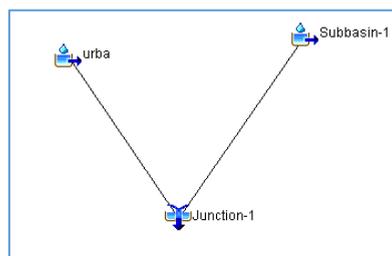


Figura 31 Configuración del problema una vez incluida la alteración.

Para la subcuenca 1 (original) la superficie debe ser la original, pero restando la superficie de la urbanización  $A=0,7582$  km<sup>2</sup>. A esta parte no hay que modificarle CN o  $t_{lag}$ .

Por su parte creamos una subcuenca nueva (Urba), a la que dotamos de  $A=0,5$  km<sup>2</sup>, CN=99 y debemos actualizar  $t_{lag}$  mediante los datos y la ecuación de Manning.

$$t_{lag} = \frac{L \cdot n}{\sqrt{S} \cdot h^{2/3}} = 149,40 \text{ minutos}$$

Si ahora ejecutamos de nuevo el modelo podemos obtener  $Q_p=2,788$  m<sup>3</sup>/s

### Circulación de una avenida por un cauce

Si se tiene el tiempo de viaje  $k=1,2$  h y  $x=0,25$ , de un cauce y se conoce el hidrograma de entrada, se puede determinar el caudal punta del hidrograma de salida.

T(h)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q(m <sup>3</sup> /s)	0,50	0,70	0,90	1,80	3,00	6,70	12,00	7,00	5,00
T(h)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Q(m <sup>3</sup> /s)	4,00	3,00	2,00	1,50	1,20	1,10	0,50	0,25	0,00

Para este supuesto creamos una cuenca con dos elementos; un cauce y una fuente (para poder insertar el hidrograma de entrada)

El tiempo de viaje es el tiempo que tarda al agua en llegar desde el extremo aguas arriba hasta el final del cauce (El método de Muskingum-Cunge lo calcula así) y  $x$  es un parámetro adimensional)

Como esta configuración no utilizará precipitación podemos usar la del caso anterior u otra cualquiera. Para este caso hay que crear un evento de caudal en el menú de series temporales.

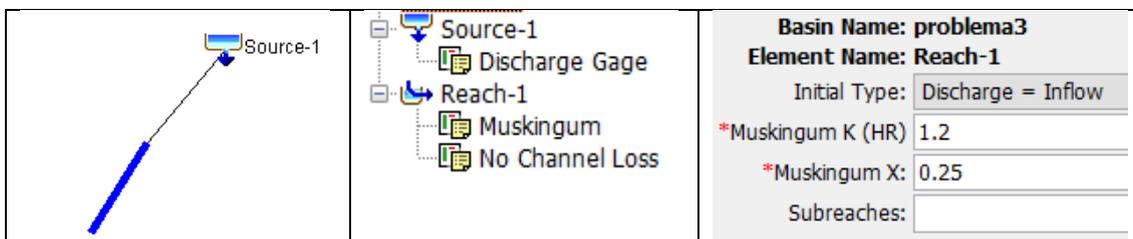


Figura 32 Datos para el caso de circulación mediante el método de Muskingum

Una vez ejecutado el modelo obtenemos el caudal punta de salida  $Q_p=9,32 \text{ m}^3/\text{s}$

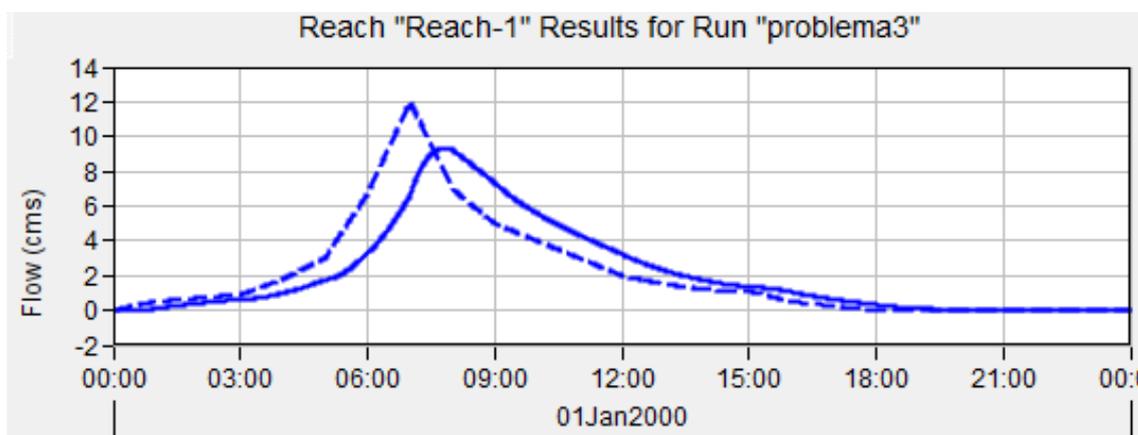


Figura 33 Hidrogramas entrante y saliente

Para la mayoría de los trabajos profesionales se requiere una medida de precisión en las superficies, longitudes o propiedades de las subcuencas. Por ello, en estos casos se hace imprescindible el uso combinado de los SIG y del Modelo HEC-HMS.

## 12. Generación de cuencas en HEC-HMS

Una vez que se ha conseguido un MDT (en formato tiff y georeferenciado) y un shp del cauce principal se puede utilizar el propio SIG del modelo para generar las subcuencas y cauces de la cuenca global. En primer lugar, creamos un proyecto, figura 34.

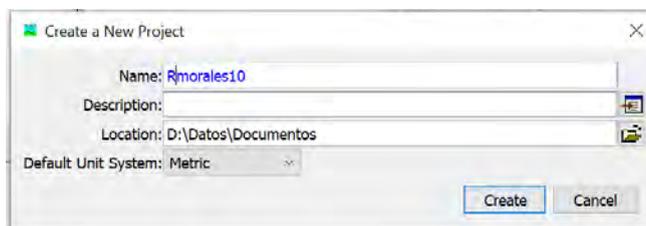


Figura 34 Creación de un nuevo proyecto en HEC-HMS 4-10

Ahora le insertamos un modelo de la cuenca, Figura 35.

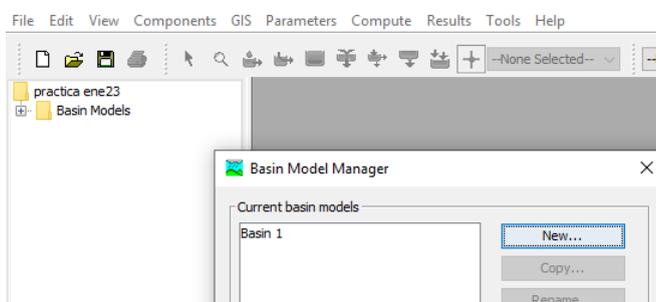


Figura 35 creación de una cuenca

Y a continuación importamos el MDT, Figura 36.

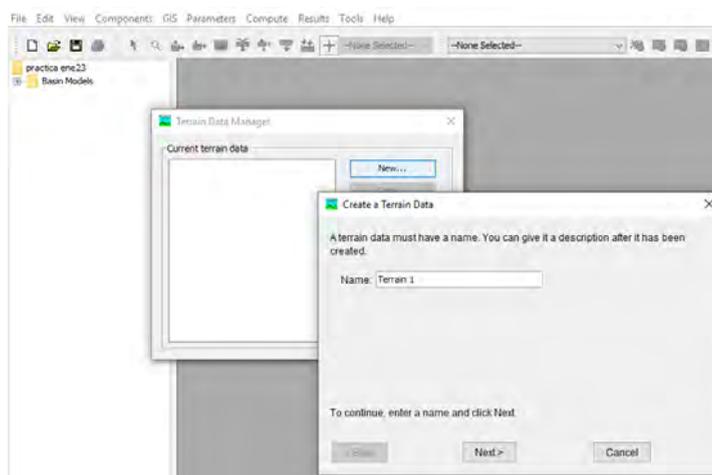


Figura 36 Inserción de un modelo del terreno

Buscamos el MDT creado, Figura 37.

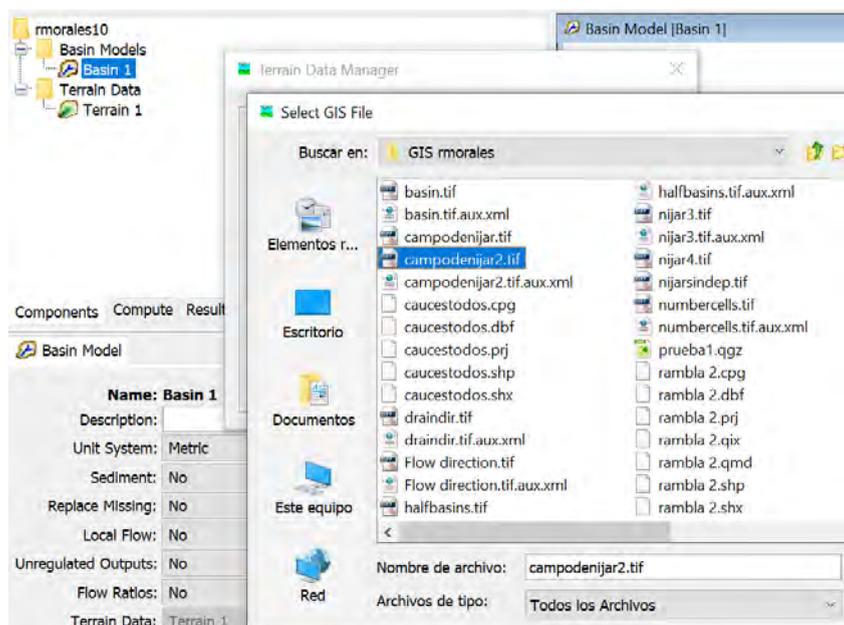


Figura 37 Selección de un MDT

A continuación, desplegamos los menús **basin** y **terrain** en el lado izquierdo de la ventana de trabajo de HEC. Sin tocar nada más, indicamos en el menú **basin** que el terreno es **terrain**.

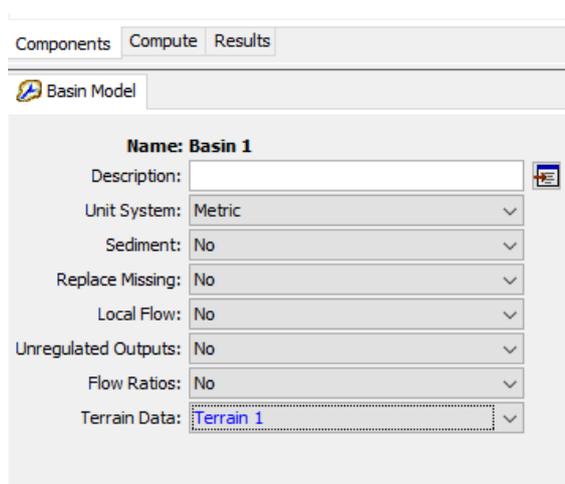


Figura 38 Selección del MDT en la cuenca Basin1

Cuando marquemos el menú **terrain**, nos indicará que no tiene sistema de referencia, véase Figura 39. Marcamos **Skip** para que tome el que lleva el MDT internamente.

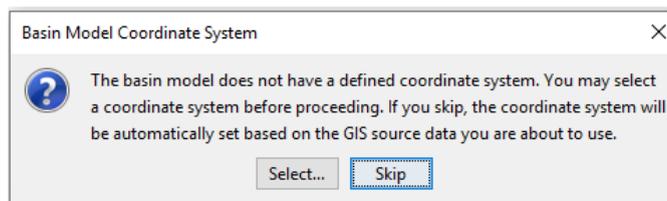


Figura 39 Advertencia sobre el sistema de referencia

Aparecerá una imagen con cierto falso relieve, Figura 40.



Figura 40 Imagen del modelo de elevaciones una vez incorporado.

Si confiamos en el MDT, podemos saltarnos el pre-acondicionamiento del terreno. Es frecuente que el MDT sea defectuoso y es necesario preparar el MDT para su tratamiento posterior. Si hacemos el pre-acondicionamiento nos pedirá que definamos la magnitud de los defectos que debemos reparar. Definimos unos valores de suavizado y pulsamos **next**, Figura 41 .

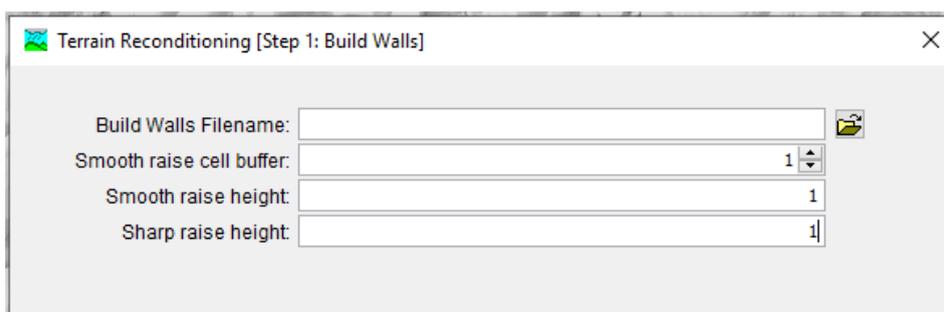


Figura 41 Construir paredes en el MDT

Llegado este momento debemos indicar el nombre del archivo *shp* donde está el cauce que hemos preparado, Figura 42.

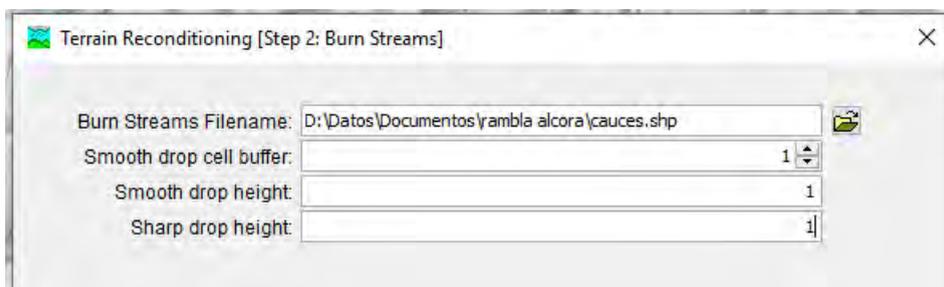


Figura 42 Posicionado de los cauces con mediante un archivo externo.

Tanto si definimos esta etapa como si la saltamos debemos preparar el MDT para que no aparezcan huecos. Se trata de la opción **Preprocess Sinks**.

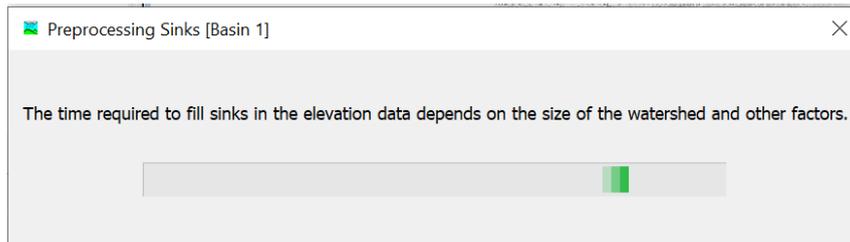


Figura 43 Advertencia sobre fill sinks

Aparecerá una figura que marca las posibles hondonadas, Figura 44.

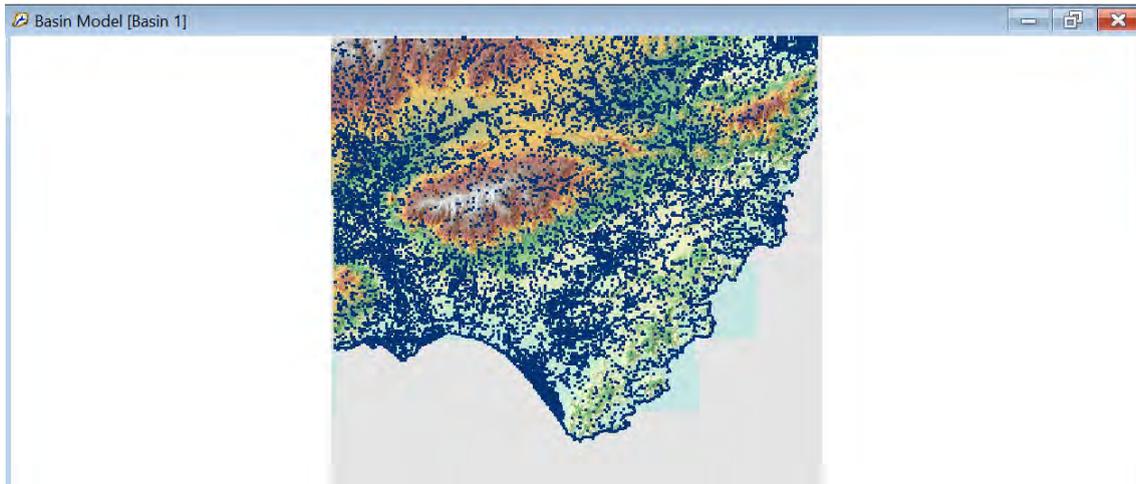


Figura 44 Resultado mostrando las posibles hondonadas.

Ahora debemos preparar el mapa de drenajes con la orden **Preprocess Drainage**

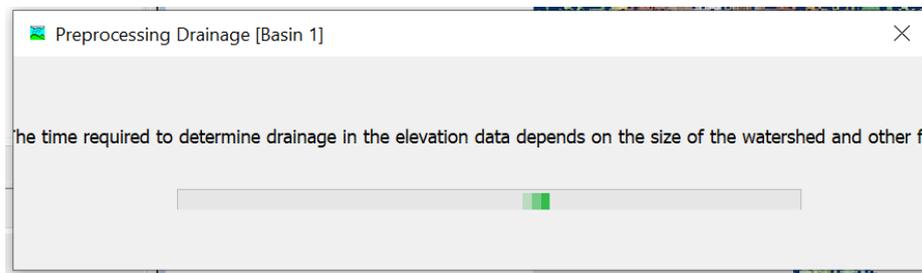


Figura 45 Advertencia sobre Preprocessing Drainage

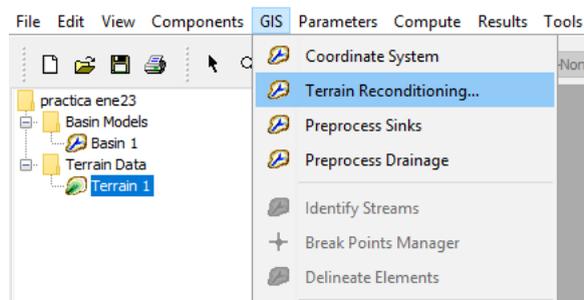


Figura 46 Menú de preprocesos

Ahora buscamos **Identify streams**, para crear bien los cauces. Nos pide que le indiquemos el área mínima que configura una subcuenca.

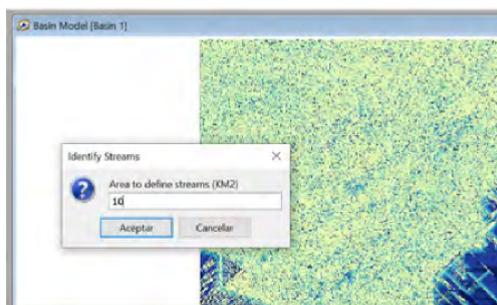


Figura 47 Área vertiente mínima para definir un cauce

Dependiendo de la superficie que le pongamos aparecerán más o menos subcuencas; en este ejemplo se han puesto 10 km<sup>2</sup> para definir una subcuenca. Y el resultado es parecido al anterior, pero más marcado. Con la imagen en su tamaño original es fácil seleccionar un punto fuera del cauce. Por esta razón conviene ampliar lo más posible el punto donde vamos a colocar el punto final de la cuenca. Pulsamos el icono que aparece como una cruz con un punto rojo para colocar el punto final de la cuenca.



Figura 48 Selección del punto final de la cuenca

Ahora podemos marcar **Delineate elements** para que el modelo construya las subcuencas. Hay que indicarle con que letra queremos que marque las subcuencas y los cauces y si queremos las uniones entre elementos, lo cual es interesante para luego ver las soluciones por separado.

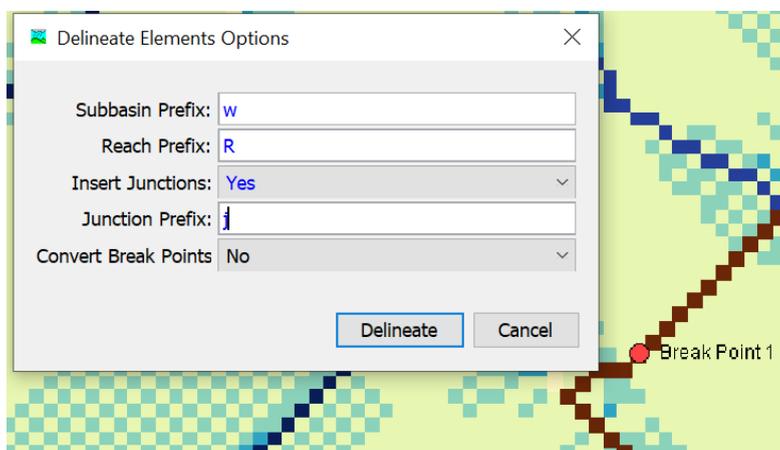


Figura 49 Indicar letras para nombrar los elementos de la cuenca.

Y ya aparece la cuenca dividida en trozos y con sus cauces correspondientes, Figura 50.

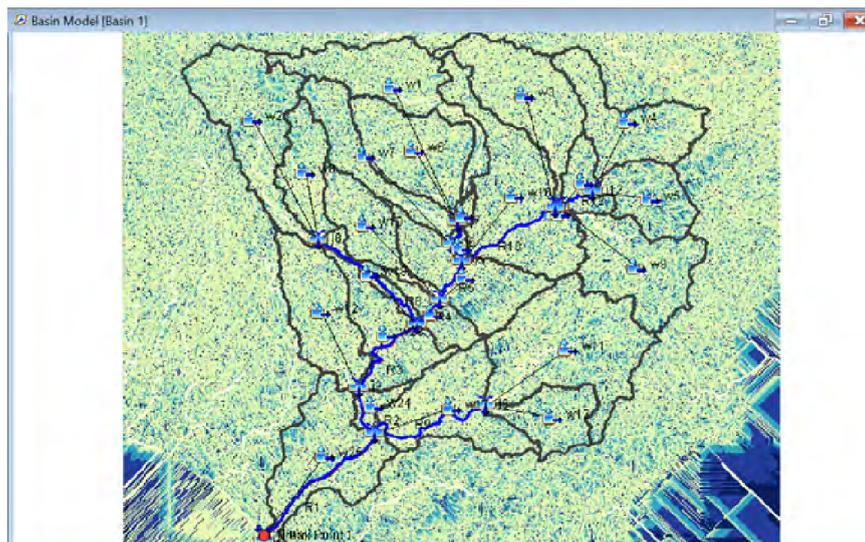


Figura 50 Vista de los elementos encontrados por el Modelo.

En este momento ya podemos desactivar la vista de casi todos los mapas (luego se pueden recuperar) para que el refresco de la pantalla sea más rápido. Conviene también exportar las subcuencas en forma *shp* para poder trabajar con QGIS en la tarea de poner los datos de cada elemento.

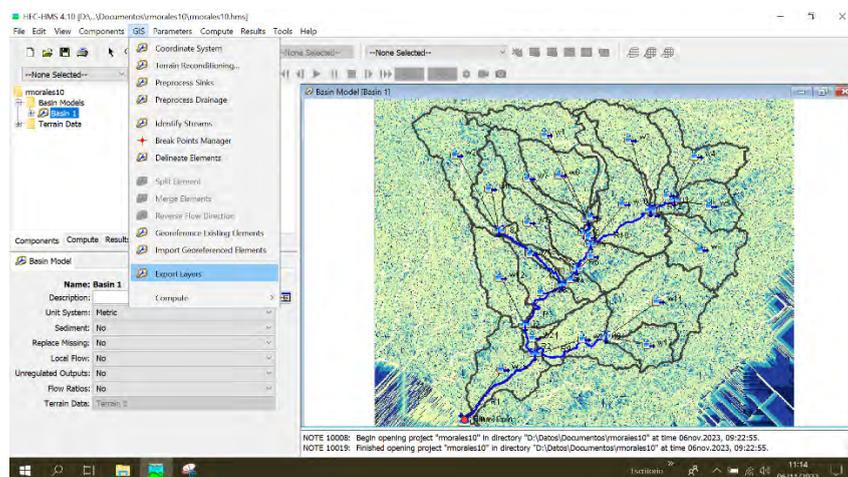


Figura 51 Exportación del mapa de subcuencas para su posterior proceso en QGIS.