

# **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

## **APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA AL MODELADO DE CAUDALES DE CRECIDA: EL RÍO VERO (HUESCA) Y EL EVENTO DE DICIEMBRE DE 1997**

***Borja Bravo Bizarro***

**Director: Sergio Domenech Zueco**

**Máster Universitario en Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio:  
Sistemas de Información Geográfica y teledetección**

**28 de Septiembre de 2012**

**Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio**

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

## **AGRADECIMIENTOS.**

En primer lugar quisiera agradecer a todas aquellas personas que de forma desinteresada han permitido que este proyecto haya sido realizado, ya sea aconsejando o facilitándome la información necesaria para su confección:

Acordarme de todos mis compañeros de Máster, de estas 25 personas que nos hemos sabido divertir juntos en los tiempos de bonanza, y que a su vez hemos remado juntos cuando ha tocado hacerlo. Muchas gracias a todos.

A Nacho Alcalde y Pilar Lisa de la Comarca de Somontano de Barbastro, así como Jesús del Archivo Histórico del Ayuntamiento de Barbastro por atenderme de forma amable y con total sinceridad a la hora de mi búsqueda de información gráfica sobre la crecida de Diciembre de 1997.

Al semanario El Cruzado Aragonés y en especial a su Departamento de Redacción por facilitarme la única información gráfica disponible de los efectos de la crecida de Diciembre de 1997 a su paso por Barbastro.

Por supuesto quisiera acordarme de Miguel Sánchez Fabre y Alfredo Ollero Ojeda, por haberme enseñado tantas cosas a lo largo de la licenciatura, haber accedido a dirigirme en su día mi proyecto de fin de carrera y por supuesto por haberme ayudado tanto durante esta gran aventura veraniega. Muchas Gracias a los dos.

También acordarme de José Luis Peña Monné, catedrático de la Universidad de Zaragoza, por su inestimable ayuda a la hora de analizar las litologías existentes en la cuenca para el cálculo del Número de Curva, así como sus enseñanzas a lo largo de la licenciatura en Geografía. Muchas Gracias.

Mención a parte tiene el nombre de Sergio Domenech Zueco. Director de proyecto y guía espiritual tras documentarme y basarme en su propio proyecto de fin de Máster realizado en 2009, no tengo palabras para agradecer todo lo que has hecho por mí a lo largo de este verano al resolver las más de mil dudas que te he planteado, tanto en las tutorías presenciales como por correo electrónico. MUCHAS GRACIAS en mayúsculas. Gran parte de este proyecto tiene tu nombre escrito.

Por último acordarme de mis familiares, amigos y resto de compañeros, cuyo apoyo e interés por el estado de la cuestión, así como por vuestro ofrecimiento a ayudarme en cualquier tarea, os hace también formar parte de este proyecto de fin de Máster.

## Resumen

*Las crecidas fluviales son fenómenos muy importantes que deben ser estudiados y controlados para minimizar los daños que éstas pueden provocar, tanto materiales como humanos. Incluso en las cuencas aforadas éstas pueden provocar grandes inundaciones, como en el caso del río Ebro en su tramo medio. Por ello, desde la implementación de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.) y su consiguiente evolución en el tiempo, son muchas las aplicaciones y técnicas que se han desarrollado con la finalidad de modelar y predecir dichas crecidas. En el presente estudio se va a aplicar el Método del Hidrograma Unitario para modelar con herramientas S.I.G. el caudal de crecida de la cuenca del río Vero (Huesca) durante un episodio ocurrido en Diciembre de 1997.*

**Palabras Clave:** S.I.G., hidrología, modelización, hidrograma unitario, caudales de crecida.

## Abstract

*The flash-floods are important phenomenons that have to be studied and controlled to get the objective of minimize the damage they can deal to both human beings and houses. Even in gauging basins, the flash-floods can deal serious damages, like in The Ebro River in its central stretch. This is the reason why, since the implementation of Geographic Information Systems (G.I.S) and its evolution through time, there are lots of techniques and applications who have been developed in order to give us models and predictions of those flood discharges. In this research the Unit Hydrograph Method is developed to model with G.I.S. tools the flood discharges of The Vero River basin (Huesca) while an episode of flash-flood happened on December 1997.*

**Key Words:** G.I.S., hydrology, to model, unit hydrograph, flash-floods, flood discharges.

## Índice

1.	Introducción .....	pág. 6
1.1.	Antecedentes y justificación.....	pág. 6
1.2.	Objetivos .....	pág. 7
2.	Metodología .....	pág. 8
3.	Caracterización de la cuenca del río Vero.....	pág. 9
3.1.	Situación de la cuenca .....	pág. 9
3.2.	Factores condicionantes del comportamiento hidrológico.....	pág. 11
3.3.	Elementos que caracterizan el comportamiento hidrológico .....	pág. 12
3.4.	La crecida de diciembre de 1997.....	pág. 15
4.	Modelización de caudales de crecida .....	pág. 17
4.1.	Creación, edición y acondicionamiento del MDE .....	pág. 17
4.1.1.	Edición de la red de drenaje .....	pág. 17
4.1.2.	Creación y reacondicionamiento del MDE .....	pág. 18
4.1.3.	Determinación de flujos superficiales .....	pág. 22
4.1.4.	Delineación de cauces y cuencas .....	pág. 23
4.2.	Método del hidrograma unitario (HEC-HMS) .....	pág. 25
4.2.1.	Modelo de cuenca y estimación de parámetros hidrológicos.....	pág. 26
4.2.2.	Entrada de datos en HEC-HMS .....	pág. 36
4.2.3.	Edición del modelo de cuenca en HEC-HMS.....	pág. 37
4.2.4.	Creación del modelo y especificaciones de control .....	pág. 39
5.	Resultados .....	pág. 45
6.	Conclusiones .....	pág. 48
	Bibliografía.....	pág. 49

## Índice de Figuras.

<b>Figura 1:</b> Río Vero a su paso por Barbastro.....	pág. 7
<b>Figura 2:</b> Esquema metodológico. Fuente: Elaboración propia.....	pág. 8
<b>Figura 3:</b> Localización de la cuenca del Vero. Fuente: Bravo, B. (2011).....	pág. 9
<b>Figura 4:</b> Reparto de las precipitaciones. Fuente: Bravo, B. (2011) y Plan Hidrológico del río Cinca .....	pág. 10
<b>Figura 5:</b> Cuenca del Vero y sus principales núcleos de población. Fuente: Elaboración propia.....	pág. 11
<b>Figura 6:</b> Mapa de usos del suelo. Fuente: Elaboración propia .....	pág. 12
<b>Figura 7:</b> Caudal Medio Mensual en Barbastro. Fuente: Bravo, B. (2011). .....	pág. 13
<b>Figura 8:</b> Caudal Medio Anual del Vero en Barbastro. Fuente: Bravo, B. (2011).....	pág. 14
<b>Figura 9:</b> Estiaje del Vero durante el verano de 1994. Fuente: Bravo, B. (2011).....	pág. 15
<b>Figura 10:</b> Mapa del Tiempo. 16/12/1997. Fuente: Ibisate <i>et al.</i> (2001).....	pág. 16
<b>Figura 11:</b> Errores de Topología .....	pág. 18
<b>Figura 12:</b> Curvas de nivel de Aragón a equidistancia de 100 m. ....	pág. 19
<b>Figura 13:</b> Elementos requeridos para la elaboración del MDE .....	pág. 19
<b>Figura 14:</b> Modelo TIN de la cuenca del Vero. ....	pág. 20
<b>Figura 15:</b> Resultado del MDE ráster de la Cuenca del Vero .....	pág. 21
<b>Figura 16:</b> Aspecto de la cobertura “fill_dem” .....	pág. 22
<b>Figura 17:</b> Aspecto del grid “Stream” superpuesto con la cuenca del Vero .....	pág. 23
<b>Figura 18:</b> Asistente de la herramienta Watershed Delineation.....	pág. 24
<b>Figura 19:</b> Vista de los shapefiles “Catchment” (en negro) y “River” (en verde).....	pág. 24
<b>Figura 20:</b> Menú Reclasify en ArcGIS 10 .....	pág. 27
<b>Figura 21:</b> Aspecto de “slope_reclass” .....	pág. 27
<b>Figura 22:</b> Aspecto de “lito_reclass” .....	pág. 29
<b>Figura 23:</b> Aspecto de “usos_reclass” .....	pág. 31
<b>Figura 24:</b> Aspecto de “Po” .....	pág. 33
<b>Figura 25:</b> Número de curva promedio de cada subcuenca .....	pág. 34
<b>Figura 26:</b> Cálculo del Muskingum-Cunge en HEC-geoHMS.....	pág. 35
<b>Figura 27:</b> Esquema de la cuenca.....	pág. 37
<b>Figura 28:</b> Modelo de cuenca en HEC-HMS .....	pág. 38
<b>Figura 29:</b> Tabla de pérdidas (SCS Curve Number) de la cuenca del Vero. ....	pág. 38
<b>Figura 30:</b> Tabla de datos del modelo Muskingum-Cunge.....	pág. 39
<b>Figura 31:</b> Localización de los pluviómetros en la cuenca del Vero. ....	pág. 40
<b>Figura 32:</b> Propiedades del pluviómetro A095 en HEC-HMS. ....	pág. 41
<b>Figura 33:</b> Hietograma estaciones A095 (izquierda) y P028 (derecha) en HEC-HMS. ....	pág. 41
<b>Figura 34:</b> Especificaciones de control del modelo .....	pág. 43
<b>Figura 35:</b> Hidrograma de crecida del Vero (Diciembre 1997).....	pág. 43
<b>Figura 36:</b> Río Vero en el Puente de Santa Fe (Izquierda) y a su paso por Barbastro (Derecha) durante la crecida. Fuente: El Cruzado Aragonés .....	pág. 44
<b>Figura 37:</b> Hidrograma de crecida. Elaboración propia. ....	pág. 45
<b>Figura 38:</b> Limnigrama del Cinca en Fraga del 14 al 24 de Diciembre de 1997. Fuente: Anuario de Aforos .....	pág. 46
<b>Figura 39:</b> Reconstrucción del limnigrama del episodio de 1997 en Barbastro. Fuente: C.H.E. ....	pág. 47

### Índice de Tablas.

<b>Tabla 1:</b> Precipitaciones en la cuenca del Ara (mm). Fuente: Ibisate <i>et al.</i> 2001 .....	pág. 16
<b>Tabla 2:</b> Modelos de HEC-HMS. Fuente: Domenech, S. (2009).....	pág. 25
<b>Tabla 3:</b> Tipos de suelo en España según el SCS: características a efectos del umbral de escorrentía .....	pág. 28
<b>Tabla 4:</b> Reclasificación de las litologías en la cuenca del Vero .....	pág. 29
<b>Tabla 5:</b> Reclasificación de los usos del suelo CLC en la cuenca del Vero.....	pág. 30
<b>Tabla 6:</b> Umbrales de escorrentía para la cuenca del Río Vero .....	pág. 32

## 1. INTRODUCCIÓN.

Las crecidas fluviales son uno de los fenómenos naturales más espectaculares que existen, ya que de forma natural se puede apreciar como un río aumenta su cauce y en un breve espacio de tiempo (desde horas hasta días) regresa a la normalidad, como si nada hubiera pasado.

Sin embargo éstas son uno de los fenómenos más peligrosos que existen, ya que no se puede pronosticar a ciencia cierta cuándo va a ocurrir una crecida ni la magnitud de la misma, tan solo especular y realizar todo tipo de predicciones probabilísticas sobre ellas, como el Ajuste de Gumbel, entre otras.

Ejemplos de crecidas en el ámbito Mediterráneo hay muchas, ya que en la zona de estudio de este proyecto (zona que se presentará posteriormente) son el principal riesgo existente, como sus consecuentes daños materiales y humanos. Crecidas con un amplio rango de magnitud y daños, desde algunas como las del río Ebro en su tramo medio, que por suerte apenas conllevan daños materiales y sobretodo pérdida de cultivos debido a las inundaciones, hasta otras crecidas más peligrosas, como la ocurrida en el Barranco de Arás (Biescas, Huesca) en 1996 y que acabó con la vida de 87 personas y dejando a 183 heridos.

Las crecidas fluviales pues son unos fenómenos bellos, pero también muy peligrosos que deben ser controlados y predichos con el fin de minimizar los daños que éstas provocan. Con este objetivo, y con la ayuda de las Tecnologías de la Información Geográfica (T.I.G.) se presenta el presente estudio, que tiene como finalidad la de modelar un episodio de crecida fluvial ocurrida en el río Vero, en Huesca en diciembre de 1997.

### 1.1. Antecedentes y Justificación.

Con la llegada de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son muchos los estudios que se han apoyado en ellos para la gestión y la planificación de las inundaciones, como los de Benito *et al.*, 1999; Díez Herrero, 2002; Losada *et al.*, 2004 o Ribera, 2004.

Además de todos estos estudios, en el ámbito de la investigación también se ha tratado el tema de las inundaciones, como es el caso de las tesis doctorales del propio Díez Herrero (2001) o Jiménez (2005). Pero al margen de todos estos trabajos, sin duda la obra que más ha influenciado a la hora de realizar el presente estudio es el estudio de Domenech, S. (2009), que ha servido como texto de apoyo y a su vez guía metodológica de trabajo.

El motivo de la elección de este tema es que el río Vero, ubicado en la provincia de Huesca, y que riega con sus aguas a la ciudad de Barbastro, es un río que como se verá posteriormente presenta una irregularidad marcada en su caudal, ya que presenta un módulo de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ , pero en sus crecidas puede presentar puntas de hasta  $70 \text{ m}^3/\text{s}$ , como la ocurrida en diciembre de 1997, u otras puntas históricas de hasta  $165 \text{ m}^3/\text{s}$ , en agosto de 1962 (Fuente: Anuario de Aforos).

Por este motivo, pese a ser una cuenca aforada y estar el río canalizado en la ciudad de Barbastro, es necesario estudiar y predecir los episodios de crecida de este río para minimizar los posibles daños que las crecidas puedan provocar tanto a los habitantes de Barbastro, como al resto de habitantes de la cuenca del río Vero. No obstante, la ciudad de Barbastro es el punto con más riesgo de la zona de estudio al encontrarse ésta en la desembocadura del río Vero al Cinca, y por ser el núcleo habitado de la cuenca con más población.



**Figura 1.** Río Vero a su paso por Barbastro.

## **1.2. Objetivo.**

El principal objetivo del presente estudio consiste en aplicar los Sistemas de Información Geográfica para caracterizar la cuenca del río Vero y conocer el comportamiento de la misma ante los episodios de crecida fluviales mediante la modelización de un episodio concreto ocurrido en diciembre de 1997.

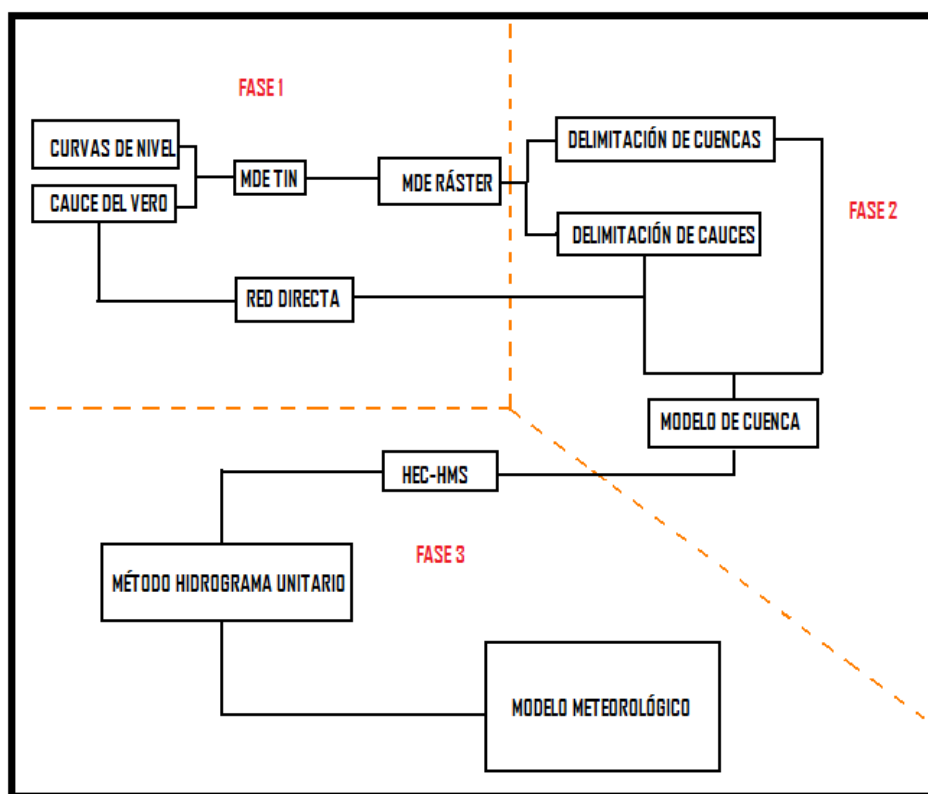


## 2. METODOLOGÍA.

Para la concepción del presente trabajo se siguieron tres fases de trabajo. En primer lugar se realizó mediante un SIG el levantamiento de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la cuenca a partir de datos vectoriales de las curvas de nivel, el perímetro de la cuenca y la traza del cauce del río Vero. La información requerida para ello se descargó del SITAR (Sistema de Información Territorial de Aragón) y del portal de geodatos de la Confederación Hidrológica del Ebro (C.H.E.). Así se consiguió un MDE en formato TIN (Triangular Irregular Network).

Una vez levantado el MDE, ya en formato ráster, el siguiente paso consistió en delimitar la red de drenaje y automatizar los cauces y cuencas existentes para la extracción de parámetros hidrológicos de la cuenca, mediante el uso de herramientas SIG como la topología, reclasificaciones, selección de entidades, etc.

Por último, el tercer paso consistió en exportar todo el modelo desde ArcGIS 10 (ESRI) al software HEC-HMS 3.3 (*Hidrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers*) a través del software ArcView GIS 3.2 (ESRI), desde el cual se modelizó el evento de crecida de Diciembre de 1997 con valores de precipitaciones reales registrados por la red SAIH Ebro.



**Figura 2.** Esquema metodológico. Fuente: Elaboración propia.

Al ser el presente un trabajo estrictamente metodológico, en este apartado se ha presentado una síntesis de la misma. En cada uno de los apartados siguientes se desglosan los procesos seguidos de forma mucho más detallada.

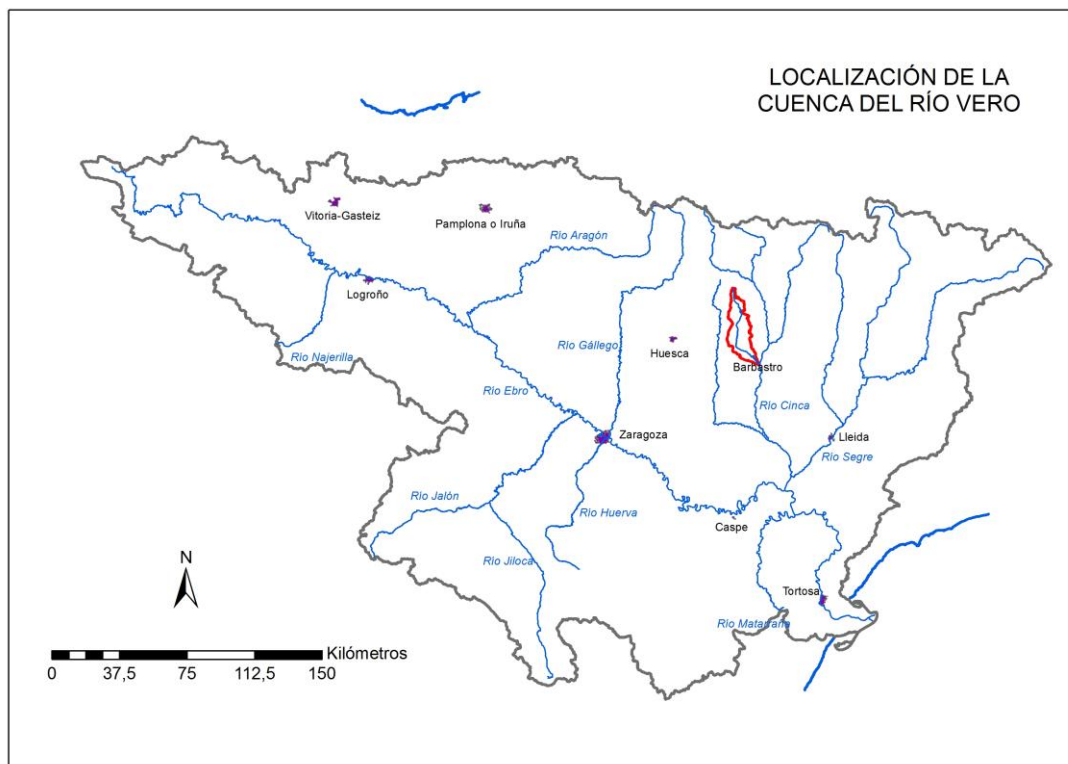
### 3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO VERO.

Antes de realizar la modelización de caudales de crecida en la cuenca es necesario conocer ciertos aspectos puntuales de la cuenca del río Vero para comprender mejor la respuesta hidrológica de la misma ante un evento de precipitaciones intensas. Así pues se va a hablar en primer lugar de los factores condicionantes del comportamiento hidrológico (pendientes, litología, usos del suelo y morfometría fluvial), después se hablará de los elementos que caracterizan el comportamiento hidrológico de la cuenca (caudalosidad, variación estacional, irregularidad inter-anual y fenómenos extremos). Por último se hablará del episodio ocurrido en diciembre de 1997, centrándose en su génesis.

#### 3.1. Situación de la cuenca.

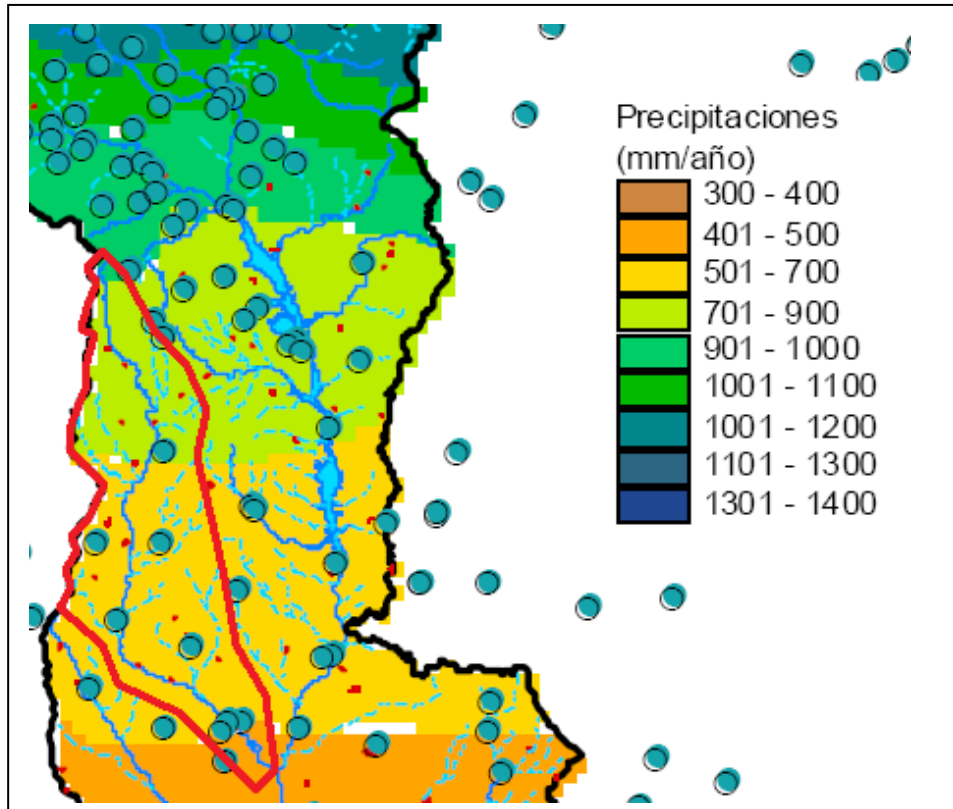
La cuenca del río Vero es una cuenca de 377,43 km<sup>2</sup> situada en el sistema del río Cinca, siendo delimitada por las cuencas del Cinca en sus vertientes Norte, Este y Sur, y por la cuenca del Alcanadre en su vertiente Oeste (Bravo, 2011). En términos estadísticos, habría que decir que la cuenca posee una longitud de 44,67 km y una anchura de 14,15 km, para estar delimitada por un perímetro de 99,78 km.

La cuenca no posee una excesiva altitud media, pero debido a su ubicación en el sector oriental de la Sierra de Guara, presenta como su cota de máxima altitud al pico Asba, de 1.431m, mientras que la altitud mínima es de 285m., medidos en su desembocadura en el río Cinca, por lo que salva un desnivel absoluto de 1.146 metros.



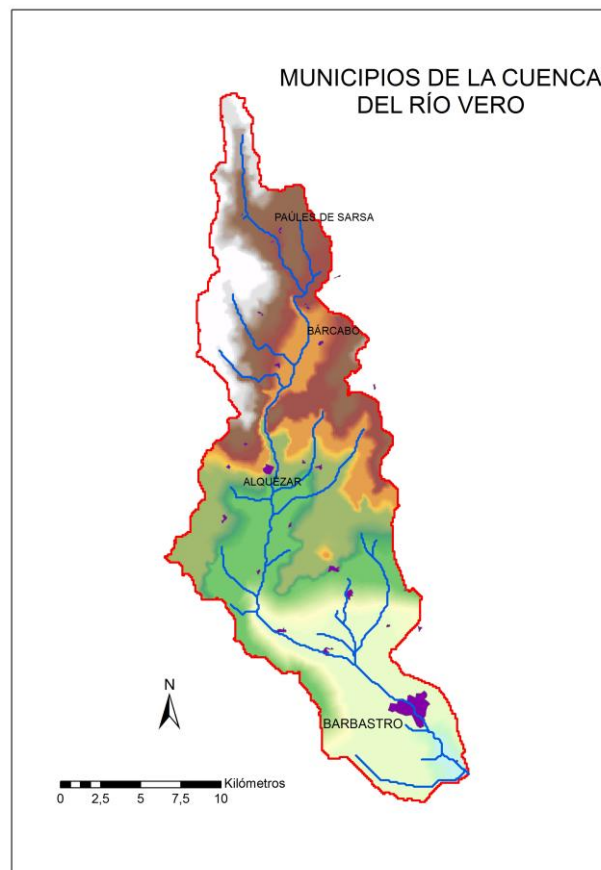
**Figura 3.** Localización de la cuenca del Vero. Fuente: Elaboración propia y C.H.E.

Debido a que en el presente estudio se va a modelar una crecida fluvial originada a partir de una tormenta, el siguiente aspecto a situar de la cuenca es el régimen de precipitaciones. Según los datos facilitados por el Plan Hidrológico del río Cinca, en la primera mitad de la cuenca el régimen de precipitaciones suele variar entre los 701 hasta los 900 mm/año, mientras que en la segunda mitad las precipitaciones varían entre los 501 hasta los 700 mm/año.



**Figura 4.** Reparto de las precipitaciones. Fuente: Bravo, B. (2011) y Plan Hidrológico del río Cinca.

Esto supone que, tal y como se verá más adelante en el apartado dedicado a la génesis de la tormenta que provocó la crecida que se va a modelizar en HEC-HMS, la riada se generó en la cabecera de la cuenca, y debido a la torrencialidad que ésta demuestra (ver apartado 3.2), la red de drenaje llevó enseguida el agua precipitada al río Vero, originando una punta de  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  registrada el 18 de Diciembre de 1997 en la estación de Aforo de Barbastro (Fuente: Anuario de aforos).



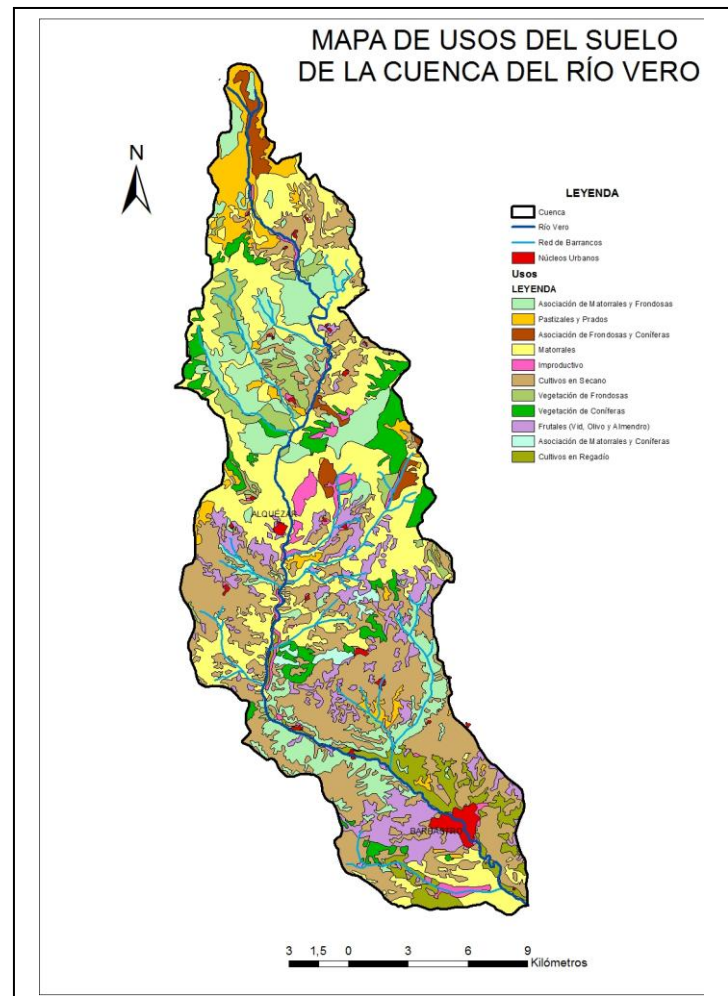
**Figura 5.** Cuenca del Vero y sus principales núcleos de población. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2. Factores condicionantes del comportamiento hidrológico.

Los principales factores que determinan el régimen fluvial del Vero son: topografía y pendientes, litología, usos del suelo y morfometría fluvial. Respecto a las pendientes, en la zona norte de la cuenca el río circula en una zona de altas pendientes, próximas al 30 % (Bravo, 2011). En la zona de Paúles la cuenca se abre a una gran llanura en su margen izquierda, con pendientes que descienden hasta el 10%, mientras que en la margen derecha el río se abre a zonas de pendiente media. En su tramo medio la cuenca alcanza la zona de los Cañones del Vero, con pendientes de más del 30%, hasta el municipio de Alquézar. Ya por último en su tramo bajo el río discurre entre pendientes del 10% hasta su desembocadura en el Cinca.

Litológicamente hablando, la zona norte de la cuenca está formada por materiales del Paleógeno, con presencia del Flysch en la zona oriental de este sector de la cuenca (Bravo, 2011). En el tramo medio de la cuenca aparecen conglomerados con algunas formaciones calcáreas. Por último en el tramo medio de la cuenca existen formaciones de areniscas y margas del Mioceno, así como un leve afloramiento de calizas del Cretácico.

Caracterizar los usos del suelo es más difícil debido a la variedad de morfologías existentes (Bravo, 2011). Generalizando, en la zona norte la cuenca está dedicada fundamentalmente a pastizales y prados, con presencia de leves formaciones de frondosas y coníferas. En el tramo medio del río las formaciones que predominan son las coníferas, intercaladas entre formaciones de asociaciones de matorrales y frondosas. Ya en el tercio bajo de la cuenca son los cultivos los que predominan, fundamentalmente de vid, olivo y almendro, así como cultivos de secano.

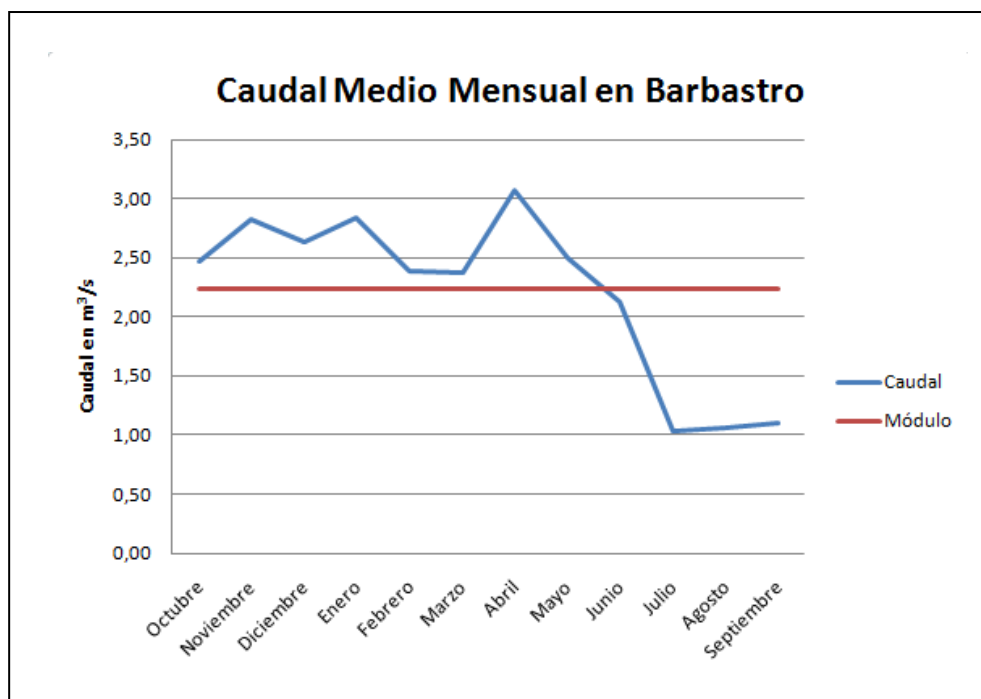


**Figura 6.** Mapa de usos del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la morfometría, la cuenca del río Vero es una cuenca grande, de 377,43 km<sup>2</sup> (Bravo, 2011), con una forma elongada. Por otra parte, el propio Vero mide 60,69 km con un índice de sinuosidad de 1,21. Por último, un elemento muy importante de la cuenca es su coeficiente de torrencialidad, que es de 3,99, un valor muy alto, lo que demuestra que la cuenca en sí presenta muchos tramos de cauce que son torrentes. De hecho, salvo el propio Vero, el resto de los elementos de la red de drenaje no suele llevar agua, tan sólo cuando hay fuertes precipitaciones, de ahí las grandes diferencias de caudal que presenta este río cuando sufre crecidas.

### 3.3. Elementos que caracterizan el comportamiento hidrológico.

Respecto a la caudalosidad del Vero, en la estación de aforos de Barbastro en las épocas mensuales de mayor caudal se registraron valores en torno a los 3 m<sup>3</sup>/s, mientras que en las épocas de menor caudal en Barbastro apenas se registraron caudales de 1 m<sup>3</sup>/s (periodo comprendido por los años hidrológicos 1965/66 y 2007/08).



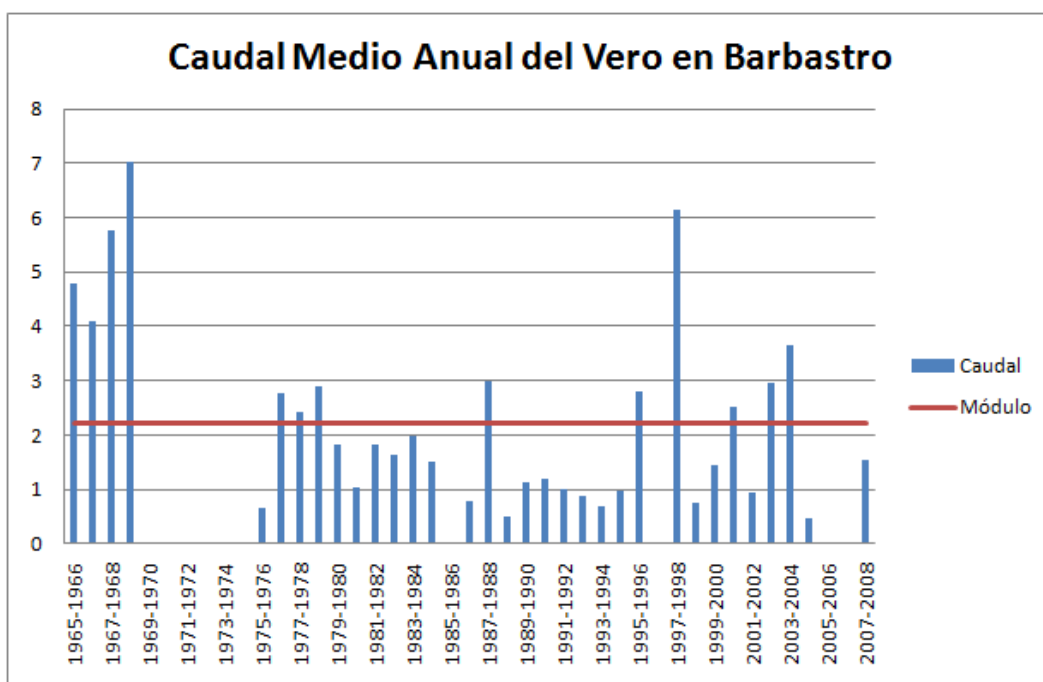
**Figura 7.** Caudal Medio Mensual en Barbastro. Fuente: Bravo, B. (2011).

En comparación con otros ríos del mismo ámbito, el Vero es un río poco caudaloso, ya que está clasificado como río Prepirenáico (Del Valle, J., *et al.* 2007) al igual que otros ríos como el Arba, pero sin embargo éste en Gallur presenta un módulo de  $10,8 \text{ m}^3/\text{s}$  frente a los  $2,20 \text{ m}^3/\text{s}$  del Vero en Barbastro (Bravo, B. 2011).

Respecto a la variación estacional del río Vero, como buen río Mediterráneo, presenta una irregularidad marcada por unos meses de verano (junio, julio, agosto y septiembre) con un caudal bastante bajo, frente a los meses otoñales e invernales donde el caudal es más elevado (ver figura 7).

El régimen fluvial es claramente pluviométrico, ya que las nieves son escasas en la zona y por lo tanto existe una escasa probabilidad de deshielos. El hecho de que los máximos caudales se extiendan hasta abril radica en que en primavera todavía hay precipitaciones en cabecera, al ser un clima mediterráneo, pero no tan seco como el de Zaragoza (Bravo, B: 2011).

El tercero de los elementos que caracterizan el comportamiento hidrológico de una cuenca fluvial es el de la irregularidad interanual. A continuación se presenta en la figura 8 el caudal medio anual en Barbastro para el periodo hidrológico 1965/66 y 2007/08:



**Figura 8.** Caudal Medio Anual del Vero en Barbastro. Fuente: Bravo, B. (2011).

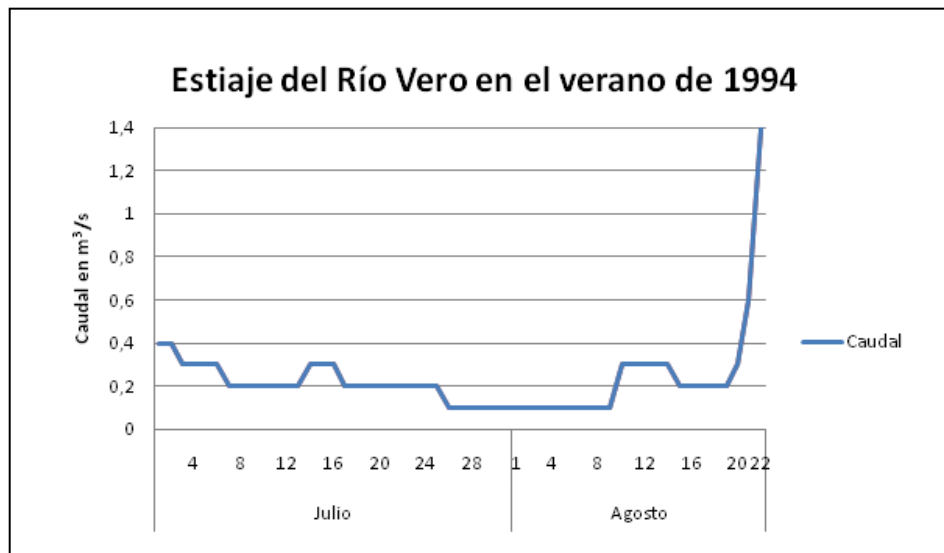
Durante los primeros años de periodo se registraron valores superiores a los 4 m<sup>3</sup>/s. posteriormente hubo un periodo importante de años sin datos comprendido entre los años hidrológicos 69/70 y 74/75, tras los cuales el caudal medio desciende. Posteriormente hay un estancamiento en torno a caudales de 1 m<sup>3</sup>/s, con años donde este caudal se incrementa hasta los casi 2 m<sup>3</sup>/s. lo que demuestra que el Vero es un río muy irregular en general, donde hay años en los que el caudal es relativamente bajo, con otros en donde el caudal es algo más elevado.

Ya por último, el cuarto elemento es el de los fenómenos extremos, es decir, las crecidas y los estiajes. Respecto a las crecidas hay que indicar algo muy importante, y es la configuración de la cuenca. En cierto modo el Vero presenta dos tramos altos, dos tramos medios y dos tramos bajos (Bravo, B. 2011), funcionando como dos cuencas dentro de una única cuenca fluvial.

De este modo, las crecidas fluviales en el Vero, tras el análisis y comparación de datos registrados en las estaciones de aforo de Lecina y Barbastro, se han podido clasificar en dos tipos: aquellas cuya punta estará registrada en Lecina y apenas habrá constancia de ella en Barbastro, y aquellas cuya punta estará registrada en Barbastro, con presencia o no de crecida en Lecina. Al ser ésta una investigación que va a tratar sobre crecidas no se va a profundizar en más detalle sobre ellas.

Respecto a los estiajes del Vero, analizado un estiaje cualquiera, ya se conocen todos, ya que el río no llega a secarse, pero casi. A continuación se presenta el comportamiento del río durante el verano de 1994:





**Figura 9.** Estiaje del Vero durante el Verano de 1994. Fuente: Bravo, B. (2011).

Tal y como se aprecia en la figura 9, durante los meses de Julio y gran parte de Agosto el caudal registrado en el Vero es inferior a  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Si se tiene en cuenta que el módulo en Barbastro es de  $2,20 \text{ m}^3/\text{s}$ , se está hablando de que el río reduce su caudal 5 veces. Las condiciones climáticas lo permiten, ya que los veranos en este sector son muy secos, con escasa presencia de precipitaciones, si bien éstas aparecen en forma de tormentas torrenciales.

### 3.4. La crecida de diciembre de 1997.

El fenómeno que se modeló con HEC-HMS es el que ocurrió entre los días 18 y 25 de diciembre de 1997. Esta crecida no sólo ocurrió en la cuenca del Vero, sino también en otros ríos del Alto Aragón como el Ara, siendo originadas por las fuertes precipitaciones que se registraron durante esos días en la zona.

En el caso del Ara la crecida fue incluso más impresionante, ya que se rompió la presa-ataguía del embalse de Jánovas (Huesca) provocando una punta de  $1.551 \text{ m}^3/\text{s}$  y que alcanzó los 4 m de altura en la estación de aforo de Boltaña (Ibisate *et al.* 2001).

La situación atmosférica del evento fue la siguiente: El día 16 de diciembre una borrasca de 992 mb (Figura 7) estaba situada al Oeste de la Península Ibérica, con la presencia de un frente en la zona pirenaica. Los vientos eran de componente Sudeste. En el mapa de altura de 850 mb también aparece esa borrasca, que se introdujo hacia el interior de la península.

El frente por su parte provocó precipitaciones que comenzaron entre los días 15 y 16 de diciembre, siendo éstas en forma de nieve en cotas superiores a los 1500 m (no nevó en la cuenca del Vero). El día 17 a medio día un nuevo frente, esta vez cálido, provocó de nuevo precipitaciones fuertes en toda la zona. Por ejemplo en Aínsa se registraron 112 mm, en Torla 75,6 mm o los 99 mm de Broto (Ver tabla 1).

Las temperaturas fueron bastante cálidas para la época invernal a la que se corresponde (Ibisate *et al.* 2001), registrándose máximas de más de  $10^\circ\text{C}$  en la primera quincena del mes en la estación de L'Aínsa. Sin embargo, las temperaturas disminuyeron levemente con el paso de los frentes. La hipótesis que se baraja (Ibisate *et al.* 2001) es que se produjera un deshielo en las zonas altas de la cuenca del Ara, factor que no afectó al Vero, pero sin embargo sí que pudo afectar el deshielo de las heladas que se produjeron durante la noche, además de las fuertes precipitaciones, provocando el repentino aumento de caudal de los ríos.

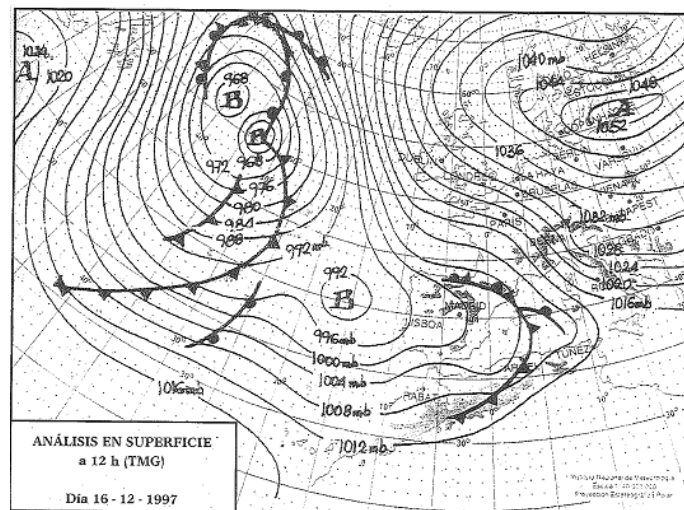


**Tabla 1.** Precipitaciones en la Cuenca del Ara (mm). Fuente: Ibisate *et al.* 2001

Localidades	16 de diciembre	17 de diciembre	18 de diciembre
L'Aínsa	68,4	112	16,3
Torla	80,4	75,6	11
Broto	61,5	99,7	14
Boltaña	85,4	101,2	21,9
Fiscal	82,9	87,1	18,6
Campodarbe	55,5	88,5	15,1
Latorrecilla	88,2	94	15,3

En la Tabla 1 se han mostrado las precipitaciones ocurridas los días 16, 17 y 18 de diciembre en algunas de las localidades de la cuenca del Ara más próximas a los límites de cabecera de la cuenca del Vero (Boltaña, Aínsa y Fiscal) así como otras localidades en las que las precipitaciones fueron importantes.

Si bien es cierto que todos estos datos no reflejan lo que ocurrió directamente en la cuenca del Vero ya que no son lugares de la cuenca, sí que se pueden emplear como agravio comparativo para poner en situación lo que pudo ocurrir en el Vero durante estos días.



#### 4. MODELIZACIÓN DE CAUDALES DE CRECIDA.

Una vez presentada la cuenca del Vero, explicados los objetivos del estudio, mostrados los antecedentes de otros estudios similares al que aquí se está desarrollando, llegó el momento de exponer el tema principal del mismo, es decir, modelizar los caudales de crecida a través de los SIG.

Tal y como se adelantó ya, el primer paso para modelar estos caudales de crecida fue el de crear un MDE (Modelo Digital de Elevaciones) adecuado, válido y que cumpla los requisitos necesarios para poder trabajar con él y obtener los resultados idóneos.

Una vez obtenido el MDE, llegó el momento de determinar los flujos superficiales (definir la dirección por la que la arroyada superficial discurrirá por la cuenca) y por último delinear automáticamente los cauces y cuencas que se generaron para el trabajo con la herramienta HEC-GeoHMS 1.1 para ArcView GIS 3.2.

Tras esto comenzó la segunda parte del proceso, la importación del modelo a HEC-HMS y la introducción de los datos y parámetros que tuvieron como resultado el modelo hidrometeorológico de caudales de crecida, a través del método del hidrograma unitario.

##### 4.1. Creación, edición y acondicionamiento del MDE.

###### 4.1.1. Edición de la red de Drenaje.

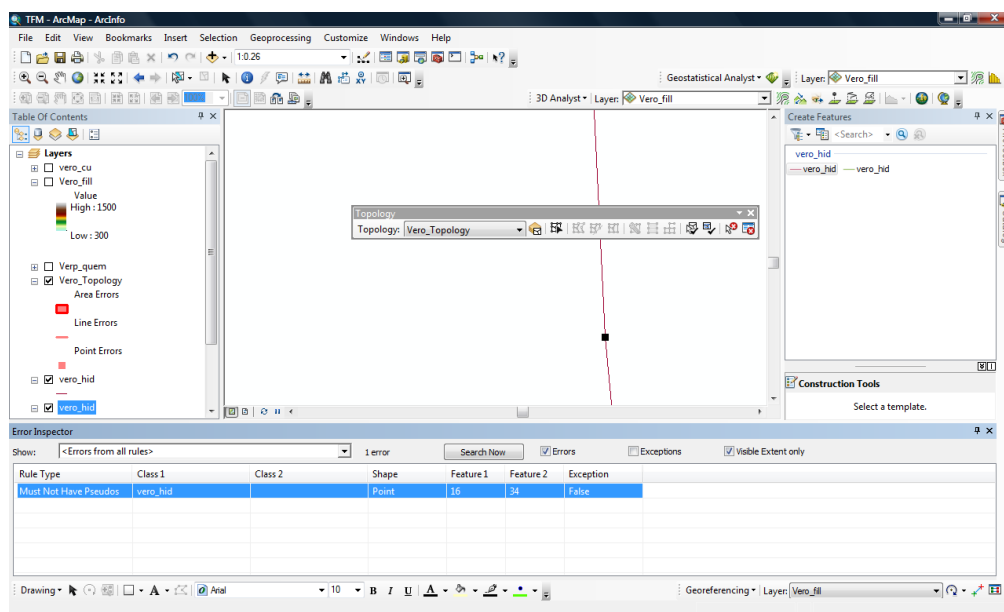
La edición de la red de drenaje (descargada de la C.H.E.) es un elemento muy importante, casi vital, a la hora de simular nuestro evento, ya que por ella debe circular el caudal generado por las precipitaciones del evento. Para que el caudal circule como debe, hubo que asegurarse que la red estaba perfectamente conectada y que los nodos y aristas que la conforman estaban perfectamente unidos.

Esto se realizó editando y generando reglas topológicas que asegurasen el continuo en la red hidrológica. En primer lugar se utilizó el comando *geoprocessing / clip* para “cortar” los segmentos de cauce correspondientes a la red hidrológica de la cuenca, y posteriormente se incluyó ésta en una geodatabase denominada “Vero” en la que se importó esta cobertura de la red hidrológica.

Las reglas que se especificaron fueron las siguientes:

- *Must not have pseudonodes.*
- *Must not Overlap.*
- *Must not Self-Overlap.*

La primera de las reglas determinó que cada una de las líneas que conforman la red hidrológica conectará al final con al menos dos líneas, eliminando así los nodos innecesarios. La segunda de las normas indicó que las líneas no se deben superponer las unas con las otras, mientras que la tercera norma adjuntó que ninguna de las líneas que conforman la red no se superponga consigo misma.



**Figura 11.** Errores de Topología.

El único error que apareció fue el de los pseudonodos, por lo que se corrigió fácilmente uniendo el tramo al que se le eliminaba el pseudonodo al tramo de cauce más grande. Posteriormente se validó la topología y se exportó el dataset a un nuevo shapefile denominado “Vero\_topo”.

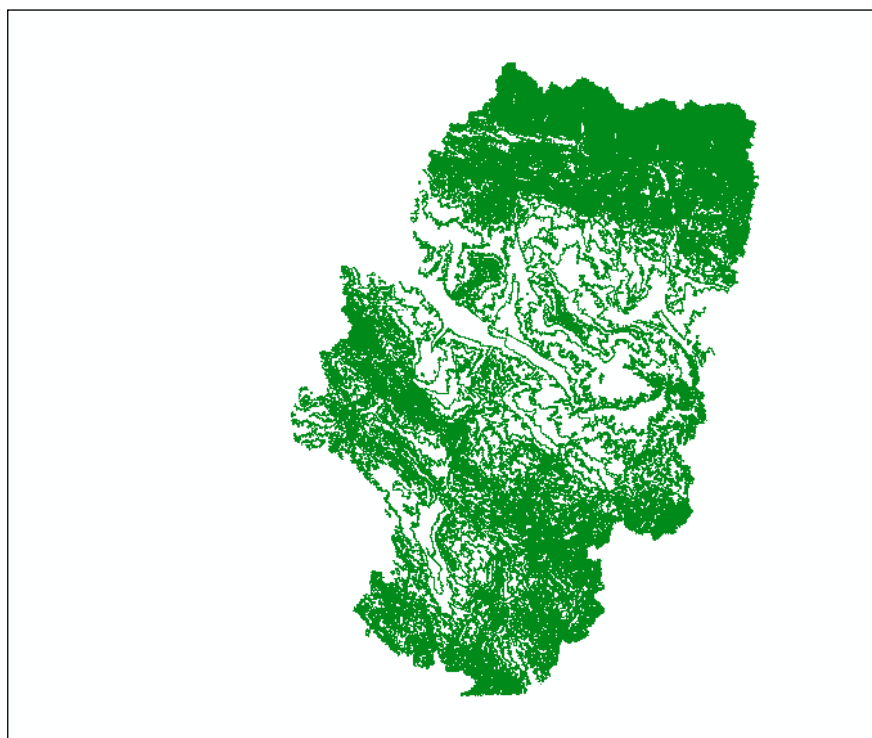
#### 4.1.2. Creación y reacondicionamiento del MDE.

Una vez validada la topología de la red de drenaje se creó el propio MDE. Para ello se utilizaron dos elementos muy importantes: las curvas de nivel y la red hidrológica. A diferencia de lo realizado por Domenech (2009) cuando trabajó con los datos obtenidos de las hojas del Mapa Topográfico Nacional (MTN) a escala 1:25.000 con una equidistancia de 10 m, en la cuenca del Vero se optó por emplear una escala mayor, con unas curvas de nivel con equidistancia de 100 m. El motivo fue la adaptación a la escala de trabajo, ya que la cuenca del Sosa tiene una superficie de 180.000 km<sup>2</sup> aproximadamente, frente a los más de 300.000 km<sup>2</sup> de la cuenca del Vero, por lo que tal grado de detalle en las curvas de nivel supondría grandes volúmenes de información a procesar con un SIG.

Por otra parte, respecto a la red hidrológica, se accedieron a los datos facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (C.H.E.) para una descarga de toda la red de la cuenca a escala 1:50.000.

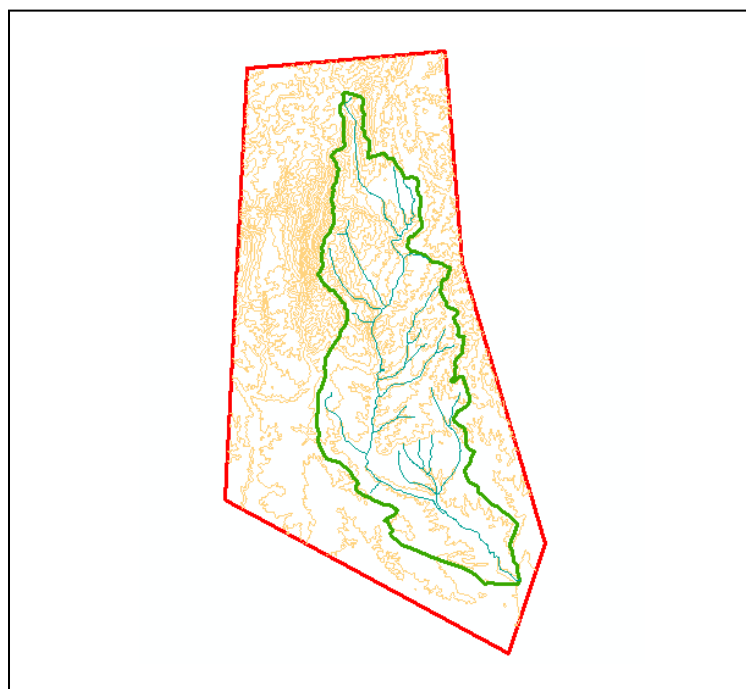
Una vez presentados los datos principales y antes de montarlos en el SIG, hubo que introducir dos nuevas coberturas más en formato \*.shp: el marco y la cuenca.

La cuenca es una cobertura, también obtenida de la C.H.E., que conforma los límites de la cuenca del río Vero. La cobertura “marco” es una capa, de un tamaño mayor al de los límites de la cuenca, que sirvió como plantilla para recortar las curvas de nivel y los ríos, ya que sólo interesaba trabajar con una pequeña porción del terreno, no con toda la superficie de la cobertura \*.shp original.



**Figura 12.** Curvas de nivel de Aragón a equidistancia de 100 m.

Una vez montadas las coberturas en el SIG y delimitado el marco, mediante las herramientas de *geoprocessing / clip*, se “cortaron” las curvas de nivel al tamaño del marco y la red hidrológica al tamaño de la cuenca, siendo denominadas las coberturas “vero\_cu” la cuenca; “vero\_alt” las curvas de nivel; “redhidro” la red hidrológica y por último “Marco” la capa marco:



**Figura 13.** Elementos requeridos para la elaboración del MDE.

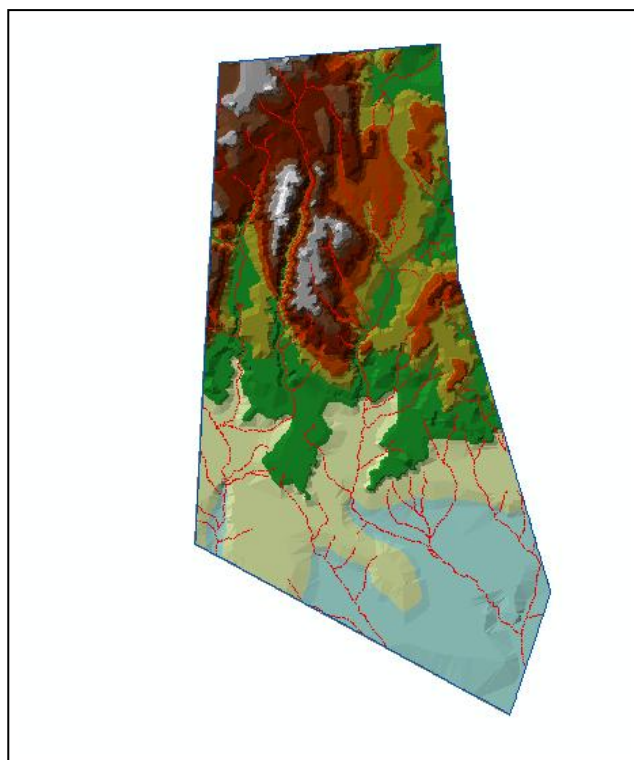
Previo al levantamiento del MDE, se ha explicado que se generó una geodatabase denominada “Vero” a la cual se exportaron cada una de estas cuatro coberturas generadas. A todos los

elementos de la geodatabase hubo que dotarles de un sistema de coordenadas para que el SIG pudiera georreferenciarlos. El sistema de proyección empleado fue el Universal Transversal de Mercator (UTM), siendo el sistema de referencia empleado el European Datum 50 UTM Zona 30 Norte, si bien el sistema oficial actualmente es el ETRS89.

Una vez preparada toda esta información, se levantó propiamente el MDE, mediante el uso de la herramienta *ArcToolBox / 3D Analyst tools / TIN Management / Create TIN*.

En el asistente se seleccionaron las tres entidades (curvas de nivel, límites del MDE y la red hidrológica), asignándole a cada una de ellas el tipo de información que se empleó a la hora de crear el modelo.

Para las curvas de nivel se seleccionó la opción *Mass Points* ya que ArcGIS 10 lo que hace es tomar los vértices que forman una línea para la triangulación y no la línea en sí (Domenech, S. 2009). Respecto a los límites del MDE se empleó la opción *Hard Clip* para impedir que el programa calculase elementos más allá de las propias líneas, y por último para la red hidrográfica se seleccionó la opción *Soft Line* ya que los ríos representan rupturas de pendiente. El resultado se denominó “TIN\_Vero”. El MDE creado es una estructura de datos TIN (*Triangular Irregular Network*) pero este modelo de relieve no es el apropiado para la modelización hidrológica de caudales.



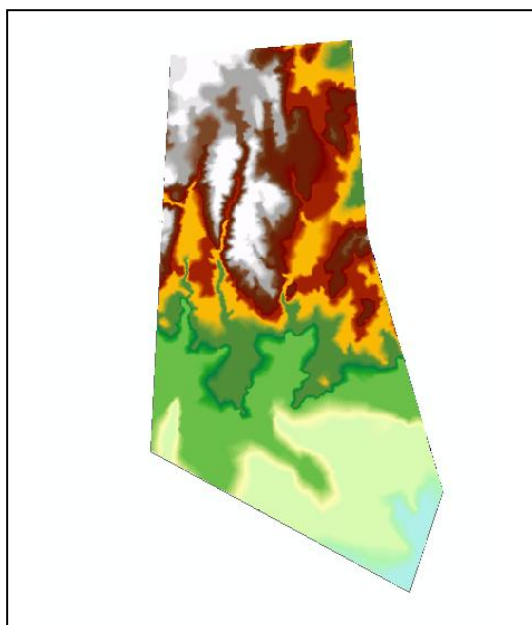
**Figura 14.** Modelo TIN de la cuenca del Vero.

Tras crear el modelo TIN de la cuenca, el siguiente paso fue el de su conversión a ráster. Un modelo ráster es un modelo continuo de datos expresados en píxeles, celdas, que favorece la velocidad del procesamiento de los mismos, así como la aplicación de numerosas herramientas de análisis hidrológico. Para su “rasterización” bastó con aplicar la función *ArcToolBox / Spatial Analyst tools / Conversion / From TIN to RASTER*.

En el asistente de ArcGIS 10 hubo que introducir en primer lugar el TIN recién creado y a continuación el nombre del fichero de salida, ya en formato ráster. El siguiente parámetro fue el tipo de dato, siendo *Float* la opción empleada. El siguiente elemento a introducir fue el método de interpolación, que se dejó por defecto, es decir, Linear.

El penúltimo de los parámetros es el más importante: el tamaño de celda. A diferencia de lo realizado por Domenech (2009) quien utilizó un tamaño de celda de 10x10 m, en este caso se empleó un tamaño de celda de 100x100, acorde a la equidistancia entre las curvas de nivel de la cuenca del Vero.

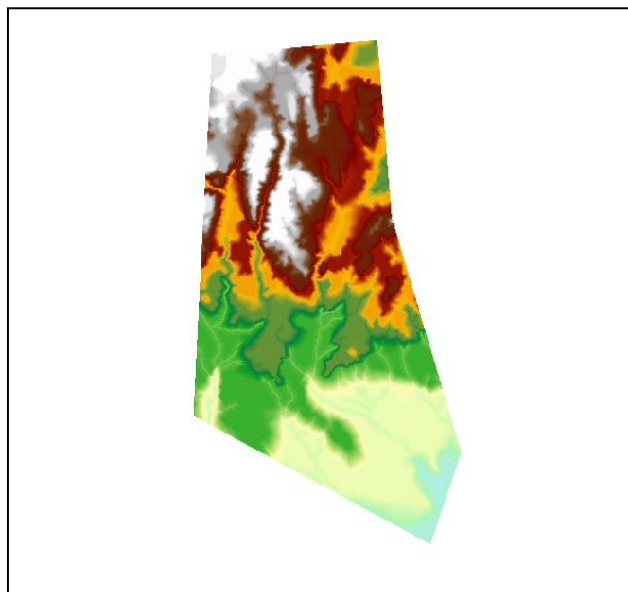
Por último se pudo agregar un factor Z que ponderaría los resultados del MDE ráster, exagerando más o menos el resultado, en función de dicho factor. En este caso se desechó su uso.



**Figura 15.** Resultado del MDE ráster de la cuenca del Vero.

Con esto, el modelo ráster ya estaba disponible para ser empleado en la simulación de nuestro evento, sin embargo se pudo mejorar más acondicionándolo. Es probable que dentro del MDE se generasen espacios de menor altitud sin drenaje, es decir, zonas endorreicas. Si bien éstas pueden existir en la realidad, a la hora de simular nuestro modelo pueden perjudicar los resultados, de ahí se suprimieran.

El primer paso para realizar el acondicionamiento consistió en usar las *ArcHydro Tools / Terrain Preprocessing / DEM Manipulation / DEM Reconditioning* de ArcGIS 10, superponiendo sobre el MDE ráster los cauces, creando a modo de “quemado” un nuevo ráster denominado “Vero\_quem”. Una vez hecho esto, se aplicó la extensión *ArcHydro Tools / Terrain Preprocessing / DEM Manipulation / Fill sinks*, para eliminar las zonas endorreicas anteriormente citadas, creando un ráster nuevo denominado “fill\_dem”



**Figura 16.** Aspecto de la cobertura “fill\_dem”.

#### 4.1.3. Determinación de flujos superficiales.

El siguiente apartado fue esencial en el estudio ya que consistió en la modelización de los flujos superficiales de la cuenca. Al estar modelando un episodio de crecida hidrológica, se determinó en qué dirección discurría el flujo superficial una vez se haya saturado el suelo de agua de lluvia. Estos flujos, de forma lógica deben discurrir en el sentido de la máxima pendiente siendo las celdas de mayor elevación las que drenen en otras de una elevación menor.

Para ello en primer lugar se cargó el MDE acondicionado en un nuevo proyecto de ArcView GIS 3.2, previo haber cargado la extensión HEC-GeoHMS 1.1 en la ventana titulada “Main View”. HEC-GeoHMS 1.1 es una herramienta que permite tratar la información generada en ArcGIS 10 y prepararla para su importación a HEC-HMS 3.3 en forma de un nuevo proyecto. Su empleo en esta parte del estudio consistió en el de crear todas las coberturas requeridas por HEC-HMS 3.3 para modelizar el hidrograma de crecida.

Con el MDE acondicionado cargado, se empleó la función *Terrain Preprocessing / Flow Direction*. La capa ráster resultante se denominó “FlowDir”, que es una capa en formato ráster que muestra la dirección a la que drena cada una de las celdas que componen el modelo, siendo posibles las ocho direcciones principales de la rosa de los vientos (N, S, W, E, NW, NE, SW y SE).

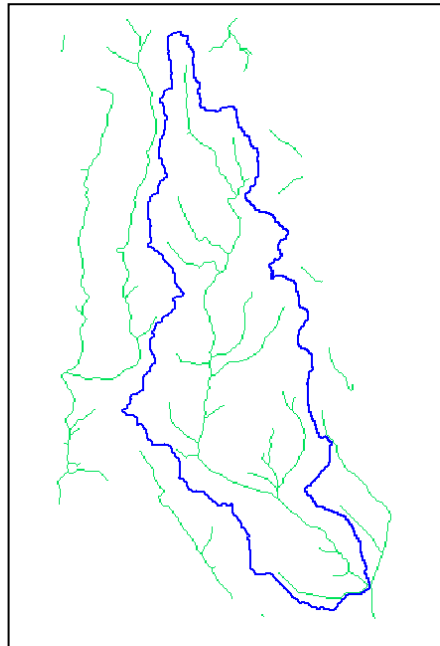
Tras esto se aplicó la función *Terrain Preprocessing / Flow Accumulation* para determinar el flujo acumulado aguas arriba de un determinado pixel, que se correspondió con la desembocadura del Vero. Esta nueva capa se nombró como “FlowAcum”.

El resultado de aplicar esta función, aparte de delimitar el lugar donde se acumularon los flujos (los valores más elevados se corresponden a los cauces fluviales), fue el de delimitar todas las celdas que funcionan como un cauce.

#### 4.1.4. Delineación de cauces y cuencas.

Hasta ahora se realizó un MDE, acondicionarlo, calcular la dirección de los flujos y delimitar donde se acumularon los flujos. Sin embargo algunas de las celdas que se determinaron como cauce no cumplen esta función, motivo por el cual se delinearon los cauces, así como las cuencas que conforman la cuenca del Vero.

Para delinear los cauces bastó con aplicar la función *Terrain Preprocessing / Stream Definition* dando como resultado el grid denominado “Stream”.



**Figura 17.** Aspecto del grid “Stream” superpuesto con la cuenca del Vero.

Tras delimitar todos los cauces, el siguiente paso consistió en dividirlos en segmentos o “subcauces”, paso necesario para la subdivisión de la cuenca en subcuencas. El proceso para esta división fue la de aplicar la herramienta *Terrain Preprocessing / Stream Segmentation* incluida también en HEC-GeoHMS 1.1, utilizándose un criterio similar al de Strahler (1952) para la división de los cauces.

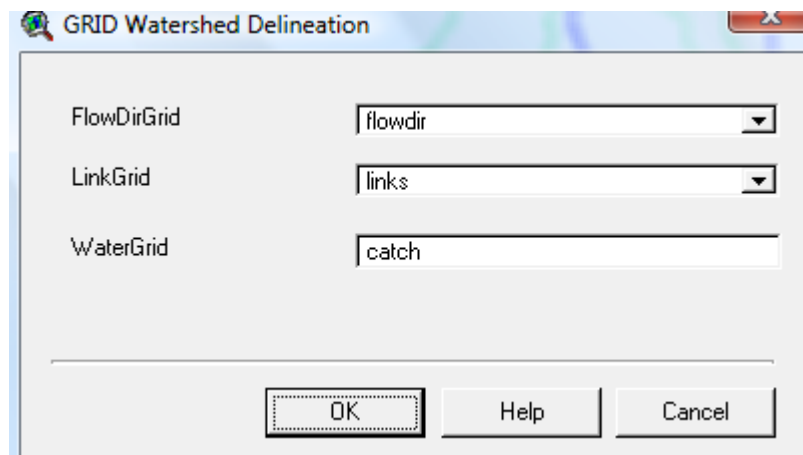
Strahler (1952) definió que un tramo de río es considerado como aquel segmento de cauce que no posee ningún afluente, denominándose como tramo de orden “N”, comenzando la clasificación por norma general en la cabecera del río bajo la denominación de orden 1 para el primer tramo. Así pues, cuando se juntan dos tramos del mismo orden el resultado es un tramo de orden inmediatamente superior. Si un tramo de un orden N recibe un afluente de un orden N-1, permanece el orden N.

Si bien en el presente estudio no se realizó una jerarquización como la de Strahler, sí que se consideró como punto de partida para la división de los cauces la confluencia de dos segmentos de cauce en una capa grid denominada “links”.

El siguiente paso en el proceso fue delimitar las subcuencas de la cuenca del Vero. Para ello se aplicó la herramienta *Terrain Preprocessing / Watershed Delineation*.



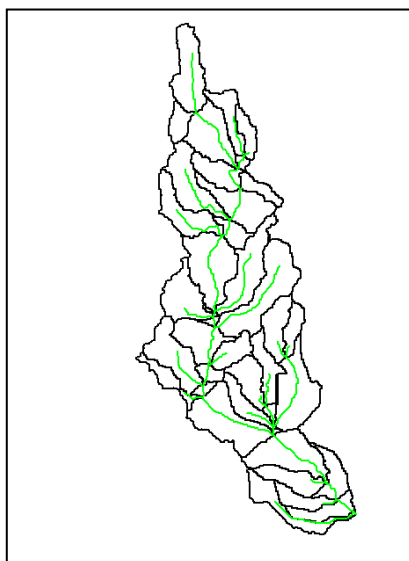
En el asistente de HEC-GeoHMS 1.1 se determinaron tres parámetros: en primer lugar la capa grid que contiene las direcciones de flujo, es decir, “FlowDir”, en segundo lugar el grid donde se segmentaron los cauces, es decir, “Links”, y por último el nombre del grid de salida, que se denominará “Catch”, tal y como muestra la figura 18.



**Figura 18.** Asistente de la herramienta Watershed Delineation.

El resultado fue la delimitación de 114 subcuencas. Finalmente se transformaron las cuencas y los cauces a formato vectorial y se eliminaron aquellos elementos que no formaban parte de la cuenca del Vero, ya que se ha utilizado un marco de trabajo mucho más amplio que los límites de la propia cuenca.

Para convertir cuencas y cauces a modelos de datos vectoriales se aplicaron las funciones *Terrain Preprocessing / Watershed Polygon Processing* (para las cuencas) y *Terrain Preprocessing / Stream Segment Processing* (para los cauces). El resultado de esto fueron dos coberturas denominadas “Catchment” y “River”. Tras ello, se eliminaron las cuencas y cauces que no pertenecían a la red fluvial del río Vero. El resultado de esta operación se muestra en la figura 19.



**Figura 19.** Vista de los shapefiles “Catchment” (en negro) y “River” (en verde).

#### 4.2. Método del Hidrograma Unitario (HEC-HMS).

Una vez que se subdividió la cuenca del Vero en 44 subcuencas y subcauces respectivamente, se trabajó con ellos en HEC-HMS. Del mismo modo, durante este proceso también se generaron varios grids en formato ráster, de los cuales los más importantes (de cara al trabajo en HEC-HMS) fueron el de la dirección de flujo, los flujos acumulados, los cauces y los segmentos de la red fluvial.

HEC-HMS en su versión 3.3 es un software libre (*Hydrologic Modeling System*) que permitió desarrollar el modelo hidrometeorológico para obtener los caudales de crecida para el episodio estudiado, la crecida de diciembre de 1997.

HEC-HMS está dividido en tres módulos (Domenech, S. 2009): el primer módulo es el “modelo de cuenca” en el que se estructuraron los elementos hidrológicos de la cuenca. El segundo módulo es el “modelo meteorológico”, en el que se almacenaron y gestionaron la información de las precipitaciones. El tercer módulo es el de las “especificaciones de control”, en el que se definieron algunos de los parámetros de la modelización como es la duración del evento.

Los métodos que se usaron para trabajar con HEC-HMS fueron el del histograma (real o sintético) para la precipitación, el del método del número de curva para las abstracciones iniciales, el del hidrograma unitario para el análisis de la escorrentía y el de Muskingum-Cunge estándar para la propagación y laminación de la crecida por la red de drenaje, los mismos que se utilizaron en la cuenca del Sosa (Domenech, S. 2009) y que sirven como guía para la aplicación del modelo en el Vero, ya que la finalidad en ambos estudios fue la misma.

A continuación se presentan (ver Tabla 2) todas las posibilidades de modelos que ofrece HEC-HMS, (Domenech, S; 2009).

**Tabla 2.** Modelos de HEC-HMS. Fuente: Domenech, S. (2009)

PRECIPITACIÓN	ABSTRACCIONES INICIALES	ESCORRENTÍA	PROPAGACIÓN Y LAMINACIÓN
<b>Histograma (real o sintético)</b>	Función de pérdidas inicial y constante	Onda cinemática y/o Muskingum-Cunge	Desfase simple
Ponderación de estaciones de lluvia	Green & Ampt	Hidrograma unitario	Onda cinemática
Inverso de la Distancia	<b>Método del número de curva (SCS)</b>	<b>Hidrograma unitario (SCS)</b>	Puls modificado
Precipitación distribuida	Función de pérdidas déficit y constante	Hidrograma unitario (Clark)	Muskingum
Histograma sintético por una lluvia de periodo de retorno T	Valoración de la humedad del suelo	Hidrograma unitario (Snyder)	Muskingum-Cunge 8-puntos
Hidrograma sintético (SCS)			<b>Muskingum-Cunge estándar</b>
Tormenta de proyecto estándar (aplicable en EEUU)			

#### 4.2.1. Modelo de cuenca y estimación de parámetros hidrológicos.

Tras presentar el software HEC-HMS llega el momento de empezar a preparar los datos necesarios para la importación e implementación de los datos. En primer lugar se preparó el modelo de cuenca, la importación de la cuenca creada en ArcGIS 10 a HEC-HMS 3.3, y después se calcularon algunos parámetros hidrológicos necesarios para trabajar con HEC-HMS.

Para realizar el modelo de cuenca, en primer lugar hubo que crear una cobertura denominada “wshedmg.shp”, un agregado de las subcuencas. Este proceso fue obligatorio para poder crear un nuevo proyecto con la extensión HEC-GeoHMS 1.1 en ArcView GIS 3.2. Una vez creado el proyecto, hubo que definir el “outlet” o punto de desembocadura de la cuenca.

Una vez delimitado el proyecto (automáticamente se cambió a una nueva vista de ArcView GIS 3.2 denominada “Vero” en la que se mantuvieron cargadas las coberturas anteriores, así como una de puntos, denominada “Vero.shp” que contiene el outlet), la siguiente tarea consistió en calcular las características topográficas de los cauces y las cuencas. Para ello se calculó la longitud de los cauces con la herramienta *Basin Characteristics / River Length* y la pendiente de los mismos con la herramienta *Basin Characteristics / River Slope* dentro de HEC-GeoHMS.

Tras este proceso el paso siguiente fue el cálculo de los centroides de cada una de las subcuencas, con el uso de la herramienta *Basin Characteristics / Basin Centroid*.

Por último, tras delimitar estos aspectos se procedió al cálculo del camino más largo del flujo para cada una de las subcuencas que conforman la cuenca del Vero (herramienta *Basin Characteristics / Longest Flowpath*). Con esto se consiguió calcular diversos parámetros como son la longitud más larga de flujo, cota de aguas arriba, etc. (Domenech, S. 2009), necesarios para la modelización del hidrograma de crecida. Esto se almacenó en la cobertura “LongestFlowPath”. Además se calculó la ruta más larga hasta el centroide de cada cuenca (herramienta *Basin Characteristics / Centroidal Longest Flowpath*), almacenada en la cobertura “CentroidalFlowPath”.

Una vez preparado el modelo de cuenca, se procedió al cálculo de los siguientes parámetros hidrológicos: el número de curva, los parámetros del modelo Muskingum-Cunge, el tiempo de concentración y el tiempo de retardo de la cuenca.

- Cálculo del número de curva (CN) de cada subcuenca.

Esta metodología fue propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (*Soil Conservation Service, SCS*) del Departamento de Agricultura de los EE.UU (*United States Department of Agriculture, USDA*). El método permitió cuantificar las abstracciones iniciales (intercepción, retención e infiltración del agua en la cuenca), o lo que es lo mismo, calcular la precipitación eficaz (Domenech, S. 2009)

Para su cálculo se necesitó la información de tres factores muy importantes que determinan la precipitación eficaz en la cuenca: las pendientes, los tipos de suelo y los usos del suelo. Para calcular el CN se clasificó cada una de estas variables en una capa ráster en donde cada valor de la variable se reclasificó a un número primo ya que éstos sólo son divisibles por sí mismos y por la unidad.

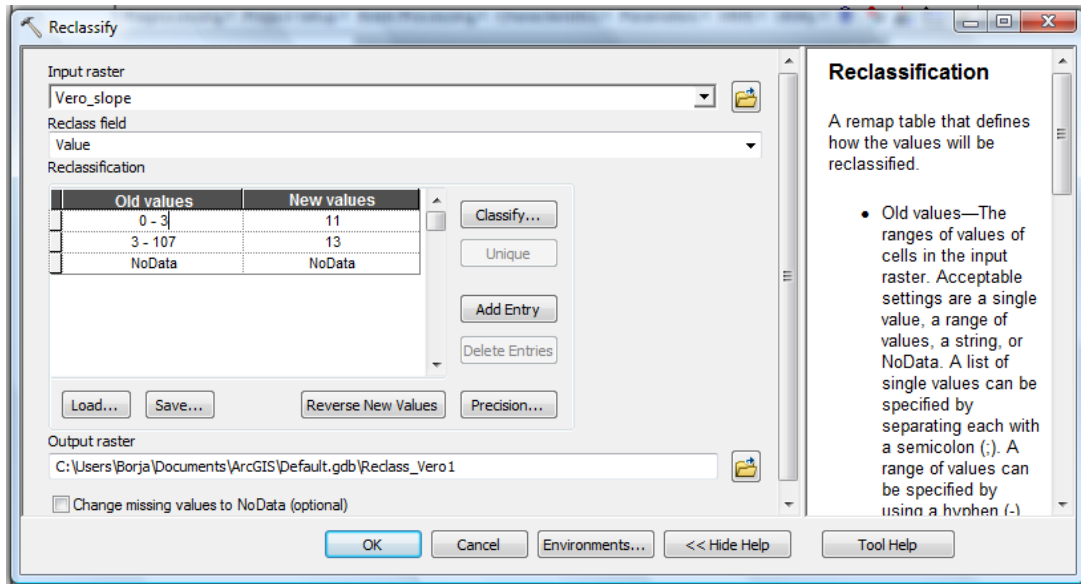
De nuevo se trabajó en ArcGIS 10, creando un nuevo proyecto denominado “CN” con una nueva Geodatabase de igual nombre.

#### MAPA DE PENDIENTES.

Para la creación del primero de los factores se consideró como límite aquellas zonas cuya pendiente fuese inferior al 3% y las zonas iguales o superiores al 3%. A partir del MDE creado

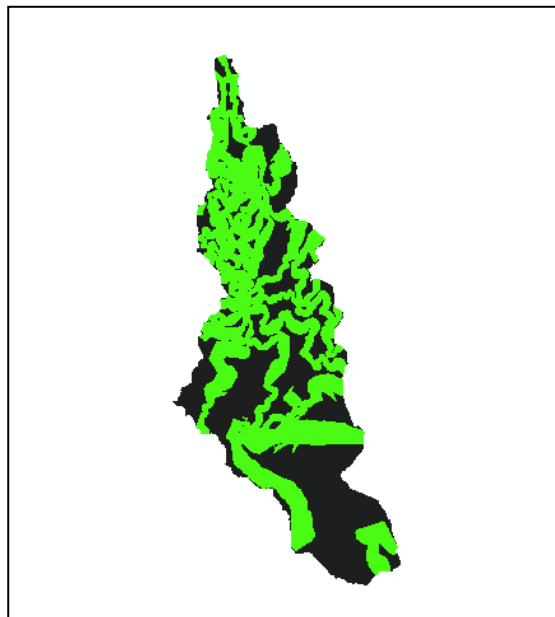
originalmente en formato ráster (“MDE”) y mediante el uso de las *ArcToolbox* en ArcGIS 10 se creó una capa ráster de pendientes, mediante la función *ArcToolbox / Spatial Analyst tools / Surface / Slope*. El resultado fue la cobertura denominada “Vero\_slope”.

Una vez generada esta cobertura, mediante la función *ArcToolbox / Spatial Analyst tools / Reclass / Reclassify* se reclasificaron los píxeles de la capa a los umbrales de pendiente anteriormente citados.



**Figura 20.** Menú Reclassify en ArcGIS 10.

Como se aprecia en la Figura 20, el ráster “Vero\_slope” se reclasificó en los dos intervalos anteriormente delimitados. Además se les asignó el número primo 11 a los valores inferiores al 3 % de pendiente y el número primo 13 a los valores superiores al 3%. El resultado fue el grid denominado “slope\_reclass”.



**Figura 21.** Aspecto de “slope\_reclass”.

### MAPA DE TIPOS DE SUELO.

Debido a la inexistencia de una cobertura de tipos del suelo en España a la escala de trabajo deseada, se extrapola la información de tipos de suelos a partir del mapa litológico (Domenech, S. 2009). Para ellos se consultó la información facilitada por la C.H.E. respecto a la geología de los territorios de la Cuenca del Ebro (<http://oph.chebro.es/ContenidoCartoGeología.htm>), derivada de la cartografía a escala 1:50.000 del IGME (Instituto Geológico y Minero de España).

Se descargaron los ficheros correspondientes a los Dominios del Sinclinal de Tremp, Dominio del Centro de la Depresión del Ebro y Dominio del Sinclinal de Jaca-Pamplona, zonas de dominios geológicos que corresponden a la cuenca del Vero

La información descargada vino en formato de archivo ArcInfo (\*.e00), por lo que se importaron a ArcGIS 10 mediante las *ArcToolbox*, concretamente con el siguiente comando de herramientas: *Conversion Tools / To Coverages / Import from E00*.

Tras su importación (de los tres tipos de coberturas posibles: líneas, puntos y polígonos, sólo se importó la correspondiente a los polígonos) se realizó un *merge* para unir las 3 coberturas en una única, y posteriormente un *clip* con la superficie de la cuenca del Vero, con el fin de simplificar la información.

Posteriormente para cerciorarse de que la nueva cobertura era correcta y no poseía polígonos o gaps sin atributos, se importó a un Dataset dentro de una Geodatabase, tras la cual se creó una Topología añadiendo la regla “must not have gaps” para que no haya espacios huecos entre los límites de los polígonos. Se pudo comprobar que en este caso no hubo ningún problema.

Tras ello se procedió a reclasificar cada uno de las litologías en función del tipo de suelo que propone el SCS. Para España se consideran cuatro tipos de suelos, pertenecientes a los grupos A, B, C y D, como se refleja en la tabla posterior:

**Tabla 3.** Tipos de suelo en España según el SCS: características a efectos del umbral de escorrentía.

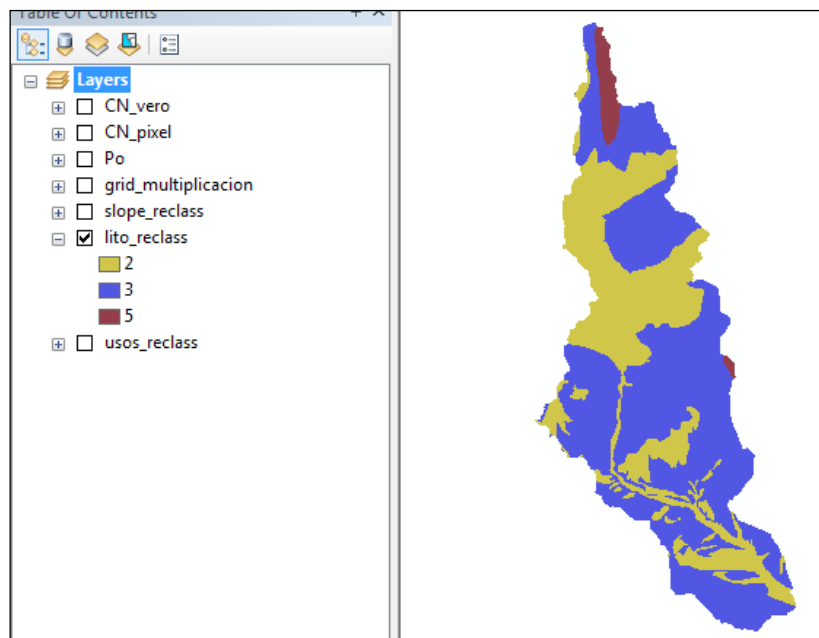
GRUPO	INFILTRACIÓN	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenosa Arenosa-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno o moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillosa-limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy Lenta	Pequeño (litosuelo) u horizonte de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Para analizar a qué grupo pertenece cada una de las litologías existentes en la cuenca del río Vero, hubo que acceder a los atributos de la cobertura y comprobar el campo “IDDOM”. El código allí existente se correspondió con la leyenda facilitada en la descarga de los ficheros. En el caso de la cuenca del Vero existen los siguientes tipos:

**Tabla 4.** Reclasificación de las Litologías en la cuenca del Vero.

IDDOM	EDAD	FACIES Y LITOSOMAS	GRUPO SUELO	PRIMO
120	Triásico	Facies Muschelkalk	C	5
130	Triásico	Facies Keuper	C	5
641	Eoceno (Ilerdense- Cuisiense)	Margas calcáreas y calizas	B	3
651	Eoceno (Luteciense)	Calizas, areniscas y conglomerados	A	2
652	Eoceno (Bartoniense)	Calizas	C	5
661	Eoceno	Areniscas y lutitas	B	3
713	Oligoceno	Conglomerados	A	2
723	Oligoceno	Areniscas, conglomerados y lutitas	A	2
733	Oligoceno	Lutitas, arcillas y limos	B	3
900	Cuaternario	Conglomerados, gravas, arenas y arcillas	A	2
930	Cuaternario	Terrazas Fluviales	A	2
960	Cuaternario	Depósitos Aluviales	A	2

La reclasificación de esta cobertura se hizo a través de la edición de la tabla de atributos. Se crearon dos campos nuevos, denominados “GRUPO”, de tipo texto, y “PRIMO”, de tipo short integer. Los campos se rellenaron con los datos correspondientes a la Tabla 4. Tras ello se exportó la cobertura a formato ráster, manteniendo como atributo a cada pixel el valor del campo “PRIMO”, en un grid denominado “lito\_reclass”.



**Figura 22.** Aspecto de “lito\_reclass”.

## MAPA DE USOS DEL SUELO.

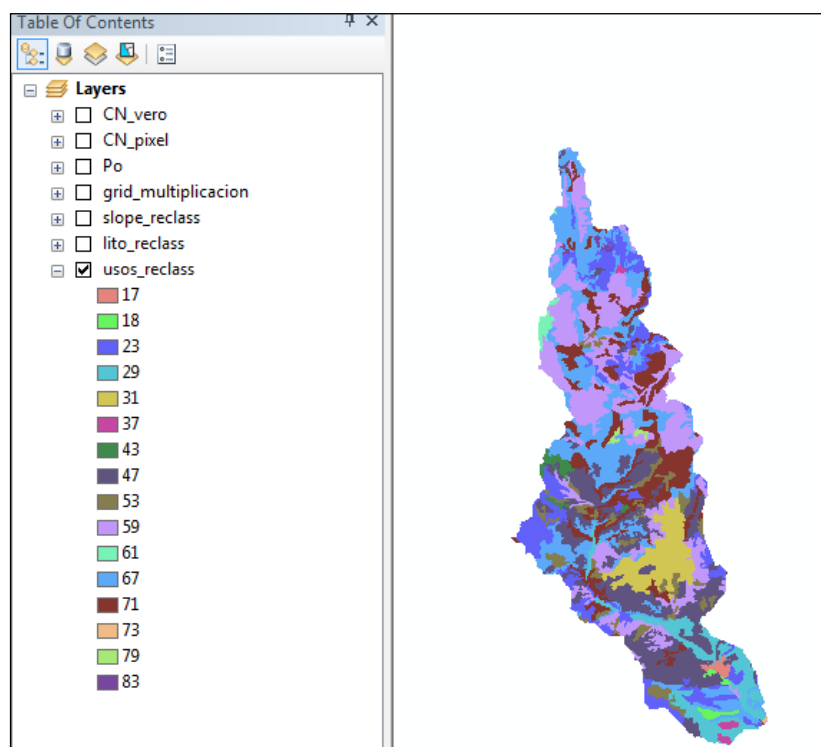
Al igual que ocurrió con la litología, se recurrió a información externa para la obtención de la cobertura de usos del suelo. El SCS propone una metodología propia para la reclasificación de los usos del suelo, sin embargo hay estudios que han empleado otras fuentes (Ferrer *et al.* 2006). En este caso se accedió al Proyecto Corine Land Cover (CLC) de la Unión Europea, realizado para el año 2000 (<http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/clc-download>). Se descargaron las cartografías correspondientes a la zona de trabajo de la cuenca del Vero, correspondientes a dos hojas de cuadrante de 100 km<sup>2</sup>. Tras reprojectarlas al sistema de referencia en el que se trabajó (European Datum 1950 zona 30N) se unieron ambos cuadrantes mediante el empleo de la función *geoprocessing / merge* y posteriormente se realizó un *geoprocessing / clip* de esta unión con la cuenca del Vero, para trabajar sólo con la información requerida.

Del mismo modo que ocurrió con las coberturas anteriores, se realizó una topología para evitar errores en forma de huecos (“*must not have gaps*”). Tras ello se procedió a reclasificar los usos del suelo. El método de nuevo consistió en editar la tabla de atributos. Se crearon dos campos, denominados “PRIMO” y “COD\_TXT”.

Para su relleno, en primer lugar se localizó en qué campo estaba comprendida la información de los usos del suelo, siendo éste el campo “COD\_00”. Posteriormente para rellenar la información se empleó la leyenda descrita en una hoja de cálculo de Excel descargada desde internet (<http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/metadetails.asp?id=950>). A continuación se muestra (ver Tabla 5) los usos del suelo registrados en la cuenca del Vero, y el resultado de la correspondiente reclasificación (ver Figura 21), tras haber sido exportada a grid bajo el nombre “usos\_reclass”.

**Tabla 5.** Reclasificación de de los usos del suelo CLC en la cuenca del Vero.

COD_00	USOS DEL SUELO	COD_TXT	PRIMO
111	Tejido Urbano Continuo	TUC	17
121	Zonas Industriales y Comerciales	ZIC	18
211	Tierras de Labor en Secano	TLS	23
212	Terrenos Regados Permanentemente	TRP	29
221	Viñedos	VNY	31
222	Frutales	FRT	37
223	Olivares	OLI	43
242	Mosaico de Cultivos	MCS	47
243	Terrenos princip. Agrícolas con import. Espacios de Veg. Natural	Y	53
311	Bosques de Frondosas	BSQ	59
312	Bosques de Coníferas	BSQ	59
313	Bosque Mixto	BSQ	59
321	Pastizales Naturales	PAS	61
323	Vegetación Esclerófila	VGE	67
324	Matorral Boscoso de Transición	MBT	71
331	Playas, Dunas y Arenales	PDA	73
332	Roquedos	ROQ	79
333	Espacios con Escasa Vegetación	EEV	83



**Figura 23.** Aspecto de “usos\_reclass”.

Una vez obtenidas las tres coberturas ráster (usos del suelo, litología y pendientes), se multiplicaron las capas mediante el empleo de la calculadora ráster de ArcGIS 10, teniendo en cuenta el valor de sus campos “PRIMO”. El resultado fue una nueva cobertura ráster que fue reclasificada en función de la siguiente tabla.



**Tabla 6.** Umbrales de escorrentía para la cuenca del río Vero.

			TIPO SUELO				GRID MULTIPLICACIÓN				Po					
COD	USOS DEL SUELO	SLOPE	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D		
TUC	Tejido Urbano Continuo	17	>3	11	2	3	5	7	374	561	935	1309	1	1	1	1
		17	<3	13	2	3	5	7	442	663	1105	1547	1	1	1	1
ZIC	Zonas Industriales y Comerciales	18	>3	11	2	3	5	7	396	594	990	1386	6	4	3	3
		18	<3	13	2	3	5	7	468	702	1170	1638	6	4	3	3
TLS	Tierras de Labor en Secano	23	>3	11	2	3	5	7	506	759	1265	1771	32	19	12	10
		23	<3	13	2	3	5	7	598	897	1495	2093	34	21	14	12
TRP	Terrenos Regados Permanentemente	29	>3	11	2	3	5	7	638	957	1595	2233	42	23	14	11
		29	<3	13	2	3	5	7	754	1131	1885	2639	47	25	16	13
VNY	Viñedos	31	>3	11	2	3	5	7	682	1023	1705	2387	62	26	15	10
		31	<3	13	2	3	5	7	806	1209	2015	2821	76	34	19	14
FRT	Frutales	37	>3	11	2	3	5	7	814	1221	2035	2849	79	34	19	14
		37	<3	13	2	3	5	7	962	1443	2405	3367	94	42	22	15
OLI	Olivares	43	>3	11	2	3	5	7	946	1419	2365	3311	62	26	15	10
		43	<3	13	2	3	5	7	1118	1677	2795	3913	76	34	19	14
MCS	Mosaico de Cultivos	47	>3	11	2	3	5	7	1034	1551	2585	3619	38	19	11	8
		47	<3	13	2	3	5	7	1222	1833	3055	4277	67	27	16	11
Y	Terrenos princip. Agrícolas con import. Espacios de Veg. Natural	53	>3	11	2	3	5	7	1166	1749	2915	4081	29	17	11	8
		53	<3	13	2	3	5	7	1378	2067	3445	4823	30	19	13	10
BSQ	Bosques de Frondosas, Coníferas y Mixto	59	>3	11	2	3	5	7	1298	1947	3245	4543	90	47	31	23
		59	<3	13	2	3	5	7	1534	2301	3835	5369	90	47	31	23
PAS	Pastizales Naturales	61	>3	11	2	3	5	7	1342	2013	3355	4697	53	23	14	9
		61	<3	13	2	3	5	7	1586	2379	3965	5551	79	35	17	10
VGE	Vegetación Esclerófila	67	>3	11	2	3	5	7	1474	2211	3685	5159	60	24	14	10
		67	<3	13	2	3	5	7	1742	2613	4355	6097	60	24	14	10
MBT	Matorral Boscoso de Transición	71	>3	11	2	3	5	7	1562	2343	3905	5467	76	34	22	16
		71	<3	13	2	3	5	7	1846	2769	4615	6461	76	34	22	16
PDA	Playas, Dunas y Arenales	73	>3	11	2	3	5	7	1606	2409	4015	5621	152	152	152	152
		73	<3	13	2	3	5	7	1898	2847	4745	6643	152	152	152	152
ROQ	Roquedos	79	>3	11	2	3	5	7	1738	2607	4345	6083	2	2	2	2
		79	<3	13	2	3	5	7	2054	3081	5135	7189	2	2	2	2
EEV	Espacios con Escasa Vegetación	83	>3	11	2	3	5	7	1826	2739	4565	6391	24	14	8	6
		83	<3	13	2	3	5	7	2158	3237	5395	7553	57	25	12	7

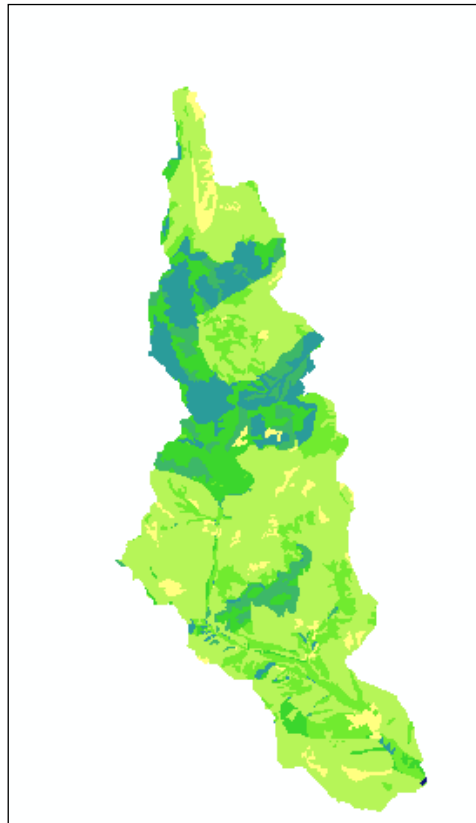
Como se aprecia en la tabla anterior, la reclasificación se realizó de la siguiente manera: se multiplica el código del campo “Uso del Suelo” por el valor del campo “Slope” por cada uno de los cuatro valores del campo “Tipo Suelo”, dando como resultado cada uno de los campos de la segunda tabla, o “GRID MULTIPLICACIÓN”. Un ejemplo:

Para los tejidos urbanos continuos con una pendiente mayor al 3%, se realizaría la siguiente multiplicación:  $17 \cdot 11 \cdot 2 = 374$ ;  $17 \cdot 11 \cdot 3 = 561$ ;  $17 \cdot 11 \cdot 5 = 935$  y  $17 \cdot 11 \cdot 7 = 1309$ .

Estos valores de la tabla GRID MULTIPLICACIÓN son los valores que aparecerán en la tabla de atributos de la cobertura ráster generada en la calculadora ráster, y que posteriormente deberá ser reclasificada según los valores de la tabla “Po”, que es el umbral de esorrentía. Otro ejemplo:

Se ha localizado un Viñedo de una pendiente  $>3\%$  en un suelo del grupo C. Al realizar la multiplicación correspondiente se ha obtenido un valor de 1705 en la tabla “GRID MULTIPLICACIÓN”. Ese valor se correspondería con el valor del grupo C de la misma fila en la tabla “Po”, es decir, 15.

El resultado de todo ello fue otra cobertura ráster denominada “Po” que recoge ya valores cuantificables en milímetros de agua que se pueden infiltrar en cada píxel.



**Figura 24.** Aspecto de “Po”.

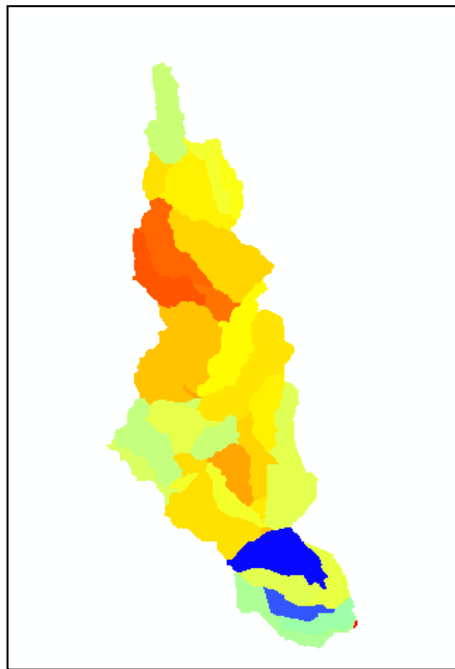
Una vez obtenida esta cobertura, de nuevo se empleó la calculadora ráster para determinar por fin el valor del número de curva (SCS) que indicó la precipitación eficaz que forme finalmente esorrentía superficial. Para su cálculo se empleó la siguiente expresión matemática (Ferrer *et. al.* 1995):

$$CN = \frac{5000}{Po} - 50$$

A esta nueva capa grid con los datos del número de curva todavía hubo que realizarle un último proceso. Lo que se obtuvo hasta ahora es el número de curva para cada uno de los píxeles que componen la capa, pero lo que necesita el modelo hidrológico es obtener el número de curva medio para cada una de las subcuencas.

Para su cálculo se utilizaron las funciones zonales de ArcGIS 10, concretamente la que se encuentra en *ArcToolbox / Spatial Analyst tools / Zonal / Zonal Statistics*.

En el asistente que aparece, bastó con seleccionar la cobertura ráster de las subcuencas y la cobertura con el número de curva, el tipo de función a aplicar con los valores de los píxeles del CN (“MEAN”, el valor medio en este caso), dando como resultado el siguiente grid.



**Figura 25.** Número de curva promedio de cada subcuenca.

Una vez obtenido su valor, se importó la capa a ArcView GIS 3.2 y allí con el comando *Hydrologic Parameters / Subbasin Curve Number* se importaron sus datos a la capa vectorial “Watershd.shp”.

- Parámetros del Muskingum-Cunge.

El Muskingum-Cunge es un método hidráulico para la trasposición de caudales de crecida que está basado en una aproximación de diferencias finitas de la ecuación de la continuidad y una simplificación de la ecuación del momento (Domenech, 2009). Este método requirió de los siguientes parámetros para su cálculo: forma de la sección transversal del cauce, anchura del fondo del canal, pendiente de las paredes del canal, pendiente de la línea de energía, longitud del tramo y el coeficiente “n” de Manning.

Para la forma de la sección transversal del cauce del Sosa se utilizó una sección trapezoidal, facilitada por las propias opciones de HEC-GeoHMS 1.1., simplificando por tanto la geometría del cauce con las repercusiones que ello tiene en el cálculo final de caudales de crecida. La generalización del cauce asumiendo una geometría regular se realizó para que los cálculos hidráulicos fueran rápidos pero sin que éstos pierdan detalle en la progresión de la punta de crecida.

La anchura del fondo del canal fue una anchura de cinco metros. En condiciones normales, la mayoría de los afluentes de la cuenca eran barranqueras de gran longitud, pero que en escasas

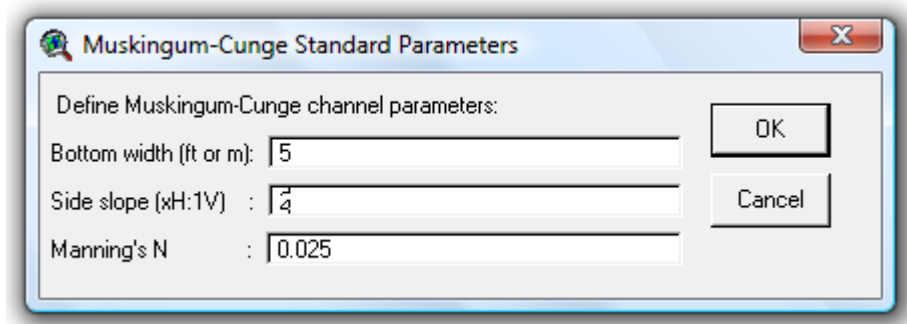
ocasiones presentaban caudal. Sin embargo el propio cauce del Vero es un cauce que en algunos tramos, sobretodo en el sector central y bajo de su cuenca presenta un cauce con una anchura de cinco o más metros, de ahí que se utilizó ese valor de cinco metros como el parámetro escogido, a modo de promedio.

Para la pendiente de las paredes del canal se ha utilizado la relación 2H:1V, es decir, por cada dos metros en la horizontal hay un desnivel de un metro en la vertical.

La pendiente de la línea de energía era un parámetro que ya estaba calculado para cada uno de los segmentos de la red fluvial. Es un parámetro que define la pendiente longitudinal del canal principal de cada una de las subcuencas delimitadas.

La longitud de tramo hizo referencia al canal principal de cada una de las subcuencas.

Por último hubo que determinar el Coeficiente “n” de Manning. Este coeficiente hizo referencia a la rugosidad del canal que implicó una fricción al flujo de agua. Al tratarse de un estudio de una crecida, a mayor velocidad del flujo, la rugosidad afectó menos y por este motivo se utilizó un valor de 0,025 para todos los tramos, promedio obtenido tras trabajo en campo (Bravo, B: 2011).



**Figura 26.** Cálculo del Muskingum-Cunge en HEC-GeoHMS.

- Tiempo de Concentración.

El tiempo de concentración es un parámetro que se define como el tiempo necesario para que con una lluvia uniforme la totalidad de la cuenca contribuya al hidrograma de esorrentía superficial. Requiere de datos y variables como la lluvia máxima estimada para un periodo de retorno de 2 años, etc. Para simplificar el proceso se calculó en función del método de cálculo propuesto por Témez (Ferrer, 1993):

$$T_c = 0,3 \cdot \{(L/J^{1/4})^{0,76}\}$$

Siendo  $T_c$  = tiempo de concentración en horas,  $L$  = longitud de cauce en km y  $J$  = pendiente media en m/m. Así, se obtuvieron los tiempos de concentración de cada una de las subcuencas en una hoja de cálculo, y posteriormente se exportó dicha información al campo “TC” de la tabla de atributos de la capa “*Catchment*”.

- Tiempo de Retardo o de Demora.

Con esta función lo que se calculó es el tiempo de retardo de cada una de las subcuencas, es decir, el tiempo que tardó la lluvia en convertirse en caudal de crecida. El cálculo se hizo crean-

do en la capa “Catchment” un campo denominado “*BasinLag*” y con la calculadora de la tabla de atributos se introdujo la siguiente fórmula:

$$Td = 0,6 * Tc$$

#### 4.2.2. Entrada de datos en HEC-HMS.

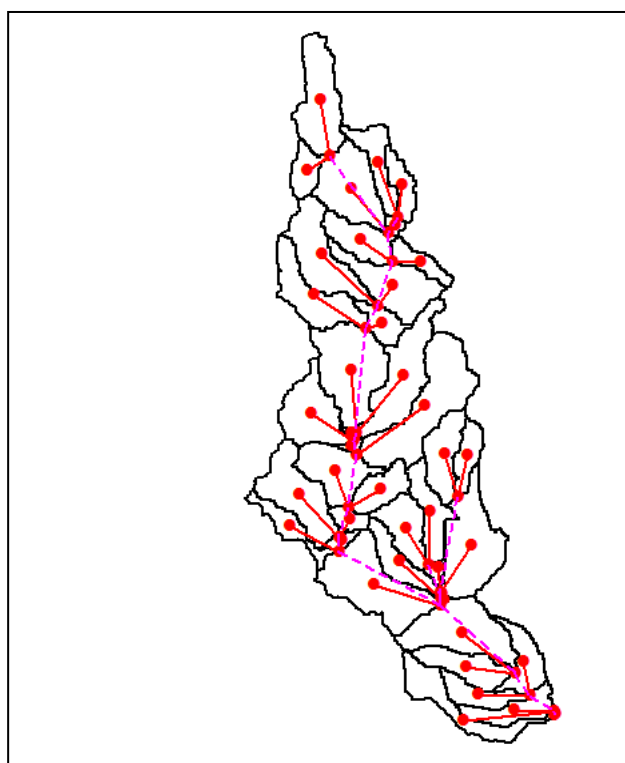
Tras haberse creado todos los elementos del modelo de cuenca mediante ArcView GIS 3.2 y HEC-GeoHMS 1.1 llegó el momento de preparar los datos antes a su importación definitiva al software HEC-HMS.

En primer lugar se creó un proceso de autonombramiento de los tramos de cauce. Ello se hizo con la función *Parameters / River Auto Name* en HEC-GeoHMS, denominándose de nuevo los tramos de cauce combinando la letra “R” con una secuencia numérica, almacenando los datos en la cobertura “*River*”.

El segundo paso fue el del autonombrado de cuencas. Del mismo modo que sucedió con los cauces, HEC-GeoHMS también renombra las subcuencas de forma automática, añadiendo la letra “W” junto a dos números al nombre del tramo que recibió el flujo de la subcuenca. Esto se hizo mediante la función *Parameters / Basin Auto Names*, almacenando los datos en la cobertura “*Subbasins*”.

El tercer paso a realizar fue el de establecer un control de datos. Con este proceso el usuario se aseguró que los cauces, subcuencas y puntos de salida del modelo tuvieron nombres distintos. La función aplicada para este proceso fue *HMS / Check Data* en HEC-GeoHMS 1.1. El software creó un archivo de texto denominado “*SkelConsChk.txt*” en el que se exponen los resultados.

Después se creó un esquema de la cuenca para HEC-HMS. Este esquema es una representación gráfica del modelo de cuenca que se confeccionó con el SIG. Se creó con la función *HMS / HMS Schematic*. El resultado fueron dos coberturas, una de puntos (“*HMSPoint.shp*”) que mostró las salidas y uniones de los cauces y cuencas, representando los cauces por sus centroides, y la otra cobertura de líneas (“*HMSConnect.shp*”) que mostró los conectores de las subcuencas y los cauces.



**Figura 27.** Esquema de la cuenca.

A continuación se agregaron coordenadas geográficas a las dos coberturas recién creadas, mediante el empleo de la función *HMS / Add Coordinates*. Después hubo que crear un archivo de mapa de fondo para capturar la información geográfica de los límites de las subcuencas y cauces. La función aplicada fue *HMS / Background Shape file*.

Creado este fichero, el penúltimo paso a realizar con HEC-GeoHMS fue el de la creación del modelo de cuenca agregado. Este modelo de cuenca es similar al mapa de fondo, salvo que lo que se capturó fue la información hidrológica. La función aplicada fue *HMS / Basin Model File*.

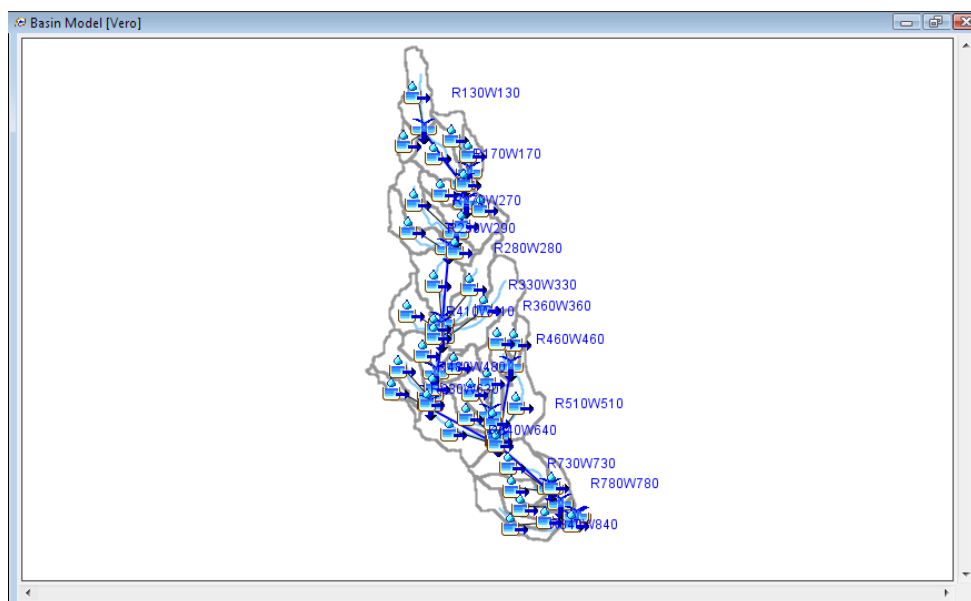
Así se crearon todos los elementos con los que HEC-HMS trabajó. Finalmente se exportó todo al software hidrológico, motivo por el que se trabajó con la herramienta HEC-GeoHMS, ya que esta herramienta es el nexo de unión entre ArcView y HEC-HMS.

Para realizar esta exportación bastó con aplicar la función *HMS / Create HEC-HMS Project*. En el asistente se solicitó la creación de un directorio en el cual se importaron los datos con los que se trabajó en HEC-HMS 3.3. Así pues el asistente generó un subdirectorio (C:\hmsproj\Vero) donde se exportaron las capas de información generadas desde HEC-GeoHMS 1.1.

#### 4.2.3. Edición del modelo de cuenca en HEC-HMS.

Una vez arrancado el programa hubo que importar el modelo dentro del software. Para ello en el menú *File / Import / Basin model* se seleccionó el fichero “Vero.basin” que contenía los elementos del modelo. Además de ello en el mismo menú se seleccionó la opción *File / Import / Control Specifications* para importar el fichero “Vero.control”, que contenía los datos específicos de control, como el tiempo de las simulaciones, etc.

Además desde el menú *View / Background map* se cargó el fichero “Vero.map”, una imagen con los contornos de las subcuencas que ayuda a comprender e interpretar la zona de estudio:



**Figura 28.** Modelo de cuenca en HEC-HMS.

Una vez importado el modelo, la siguiente realizada fue el de importar los parámetros necesarios previos a la generación del modelo. Los parámetros se importaron de forma manual desde el menú *Parameters*. Para ello en ArcView GIS 3.2 se abrió la tabla de atributos de los shapefiles “Watershd.shp” y “River.shp”.

El primer parámetro a importar a las subcuencas del modelo fue el número de curva medio obtenido anteriormente con el empleo de la función zonal en ArcGIS 10. Para ello se abrió la tabla de atributos de “Watershd.shp” y allí en el campo “BCN” aparece el valor. El comando para importar el Número de Curva fue *Parameters / Loss / SCS Curve Number*.

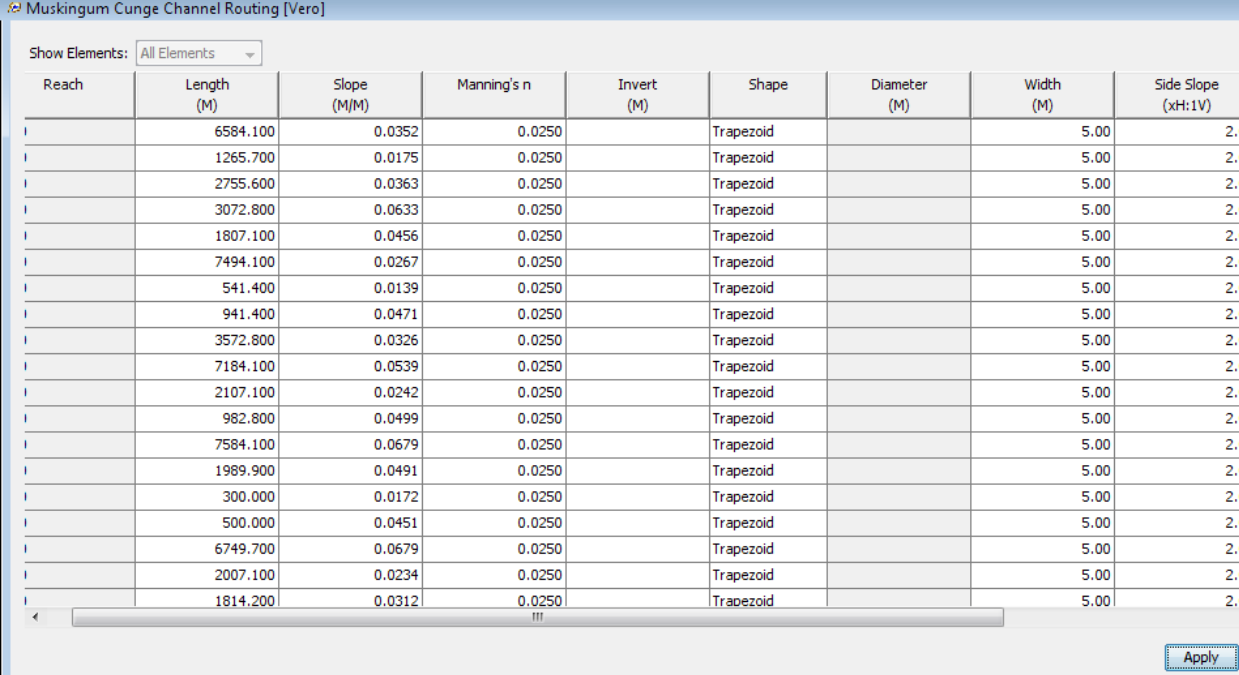
Curve Number Loss [Vero]			
Show Elements: All Elements			
Subbasin	Initial Abstraction (mm)	Curve Number	Impervious (%)
R130W130		61	0.0
R160W160		5	0.0
R170W170		13	0.0
R180W180		31	0.0
R220W220		23	0.0
R230W230		15	0.0
R240W240		98	0.0
R250W250		98	0.0
R260W260		98	0.0
R270W270		42	0.0
R280W280		47	0.0
R290W290		35	0.0
R300W300		88	0.0
R330W330		17	0.0
R360W360		12	0.0
R400W400		76	0.0
R410W410		89	0.0
R420W420		55	0.0
R440W440		43	0.0
D460W460		15	0.0

**Figura 29.** Tabla de pérdidas (SCS Curve Number) de la cuenca del Vero.

El siguiente parámetro que se importó fue el tiempo de demora, también almacenado en “Watershd.shp”, en este caso en el campo “BasinLag”. Al estar calculado en horas, hubo que

transformar dichos valores a minutos en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y copiar los datos.

En el menú *Parameters / Routing / Muskingum-Cunge* hubo que editar muchos datos, en este caso codificados dentro de la capa “River.shp”. Así los campos a localizar fueron la longitud de los cauces (Riv\_Length\_HMS); pendientes (Slp\_EndPnt); “N” de Manning (ChnManN); Anchura de cauces (ChnWidth) y las pendientes de las laderas (ChnWidth).



The screenshot shows a software window titled "Muskingum Cunge Channel Routing [Vero]". Inside, there is a table with 9 columns: Reach, Length (M), Slope (M/M), Manning's n, Invert (M), Shape, Diameter (M), Width (M), and Side Slope (xH:1V). The table contains 18 rows of data. All rows have a "Shape" of "Trapezoid" and a "Side Slope" of "2.0". The "Width (M)" column is constant at "5.00". The "Diameter (M)" column is empty for all rows. The "Invert (M)" column is empty for all rows. The "Manning's n" column has values of "0.0250" for most rows, but "0.0352" for the first row and "0.0499" for the 14th row. The "Slope (M/M)" and "Length (M)" values vary across the rows. At the bottom right of the window is an "Apply" button.

Reach	Length (M)	Slope (M/M)	Manning's n	Invert (M)	Shape	Diameter (M)	Width (M)	Side Slope (xH:1V)
	6584.100	0.0352	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	1265.700	0.0175	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	2755.600	0.0363	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	3072.800	0.0633	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	1807.100	0.0456	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	7494.100	0.0267	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	541.400	0.0139	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	941.400	0.0471	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	3572.800	0.0326	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	7184.100	0.0539	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	2107.100	0.0242	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	982.800	0.0499	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	7584.100	0.0679	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	1989.900	0.0491	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	300.000	0.0172	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	500.000	0.0451	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	6749.700	0.0679	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	2007.100	0.0234	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0
	1814.200	0.0312	0.0250		Trapezoid		5.00	2.0

**Figura 30.** Tabla de datos del modelo Muskingum-Cunge.

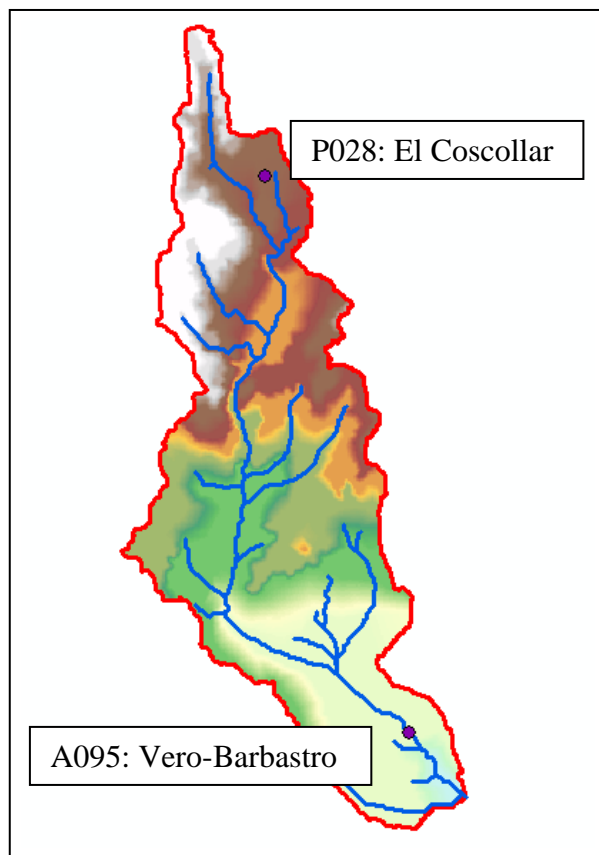
#### 4.2.4. Creación del modelo y especificaciones de control.

El Sistema Automático de Información Hidrológica de la C.H.E. (SAIH en adelante) dispone de varios pluviómetros automatizados en la cuenca del Vero (A095 Vero en Barbastro, P101 Alquézar y P028 El Coscollar) que registran datos de precipitación con intervalos de 15 minutos.

Se sabe que durante los días 16, 17 y 18 de diciembre de 1997 se originó un importante evento de precipitaciones (ver apartado 3.3 anterior) que originó la crecida fluvial que se modelizó en este estudio.

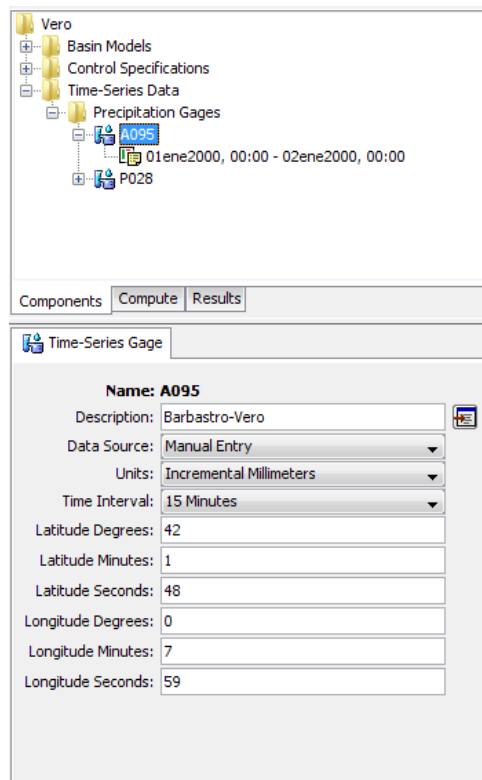
Sin embargo la no funcionalidad de la estación P101 en aquella época hizo que sólo se dispusiera información de precipitaciones de las otras dos estaciones restantes. Se solicitó información al SAIH de estas dos estaciones y se obtuvieron las coordenadas en proyección UTM de los mismos, coordenadas que posteriormente se transformaron a coordenadas geográficas ya que HEC-HMS 3.3 utiliza este sistema.





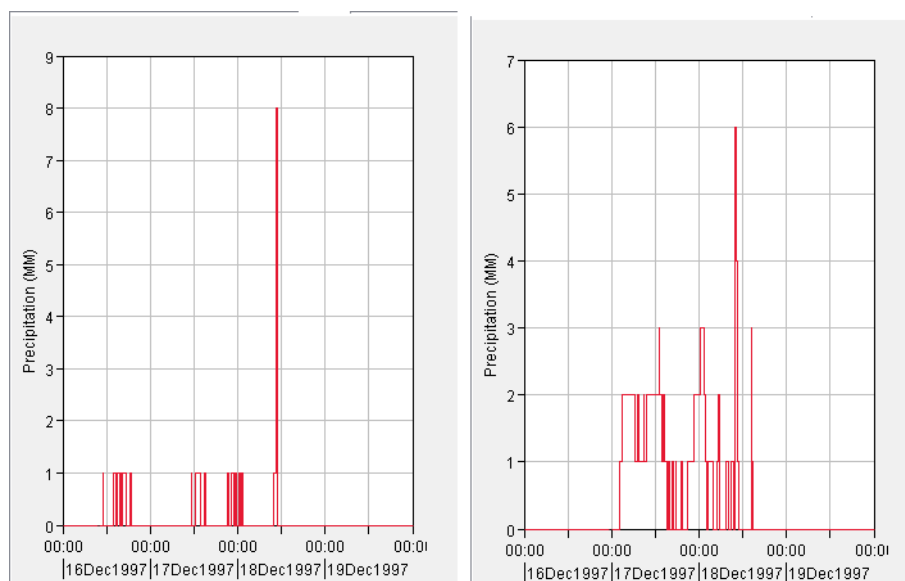
**Figura 31.** Localización de los pluviómetros en la cuenca del Vero.

Dentro de HEC-HMS 3.3 en el menú *Components / Time-Series Data Management* se crearon dos pluviómetros con los nombres A095 y P028, editándose posteriormente los atributos de cada uno de ellos en la pestaña *Components*, determinando la entrada de datos, intervalos de registro y coordenadas geográficas de cada uno de los pluviómetros.



**Figura 32.** Propiedades del pluviómetro A095 en HEC-HMS.

Tras crearse y editarse los pluviómetros, se completaron los datos de precipitación del evento en cada observatorio. Para cada uno de los pluviómetros creados se incluyeron los datos de inicio y final del evento y la precipitación registrada durante el mismo. Con ello se consiguió generar un hietograma con las precipitaciones acaecidas en ambos pluviómetros:



**Figura 33.** Hietograma estaciones A095 (izquierda) y P028 (derecha) en HEC-HMS.

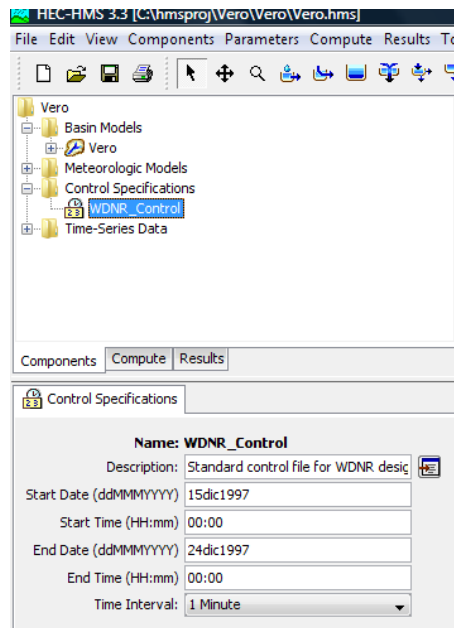
Posteriormente el siguiente elemento a crear fue el propio modelo meteorológico, mediante el empleo del comando *Components / Meteorological Model Manager*. El modelo generado recibió el nombre de “Met\_Vero”. En el explorador de HEC-HMS apareció una nueva carpeta en la cual se editaron sus propiedades.

En la opción “Precipitation” se escogió el método del hietograma específico. Se pudieron haber escogido otras opciones como ponderar los pesos de cada pluviómetro en función de los polígonos de Thiessen o incluso asignar un hietograma a cada subcuenca en función del inverso de la distancia (IDW). Sin embargo al disponer de tan sólo dos pluviómetros se escogió la opción por defecto en donde cada pluviómetro alimentará con lluvia a las cuencas más cercanas por proximidad geográfica.

Dentro de la pestaña “Basins” se escogió que las subcuencas se incluyeran en la modelización y por último los datos de la pestaña “Options” se dejaron por defecto. Después se seleccionó el modelo meteorológico y en la pestaña “Subbasins” se seleccionó el pluviómetro que contiene el hietograma que se empleó en la modelización de caudal.

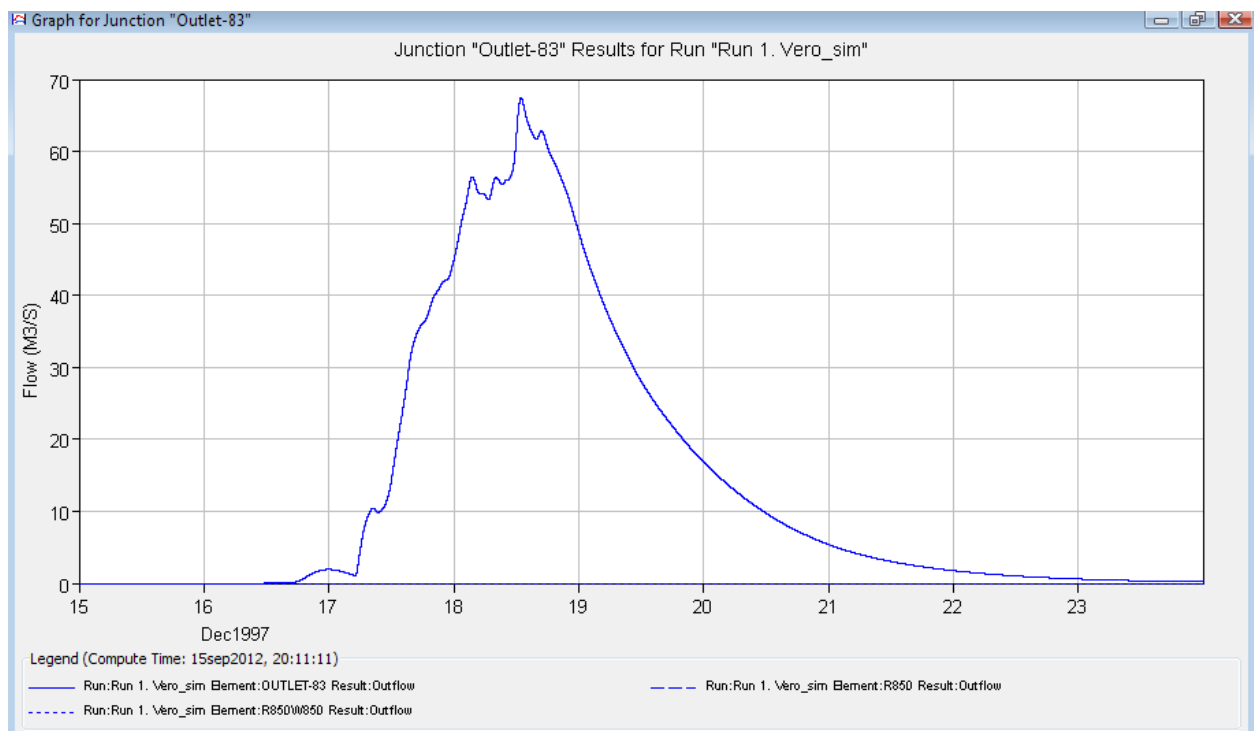
La cuenca del Vero tiene un comportamiento un tanto peculiar, ya que como se explicó en el apartado 3.2, ésta se comporta como si fueran dos grandes subcuencas. Poco antes de su tramo medio la cuenca el Vero se abre en una llanura de inundación amplia (que podría hacer las funciones de tramo bajo de un cauce), pero de nuevo vuelve a coger pendiente (en la zona de cañones del Vero) y finalmente vuelve a abrirse en una segunda llanura de inundación (en su desembocadura al Cinca). De ahí que al seleccionar los hietogramas, se optó por asignar a la parte alta de la cuenca el hietograma de la estación de cabecera o P028, y a las cuencas bajas los datos de la estación de desembocadura o A095.

Tras la determinación el modelo meteorológico, la última tarea a efectuar fue la configuración de las especificaciones de control. Al haberse generado este fichero en HEC-GeoHMS 1.1, lo único que hubo que realizar es la de su edición. Se estableció el intervalo de tiempo para la simulación de la lluvia, de un minuto (este valor debe ser siempre inferior al menor tiempo de concentración de cualquiera de las subcuencas) y la duración del evento, que fue de varios días. Al analizar los datos de caudal en el anuario de aforos, se pudo comprobar que la totalidad de la crecida se extendió desde el día 15 de diciembre hasta el día 24 de diciembre de 1997.

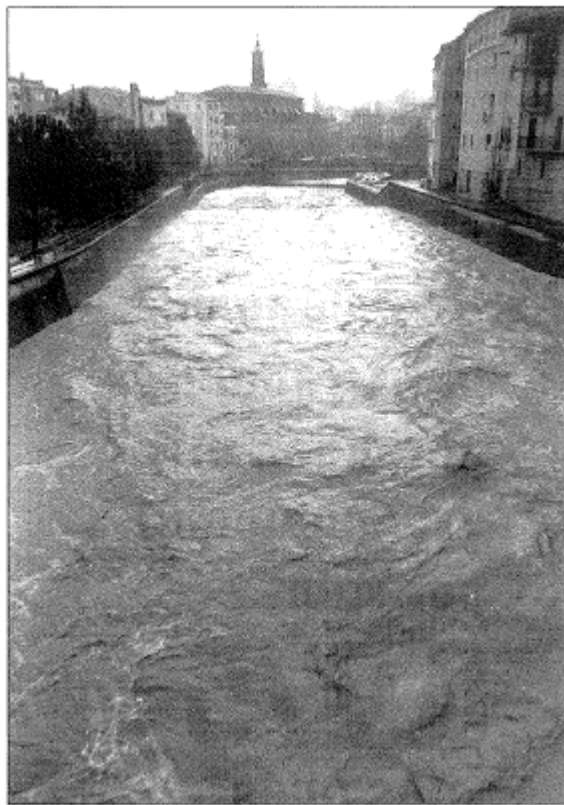
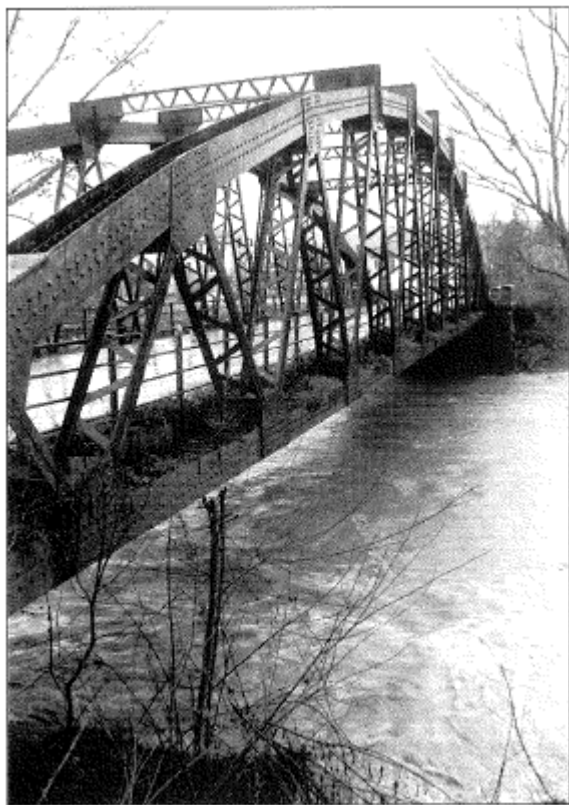


**Figura 34.** Especificaciones de Control del modelo.

Llegados a esta parte del proceso ya sólo quedó el último paso, y es el de modelar el hidrograma de crecida para el evento estudiado. Su modelado pasó por seguir el comando *Compute / Create Simulation Run*. Allí se creó la simulación, que recibió el nombre “Run 1. Vero\_sim”, donde se seleccionaron los parámetros necesarios para su ejecución: el modelo de cuenca del Vero, el modelo meteorológico “Met\_Vero” y las especificaciones de control. El resultado de esta simulación fue el siguiente hidrograma de crecida



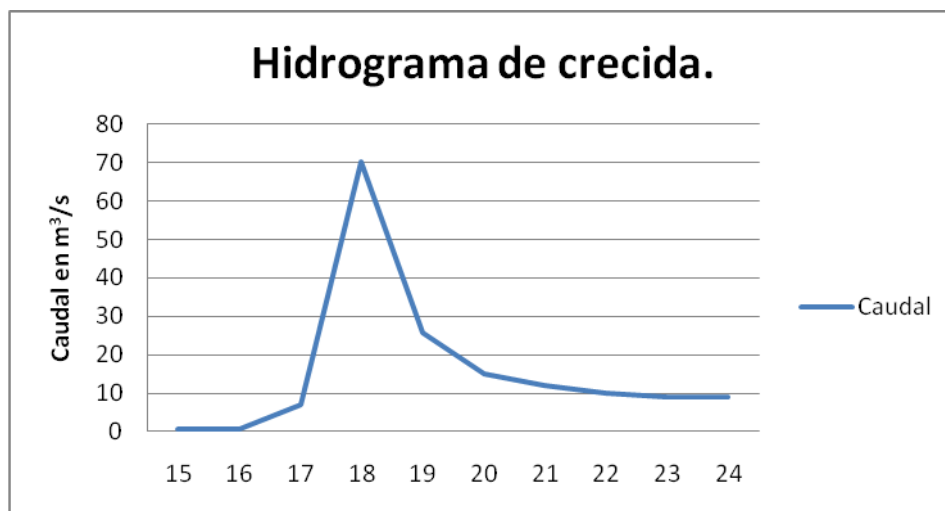
**Figura 35.** Hidrograma de crecida del Vero (diciembre 1997).



A las diez de la mañana el agua del Vero subía 1,80 m. por encima del encauzamiento y aún crecería más. SALAS

**Figura 36.** Río Vero en el Puente de Santa Fe (Izquierda) y a su paso por Barbastro (Derecha) durante la crecida. Fuente: El Cruzado Aragonés.

## 5. RESULTADOS



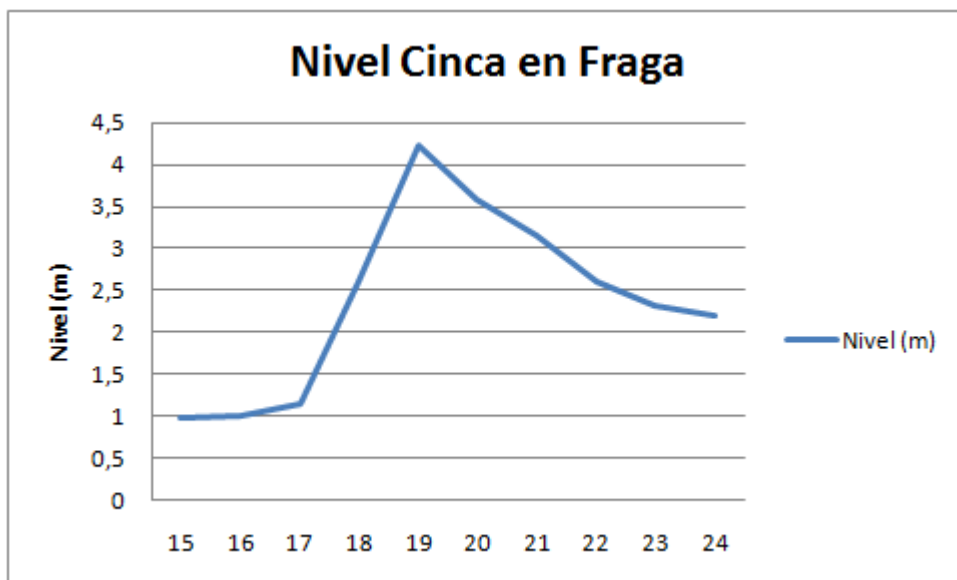
**Figura 37.** Hidrograma de crecida. Elaboración propia.

Tal y como se aprecia en la Figura 37, que se generó con los datos de caudal del Anuario de Aforos, la similitud entre los dos hidrogramas de crecida es casi exacta (Figuras 35 y 37). El hidrograma de crecida obtenido en HEC-HMS (Figura 35) fue mucho más preciso debido a que se utilizaron datos de precipitación real para su confección, en un intervalo de 15 minutos entre cada registro de datos, mientras que en el hidrograma de Excel (Figura 37) se emplearon los datos de caudal medio diario registrados en el Anuario de Aforos.

A simple vista la única gran diferencia entre ambas (al margen de la precisión de los datos) fue la curva de descenso, ya que en el hidrograma obtenido en HEC-HMS ésta llegó hasta los caudales normales en el Vero, es decir, próximos a 1 o 2  $\text{m}^3/\text{s}$ , mientras que en los datos oficiales del Anuario de Aforos sus valores se situaron en torno a los 10  $\text{m}^3/\text{s}$  en los días posteriores a la punta.

El motivo de esta diferencia radicó seguramente en las variables incluidas en el modelo de HEC-HMS. Muchos parámetros que se incluyeron, o bien fueron obtenidos de forma teórica como el coeficiente de "n" de Manning, o bien no se han obtenido al ser tedioso su cálculo, como la evapotranspiración o los deshielos (aunque en el Vero no afectaron de forma tan directa como en el Ara, apartado 3.4). De haberse incluido estas variables es casi seguro que la precisión del modelo hubiera sido mejor, y probablemente esta curva de descenso se ajustase a unos valores más acordes a los que se registraron en los días posteriores al máximo caudal tal y como recoge el Anuario de Aforos.

Otra forma de cotejar los datos obtenidos consistió en comparar cómo afectó la crecida de diciembre de 1997 del Vero al río Cinca, en datos de nivel del agua. La estación que se tomó de referencia para esta comparación fue la que se encuentra inmediatamente aguas abajo del Vero, la estación A017 Cinca en Fraga, dando como resultado el siguiente limnigrama.



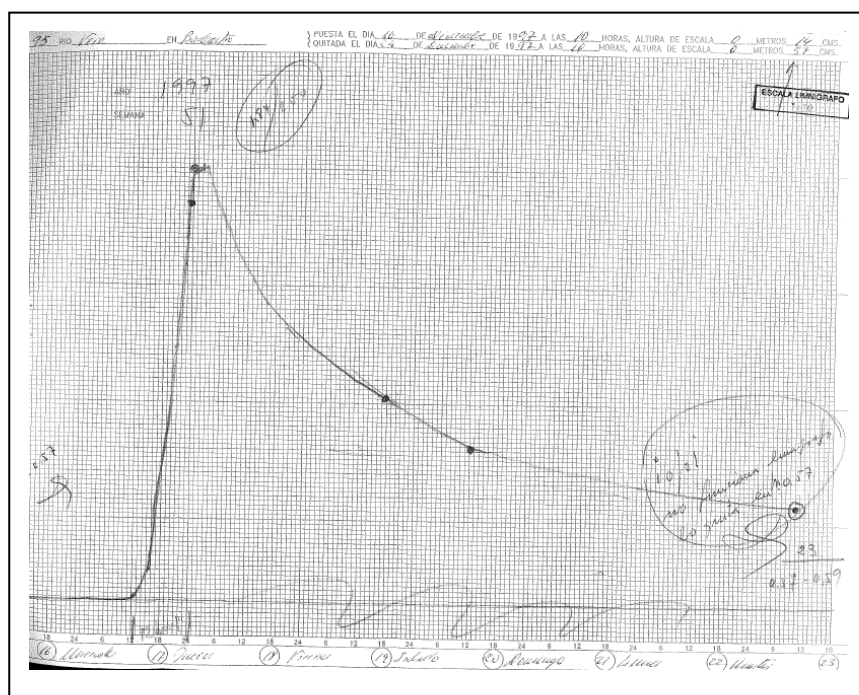
**Figura 38.** Limnigrama del Cinca en Fraga del 15 al 24 de diciembre de 1997. Fuente: Anuario de Aforos.

La interpretación del limnigrama debe de ser tomada con mucha precaución. El aumento del nivel del Cinca (de uno a cuatro metros) no se debió exclusivamente a la crecida del río Vero. Este episodio se originó tras una gran borrasca que afectó a toda la Península Ibérica (ver apartado 3.4), por lo tanto todos los afluentes del Cinca sufrieron sus respectivas crecidas (el río Ara por ejemplo rompió el embalse de Jánovas), inclusive el propio Cinca. En la estación de aforos de Fraga ya se registró la suma de caudales de todos estos ríos, además del propio caudal que llevaba el Cinca en su crecida. Este aumento de caudales significó un aumento del nivel (altura que alcanza el río en un determinado punto) del Cinca en Fraga.

Así pues, si bien es cierto que el Vero influyó en el aumento del nivel del Cinca, en el presente limnigrama no se aprecia hasta qué punto abarcó dicha influencia.

Por otra parte está la confección del propio limnigrama. Tras haberse solicitado datos de caudal y nivel del Vero al SAIH, y comprobar que dichos datos eran erróneos, se configuró el limnigrama con los datos de nivel del anuario de aforos, habiéndose escogido los datos de altura media diaria.

Si se hubiera podido disponer de datos a intervalos quinceminutales (los del SAIH), el limnigrama hubiera sido mucho más preciso, de forma que se habría podido identificar mejor los distintos repuntes que sufrió el nivel del Cinca, pudiéndose identificar con mejor precisión cual de ellos pudo ser provocado por el río Vero.



**Figura 39.** Reconstrucción del limnigrama del episodio de 1997 en Barbastro. Fuente: C.H.E.

En la figura 39 se adjunta el único limnigrama disponible en la estación A095 (Barbastro) en diciembre de 1997, concretamente entre los días 16 y 23. La particularidad que tiene este limnigrama es que la estación no funcionó correctamente durante el episodio, por lo que tuvo que ser reconstruido de forma manual.

La escala del limnigrama no se aprecia de forma correcta, pero cada cuadro grande es de 50cm, por lo que el nivel que obtuvo el Vero en dicha estación rondó los 200cm, cifra contrastada por el encabezado de la figura 36, en la que se afirma que a las diez de la mañana el nivel del río alcanzó los 180 cm.

La única fuente que dispone de datos en Barbastro (se consultó el archivo histórico del Ayuntamiento de Barbastro, la sede de la Comarca del Somontano y el periódico semanal El Cruzado Aragonés) proviene del periódico, al igual que la figura 36, en la cual se afirma que el nivel máximo alcanzado fue de 187 cm en la canalización de la ciudad.



## 6. CONCLUSIONES

El principal objetivo del presente estudio era aplicar las técnicas SIG para la modelización de una crecida fluvial, y se ha cumplido con creces puesto que en la figura 35 se presenta dicho hidrograma.

Esta metodología aplicada ha trabajado con datos pluviométricos exclusivamente, sin interactuar con posibles datos de caudales o niveles de estaciones aforadas. Es decir, que se puede emplear HEC-HMS para modelizar las crecidas de cualquier cuenca fluvial de la que se disponga de una entrada de datos regular de precipitaciones, aunque no esté aforada.

Tras haberlo aplicado a una cuenca aforada, de la cual se ha localizado un episodio de crecida en concreto, con una punta de caudal determinada y obtener un hidrograma de crecida muy similar (Figura 35) se puede afirmar que es una metodología bastante fiable, siempre y cuando los parámetros de entrada sean válidos y se conozcan las propiedades hidrológicas de la cuenca a estudiar, sea aforada o no.

Gracias a los SIG, que se han convertido por otra parte en herramientas muy útiles y validas para el análisis de cuencas fluviales, se han podido incluir todas las variables que definen el comportamiento hidrológico de la cuenca del Vero: MDE, pendientes, número de curva, red fluvial, dirección de flujos, etc.

No obstante las nuevas tecnologías no siempre son sinónimo de buenos resultados. Este mismo proyecto fue ideado para trabajar con las nuevas versiones de HEC-HMS 3.5, HEC-GeoHMS 10 y ArcGIS 10, y sin embargo hubo problemas técnicos en la aplicación HEC-GeoHMS 10 (que sirve de enlace entre ArcGIS 10 y HEC-HMS 3.5) y en la propia importación del modelo de cuenca en HEC-HMS 3.5, que hicieron que hubiera que recurrir a versiones más antiguas de los mismos, versiones obsoletas, pero que garantizan una fiabilidad de resultados.

Así pues hubo que recurrir a los softwares ArcGIS 10, ArcView GIS 3.2, HEC-GeoHMS 1.1 (enlazando ArcView GIS 3.2 con HEC-HMS 3.3) y el propio HEC-HMS 3.3, todos ellos softwares bastante más antiguos que las versiones anteriormente citadas, con las mismas funciones y aplicaciones que las versiones más recientes, pero que han demostrado tener una fiabilidad y una estabilidad a la hora de realizar los distintos procesos del modelado mucho mayor.

## BIBLIOGRAFÍA:

- Benito, G.; Fernández de Villata Compagni, M.; Díez Herrero, A. y Laín Huerta, L. (1999): “Base de datos PALEOTAGUS: Incorporación de la información Paleo-Hidrológica en un SIG para el análisis de riesgos de inundaciones”, en Laín Huerta, L. (Ed.): *Los sistemas de información geográfica en los riesgos naturales y en el medio ambiente*. Madrid, Instituto Tecnológico y Geominero de España, pp. 23-30.
- Bravo Bizarro, B. (2011): *Caracterización y diagnóstico Hidromorfológico de la Cuenca del Río Vero*. Trabajo Académico. Universidad de Zaragoza. 135p.
- Confederación Hidrográfica del Ebro. (2008): *Plan Hidrológico del Río Cinca*. Borrador. 284p.
- Del Valle, J.; Ollero Ojeda, A. y Sánchez Fabre, M. (2007): *Atlas de los ríos de Aragón*, Zaragoza, Ed. Prames. 348p.
- Díez Herrero, A. (2001): *Geomorfología e hidrología fluvial del río Alberche: modelos y S.I.G. para la gestión de riberas*, Tesis Doctoral. Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid.
- Díez Herrero, A. (2002): “Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica al análisis del riesgo de inundaciones fluviales”, en Laín Huerta, L. (Ed.): *Los sistemas de información geográfica en la gestión de los riesgos geológicos y el medio ambiente*, Madrid, Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Medio Ambiente. Riesgos Geológicos, Vol 3: 87-112.
- Domenech, S. (2009): *Modelización Hidrometeorológica de caudales de crecida mediante Sistemas de Información Geográfica (S.I.G.): Aplicación a la cuenca del río Sosa (Huesca)*. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
- Ferrer, F.J. (1993): *Recomendaciones para el Cálculo Hidrometeorológico de avenidas*. Madrid, CEDEX, Ministerio de Obras Públicas, 75 pp.
- Ferrer, M.; Rodríguez, J. y Estrela, T. (1995): “Generación automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica” *Ingeniería del Agua* 2-4, pp. 43-58 .
- Ferrer, M.; Blanco, J. y Ramírez, J. (2006): “Propuesta metodológica para la adaptación del parámetro el número de curva a las nuevas fuentes de datos” *Actas del II Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. Zaragoza.
- Ibisate, A.; Ollero, A. y Díaz, E. (2001): “Las crecidas del río Ara y el evento extraordinario de diciembre de 1997”. *El río Ara es de todos*. Ligüerre de Ara, Asociación río Ara, pp. 65-78.
- Jiménez, J.M. (2005): *Riesgo de inundación y ordenación del territorio en el litoral alicantino*. Tesis Doctoral. Departamento de Geografía. Universidad de Alicante.
- “La riada más caudalosa de la década” *El Cruzado Aragonés*, 20-12-1997, p. 03.
- Losada García, J.A.; Montesinos Aranda, S.; Omedas Margelí, M.; García Vera, M. A. y Galván Plaza, R. (2004): “Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro” en Conesa García, C.; Álvarez Rogel, Y. y Martínez Guevara, J.B. (Eds.), *Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales. Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*. Murcia, Región de Murcia y Universidad de Murcia, Vol. 2: 207-218.

- Ribera Masgrau, L. (2004): “Análisis mediante tecnología SIG, de la vulnerabilidad del sector comercial de la ciudad de Girona a las inundaciones del río Onyar”, en Conesa García, C.; Álvarez Rogel, Y. y Martínez Guevara, J.B. (Eds.), *Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales. Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección*. Murcia, Región de Murcia y Universidad de Murcia, Vol. 2: 233-245.
- Strahler, A. N. (1952): *Dynamic basis of geomorphology*. Geological Society of America Bulletin, Vol. 63, pp.923-938.