



Interreg  
Sudoe



iNUNDATiO

European Regional Development Fund

## MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Proyecto INUNDATIO

Cuenca Piloto: Venero Claro (España)

## 1. Introducción

La presente entrega forma parte del proyecto financiado por fondos del programa europeo INTERREG SUDOE titulado “Automatización del modelado de riesgos de inundaciones en cabeceras de cuenca a través de técnicas de inteligencia artificial y Big Data” y cuyo acrónimo es “INUNDATIO” (Código SOE3/P4/E0929). Se expone, de manera escueta, el desarrollo de la actividad 1.3 “Contextualización del emplazamiento por medio de la investigación geomorfológica, hidrológica de superficie, hidráulica fluvial” y se adjunta parte del entregable 1.3.1 “Modelos hidrológicos e hidrodinámicos 2D de los 3 sitios de estudio; cartografía geomorfológica en cabeceras”. Por todo lo anterior, esta entrega se realiza para la cuenca piloto española de Venero Claro, desarrollando de manera sintética la aplicación de dos modelos hidrológicos, así como una breve sección de resultados con ejemplos gráficos.

Se entiende por modelo hidrológico a aquellos modelos capaces de representar el sistema o ciclo hidrológico de una cuenca y, por tanto, de integrar los elementos básicos del sistema: precipitación, abstracciones iniciales y escorrentía, entre otros. La cantidad de elementos del sistema que permite integrar un modelo depende del tipo de modelo ejecutado y, al mismo tiempo, existe una gran variedad de modelos. Entre las clasificaciones existentes para dichos modelos se pueden citar aquellas basadas en la conceptualización de los procesos básicos (empíricos, teóricos o conceptuales), en la naturaleza del algoritmo básico (estocásticos o determinísticos) y en la representación espacial (agregados, semidistribuidos o distribuidos).

Para la modelación hidrológica de avenidas súbitas o *flash flood* en el caso español de Venero Claro se han empleado dos modelos hidrológicos diferentes: el método del Número de Curva (empírico); y el método de Green-Ampt (teórico). Para completar estos modelos se han empleado otros métodos como la recesión exponencial o el método de Muskingum-Cunge. En otras palabras, se pretende modelizar el proceso de lluvia-escorrentía, para lo cual se ha empleado el método hidrometeorológico del hidrograma unitario y de sus componentes, reconstruyendo los hidrogramas de las tres avenidas súbitas más recientemente producidas en Venero Claro a través de las subcuencas identificadas (modelo semidistribuido).

Finalmente, para lograr este objetivo y calibrar la respuesta hidrológica de la cuenca se ha empleado el software libre HEC-HMS 4.0 y la extensión para ArcGIS HEC-geoHMS 10, integrando en dicho programa los dos modelos hidrológicos citados y todos los elementos necesarios para su simulación.

## 2. Método

HEC-HMS es un potente simulador de los procesos hidrológicos que se producen en una cuenca. Este programa de dominio público fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de la armada de los EE.UU (*US Army Corps of Engineers*). Permite calcular modelos hidrológicos semidistribuidos para crecidas, por lo que es un programa adecuado para el fin perseguido. Además, gracias a su potente módulo estadístico permite una calibración correcta del modelo.

Los proyectos elaborados en HEC-HMS constan de: (1) los elementos hidrológicos; (2) el modelo meteorológico; (3) las opciones de modelación. En el primer grupo se tratan los datos espaciales de la cuenca para obtener los elementos necesarios sobre los que aplicar el modelo. En el segundo grupo se definen todas las componentes necesarias para transformar adecuadamente la lluvia en escorrentía superficial, tales como la onda de avenida, la estimación del flujo base o el hidrograma de escorrentía. Finalmente, el tercer grupo consta de

los parámetros previos del programa para comenzar el proceso de calibración, los cuales no serán tratados en este informe. A lo largo de los siguientes apartados se desarrollan los tres grupos presentados.

### 1. Elementos hidrológicos.

Los elementos hidrológicos se componen de las subcuencas y de la red de drenaje. Estos elementos se pueden obtener automáticamente con diversos programas de delineación automática basados en el algoritmo desarrollado por Jensen y Domingue en 1988. En este caso se ha empleado el módulo del programa HEC-HMS llamado HEC-geoHMS 10 para realizar el proceso mediante un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de 25 m y obtener los elementos hidrológicos. Tras ello, estos elementos han sido procesados con para eliminar subcuencas que se consideran demasiado pequeñas y, por ello, se han unido a cuencas adyacentes de características similares.

### 2. Modelo meteorológico.

Respecto al modelo meteorológico cabe destacar que la cuenca presenta la instrumentación necesaria para la obtención de datos: seis pluviómetros, dos limnímetros, un dispositivo TDR de la humedad del suelo, un radar meteorológico portátil de alta resolución y dos estaciones meteorológicas, a lo que se le sumarán la futura instalación de varios disdrómetros. Mediante esta instrumentación se ha obtenido el registro de caudales empleando una curva de gasto. En un segundo paso se han diferenciado los eventos individuales de precipitación, considerando aquellos que generan un caudal punta igual o superior a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  y diferenciando eventos cuantos se produce una pausa de un mínimo de 6 horas sin precipitación. En total se han identificado 3 eventos en la serie temporal reciente para los cuales se ha definido un hietograma. Posteriormente, al emplear un modelo semidistribuido se han definido hietogramas sintéticos para cada subcuenca considerada, empleando la técnica de interpolación del inverso del inverso al cuadrado de la distancia, así como los diferentes elementos que componen el modelo hidrológico. Estos elementos son:

#### a. Abstracciones iniciales.

Un elemento básico para el modelo meteorológico son las abstracciones iniciales. Para su caracterización se ha empleado el método del Número de Curva y el método de Green-Ampt.

- **Numero de Curva.** El primer método emplea un umbral a partir del cual se comienza a producir escorrentía, diferenciando por tanto la abstracción inicial. Este umbral se calcula exclusivamente con el Número de Curva. Por esta razón se ha obtenido el número de curva empleando los datos de cobertura vegetal (fracción de cabida cubierta), extraídos mediante el Mapa Forestal de España (MFE25); los datos de uso del suelo, extraídos mediante el Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España (SIOSE); y los grupos de suelo establecidos por el *Soil Conservation Service* (SCS), asignados aplicando el concepto de catena, por el cual se establece una relación directa entre el grupo de suelo y el relieve. Finalmente, para introducir un único Número de Curva en cada subcuenca se ha calculado el promedio del NC en función de la superficie ocupada por cada número de curva en cada subcuenca.

- **Green-Ampt.** El segundo método emplea la ecuación integral de Richard's para flujo de agua en el suelo, la cual necesita los datos, para cada subcuenca: (1) del contenido inicial de agua; (2) del contenido saturado de agua (porosidad); (3) de la succión; (4) de la conductividad hidráulica; (5) y del porcentaje impermeable. Estos parámetros se han estimado tomando muestras de suelo y analizando las componentes de este. De esta manera se han estimado los parámetros de porosidad, succión y conductividad hidráulica (2-4) empleando las relaciones de Maidment. El contenido inicial se ha estimado como el 70% del valor de porosidad (1). Una vez calculados los datos se ha calculado la media de los valores obtenidos para cada grupo de suelo en cada subcuenca, necesario para incluir un único valor promedio en cada subcuenca. Por último, para incluir la intercepción de la cobertura vegetal se han empleado el almacenamiento máximo (que se corresponde con la abstracción inicial) y el almacenamiento inicial. Para el primer caso se ha utilizado la fórmula empírica descrita en el método del Número de Curva, mientras que para el segundo caso se han considerado las condiciones de humedad previas al evento.

#### **b. Hidrograma de escurrimiento**

Para el cálculo del hidrograma unitario y del hidrograma se ha empleado el hidrograma unitario sintético y adimensional elaborado por el SCS. Para poder incluir este hidrograma en HEC-HMS se ha calculado el tiempo de demora a partir del tiempo de concentración mediante una ecuación empírica del SCS, mientras que el tiempo de concentración se ha calculado con la fórmula de Témez.

#### **c. Estimación del flujo de base.**

El método empleado para el cálculo del flujo de base ha sido la recesión exponencial. Para lograr simular el flujo de base en HEC-HMS ha sido necesario incluir el flujo de base inicial (flujo en  $\text{m}^3/\text{s}$  registrado antes del comienzo del ascenso del hidrograma), la constante de decaimiento  $k$  y la proporción del ratio. A partir de los valores del hidrograma a la salida de la cuenca se han podido calcular los dos últimos valores que, al mantenerse constantes, se han aplicado a cada subcuenca. Sin embargo, el flujo de base inicial se ha repartido entre las subcuencas ponderando por el área de estas.

#### **d. Onda de avenida.**

Se ha empleado el método de Muskingum-Cunge para la simulación de la propagación de la onda de avenida a través de los diferentes tramos identificados. Para integrarlo en HEC-HMS se han calculado los parámetros necesarios para cada tramo de la red: (1) longitud del tramo; (2) pendiente del tramo; (3) rugosidad  $n$  de Manning; (4) forma del canal; (5) ancho de fondo; (6) y pendiente de los márgenes.

Los primeros parámetros de longitud del tramo y de pendiente del tramo se han obtenido del modelo generado por HEC-geoHMS; la rugosidad se ha estimado a partir de fotografías de tramos; la forma del canal se ha considerado trapezoidal para todos los tramos y el ancho de estos se ha estimado mediante la revisión de ortofotografías PNOA (mosaico de imágenes de máxima resolución); por último, la pendiente de los márgenes se ha obtenido mediante el Modelo Digital de Elevaciones.

### Calibración del modelo

Con todos los datos descritos anteriormente se puede generar la simulación y realizar el proceso de calibración del modelo. Este proceso es realizado gracias a las funciones objetivo de

HEC-HMS, de las cuales han sido empleadas el porcentaje de error en el caudal punta, el porcentaje de error en el volumen y el porcentaje de error en el tiempo de la punta. Empleando estas funciones objetivos de calibración se han buscado aquellos parámetros razonables y adecuados mediante el método de búsqueda del gradiente univariado. Este método realiza sucesivas correcciones de un parámetro concreto mediante iteración. De esta manera, el proceso comienza con la introducción manual y los rangos de variación máximos de los parámetros y el método calibra uno por uno los parámetros. Después de finalizar el proceso se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros con el fin de identificar aquellos que generen cambios significativos en el modelo mediante pequeñas modificaciones (al incrementarse en un 1%). Con este análisis se han identificado y modificado los parámetros con una alta sensibilidad (mayor de 0,2).

Finalmente, se ha realizado un análisis de correlación entre los caudales observados y simulados para analizar cuál de los dos métodos se ajusta mejor a la realidad y, por tanto, cual de los modelos considera mejor los diferentes elementos del modelo hidrológico, tales como las abstracciones iniciales.

### 3. Resultados

Para el caso español de Venero Claro se ha desarrollado un modelo de 25 subcuencas y 15 tramos de propagación en el cual se ha simulado un modelo semidistribuido de 3 eventos diferentes de avenidas súbitas. Mediante estas simulaciones se ha obtenido la respuesta de la cuenca en los tres eventos diferentes mediante los dos métodos empleados: Número de Curva y Green-Ampt. Se puede observar que ambos métodos proporcionan un hidrograma simulado aceptable – lo que se produce en los tres eventos simulados. Entre el hidrograma simulado y observado se producen diferencias inferiores al 20% en el caudal punta y el volumen de escorrentía para los eventos 1 y 2, mientras que únicamente se supera esta cifra para el caudal punta modelizado mediante el método del Número de Curva para el evento 3. También se puede observar una mayor similitud entre las curvas de ascenso que entre las curvas de descenso del hidrograma, esto es porque las primeras dependen de los parámetros iniciales introducidos, mientras que en las segundas intervienen las estimaciones realizadas por los modelos.

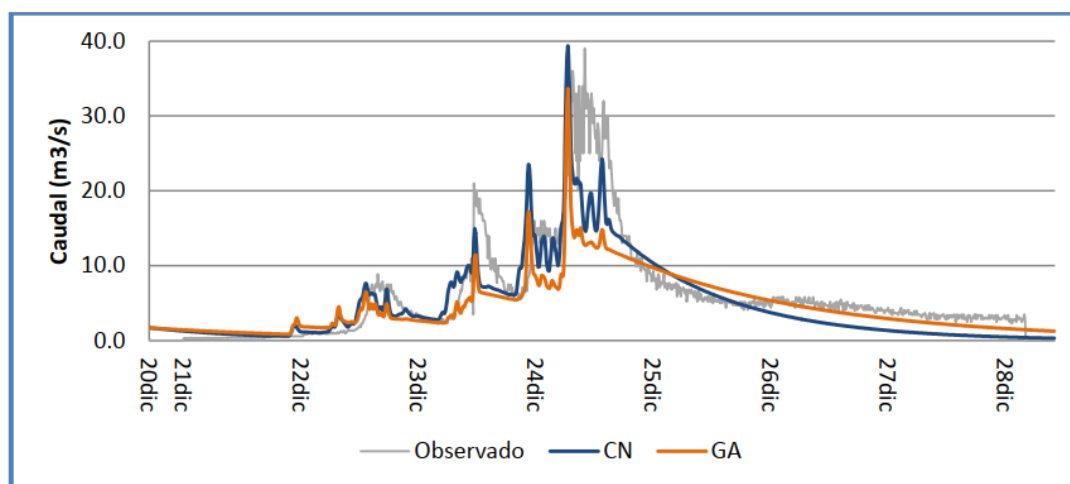


Figura 1. Ejemplo: Resultado de calibración del evento 1 (20-28 diciembre 2009), empleando el método del número de curva (CN, línea azul) y Green-Ampt (GA, línea naranja). El caudal observado se representa en gris

		Evento 1		Evento 2		Evento 3	
		CN	GA	CN	GA	CN	GA
Caudal punta	Obs	39		9.9		13	
	Sim	39.4	33.7	10.1	10.5	15.9	14
	Dif (m³/s)	0.4	-5.3	0.2	0.6	2.9	1
	Dif (%)	1.0	-13.6	2.0	6.1	22.3	7.7
Volumen de escorrentía	Obs	258.51		321.81		145.46	
	Sim	218.34	207.62	305.74	273.74	143.03	145.47
	Dif (mm)	-40.17	-50.89	16.07	-48.07	-2.43	0.01
	Dif (%)	-15.5	-19.7	5	-14.9	-1.7	0
Tiempo de pico	Obs	24dic (10:00)		23may (11:00)		7dic (23:40)	7dic (23:40)
	Sim	24dic (06:30)	24dic (06:30)	23may (18:00)	23may (17:50)	7dic (22:20)	7dic (22:30)

Figura 2. Tabla resumen de las diferencias entre los modelos simulados para los eventos calibrados.

Respecto a la correlación entre los caudales simulado y observado se ha calculado el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) para los tres elementos, considerando que se produce un ajuste razonable para ambos métodos en todos los eventos. No obstante, se considera que, debido a la similitud entre ambos métodos, es más adecuado conceptualmente emplear el método de Green-Ampt, pues este método se basa en propiedades teóricas y físicas del suelo, al contrario que el método del Número de Curva, basado en aproximaciones empíricas. Además, el método de Green-Ampts puede ser empleado para cuencas no instrumentadas, requiriendo únicamente realizar y analizar tomas de muestras del suelo.

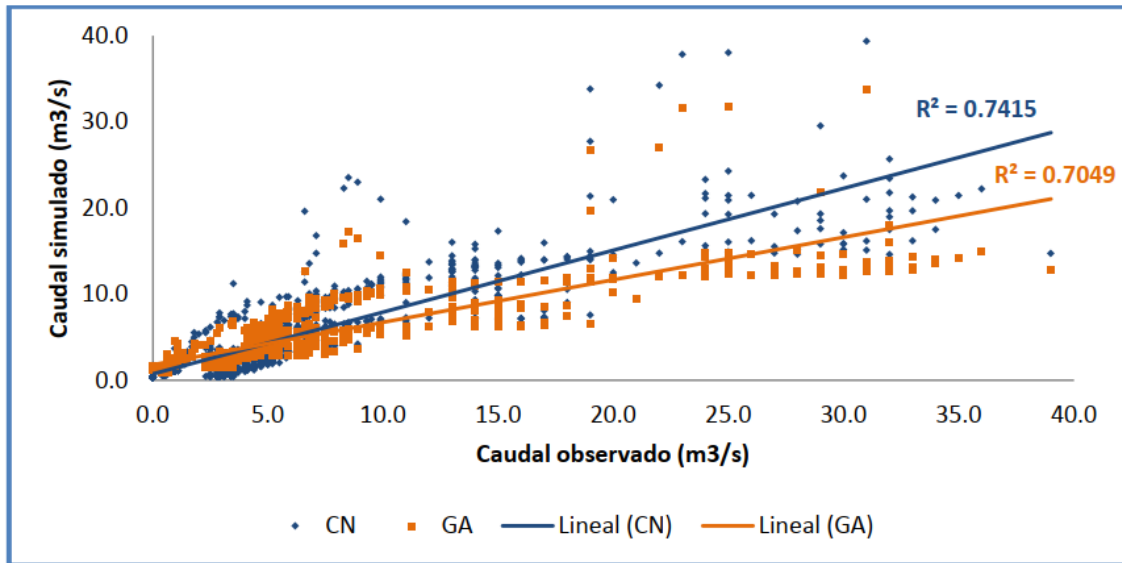


Figura 3. Comparación de los flujos observado y simulado para ambos métodos en el evento 1 (20-28 diciembre 2009)

#### 4. Referencias

AROCA JIMÉNEZ, Estefanía Carmen, et al. Importancia de las abstracciones iniciales para la génesis de avenidas en cuencas de montaña. 2014.