

# ***Aplicación del modelo IBER al estudio hidráulico del arroyo de la Almucera en Quiruelas de Vidriales (Zamora)***

*Dña. Patricia Marcos García. Tragsatec S.A. [pmarcos@tragsa.es](mailto:pmarcos@tragsa.es)*

*D. Rogelio Anta Otoel. Confederación Hidrográfica del Duero [rao@chduero.es](mailto:rao@chduero.es)*

*D. Jose Manuel Herrero Ramos. Confederación Hidrográfica del Duero [jhr.za@chduero.es](mailto:jhr.za@chduero.es)*

*D. Ramón Goya Azañedo. Confederación Hidrográfica del Duero [rga.dt@chduero.es](mailto:rga.dt@chduero.es)*

*D. Miguel Ángel Cuadrado Rica. Confederación Hidrográfica del Duero [mcr.ca@chduero.es](mailto:mcr.ca@chduero.es)*

## **1 Introducción**

El arroyo de la Almucera es un cauce localizado en la comarca de Los Valles de Benavente (Zamora), que recorre desde su nacimiento, en el término municipal de Congosta de Vidriales (en las proximidades de la línea divisoria entre las provincias de León y Zamora), hasta su desembocadura en el río Tera por su margen izquierda, aguas abajo del núcleo de Mózar de Valverde (Zamora), una longitud aproximada de unos 45 km y un desnivel de unos 215 m. Su nombre deriva de la palabra árabe “Al-Muzara’ah”, que alude a un sistema de acuerdo para cultivar los campos entre el propietario de la tierra y el agricultor.

Los episodios relativamente frecuentes de inundaciones en algunas de las localidades situadas en sus inmediaciones, debido a la extensa cuenca, escasa pendiente y la consecuente superación de la capacidad natural del cauce, motivaron en el pasado la ejecución de una serie de obras de encauzamiento y defensa de márgenes en gran parte de su longitud, que se han manifestado, en parte, ineficaces y que han supuesto la ruptura de la conectividad transversal entre el cauce y su llanura de inundación. Actualmente, debido a lo anteriormente expuesto, así como al problema de eutrofización derivado de la abundante carga de nutrientes procedente de los vertidos de los núcleos urbanos próximos, así como de algunas instalaciones ganaderas localizadas en la parte alta de la cuenca, la masa de agua DU-238 “Arroyo de la Almucera desde confluencia con arroyo del Real hasta confluencia con río Tera” presenta dificultades para alcanzar el buen estado global previsto con anterioridad al año 2015.

En este sentido, y tras los eventos de crecida ocurridos en febrero y marzo de 2010, que afectaron a una parte importante del núcleo de Quiruelas de Vidriales, la Confederación Hidrográfica del Duero decidió realizar un estudio hidráulico pormenorizado de la problemática de la zona, con dos objetivos fundamentales: por un lado, analizar las posibles alternativas para proteger el casco urbano de Quiruelas de Vidriales frente a eventuales desbordamientos del arroyo de la Almucera y, por otro, estudiar la funcionalidad de las defensas laterales existentes, a fin de eliminar aquéllas que no fuesen estrictamente necesarias y recuperar la conectividad lateral del cauce con sus llanuras de inundación, mejorando la hidromorfología de la zona.



*Figura 1 Quiruelas de Vidriales, fotografía publicada en el diario “La Opinión de Zamora” (01/03/2010)*

## 2 Características del tramo analizado

El tramo analizado posee unos cinco kilómetros de longitud y se extiende desde la localidad de Quintanilla de Urz hasta aguas abajo de Colinas de Trasmonte, puesto que, además de la necesidad de limitar la influencia de las condiciones de contorno sobre los resultados en la zona de interés, había que incluir dos infraestructuras ubicadas, respectivamente, aguas arriba y aguas abajo de Quiruelas: la Autovía de las Rías Bajas (A-52), situada aguas arriba de Quiruelas y la carretera N-525 (de Benavente a Santiago de Compostela), situada aguas abajo, puesto que era previsible que condicionasen en gran medida el comportamiento hidráulico del arroyo.

Asimismo, en el tramo analizado se ubica la carretera de Quiruelas de Vidriales a Aguilar de Tera, que tiene una importancia fundamental en el estudio.

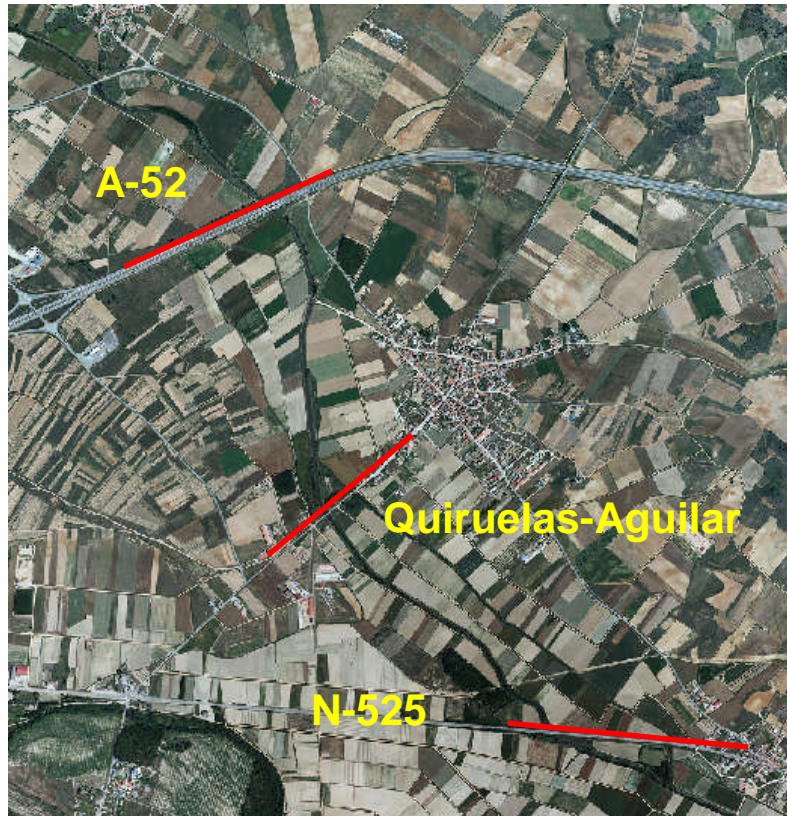


Figura 2 Vista general del tramo en estudio. Principales infraestructuras

## 3 Elección del modelo hidráulico

### 3.1 Descripción del modelo adoptado

Para el presente estudio, y por las razones que se expondrán a continuación, se ha decidido emplear el modelo IBER, cuya última versión disponible cuando se comenzó a redactar el estudio era la v.1.04.

A este respecto, se debe indicar que IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios, promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en el marco de un Convenio de Colaboración suscrito entre el CEDEX y la Dirección General del Agua, y desarrollado en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA, perteneciente a la Universidad de A Coruña), el Grupo FLUMEN (de la Universitat Politècnica de Catalunya y de la Universitat de Barcelona) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE, vinculado a la Universitat Politècnica de Catalunya).

### 3.2 Justificación de la elección del modelo

El arroyo de la Almuera es un cauce fuertemente antropizado, donde se han realizado numerosas obras de defensa y encauzamiento. Una sección transversal típica del arroyo, donde se observa la presencia de sendas motas en las dos márgenes, se muestra en la figura siguiente:

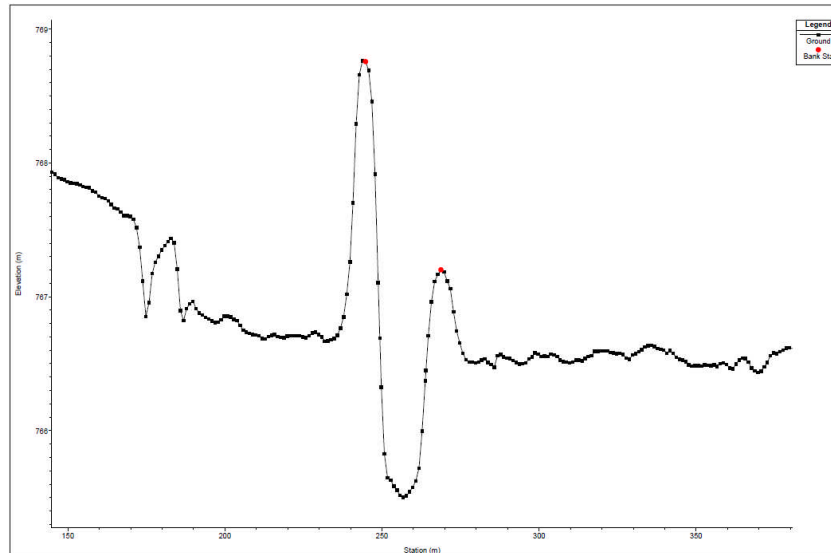


Figura 3 Sección transversal típica del arroyo de la Almuera

En esta situación, es de esperar que cuando el agua desborda las motas, la componente transversal de la velocidad tenga un valor importante y no se cumplan las hipótesis inherentes al flujo unidimensional. Dado que esta circunstancia no tiene un carácter puntual (que se podría resolver mediante una condición de contorno interna), al estar la totalidad del tramo encauzado, se ha optado por emplear un modelo bidimensional, a pesar de la mayor complejidad y el coste computacional que supone, frente a la utilización de un modelo unidimensional.

## 4 Topografía de la zona

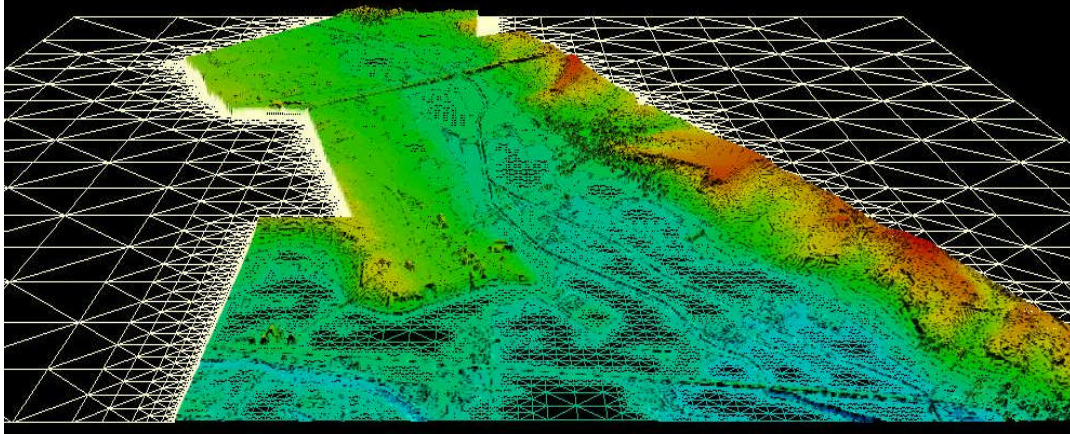
### 4.1 Obtención de la topografía de partida

Se ha empleado el modelo digital de elevaciones de la zona, generado para los estudios correspondientes al Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables en la cuenca del Duero. En este sentido, se realizó un vuelo LIDAR del que se obtuvo una malla regular de dos puntos por metro cuadrado, con una precisión altimétrica de 15 cm.

Como bien es conocido, los pulsos LIDAR no son capaces de atravesar la lámina de agua, por lo que las secciones transversales parecen tener un fondo “plano”, que en realidad no es el terreno si no la superficie de agua existente en el momento del vuelo. Para ello, el procedimiento habitual consiste en realizar perfiles batimétricos e integrarlos con la topografía resultante del vuelo, a fin de obtener una correcta definición de la morfología del cauce.

No obstante, en este caso se ha trabajado directamente con el Modelo Digital de Elevaciones obtenido a partir del vuelo LIDAR, sin realizar batimetría complementaria. Las razones de esta decisión son fundamentalmente tres: en primer lugar, el cauce del arroyo de la Almuera es relativamente pequeño y, debido a su alto grado de antropización, no presenta la variabilidad morfológica típica de los cauces en estado natural. En segundo lugar, cuando se programaron los vuelos se intentó que se realizaran cuando el nivel de agua en el cauce era más bajo; tras analizar diversas secciones transversales obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevaciones, se ha

estimado que el caudal circulante por el arroyo de la Almucera en el momento del vuelo no era de mucha entidad. Por último, dado que el objeto del presente estudio hidráulico es el análisis de las posibles alternativas para solucionar los problemas de inundabilidad del núcleo urbano de Quiruelas, se va a trabajar con caudales asociados a periodos de retorno relativamente altos. Esta circunstancia limita la influencia de utilizar esta topografía sobre el resultado final del estudio.



*Figura 4 Imagen 3D del Modelo Digital de Elevaciones en el tramo de estudio*

#### **4.2 Generación de la malla de cálculo**

La generación de la malla de cálculo con IBER se realizó a través de la herramienta “RTIN”, capaz de crear e importar una geometría formada por una red de triángulos rectángulos a partir de un Modelo Digital del Terreno en formato ASCII de ArcInfo.

En este sentido, se fijó como límite una tolerancia máxima de importación de 0,15 m, acorde con la precisión altimétrica del vuelo LIDAR. Asimismo, se limitó el valor del lado máximo de los triángulos generados a 25 m.

### **5 Asignación de coeficientes de Manning**

Los coeficientes de Manning se asignaron en función de las distintas coberturas del suelo obtenidas a partir del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), un proyecto a nivel nacional cuya coordinación y gestión corresponden al Instituto Geográfico Nacional (IGN) y al Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

*Tabla 1 Coeficientes de Manning en función de los usos del suelo*

Usos del suelo	Manning
Cauce	0,040
Improductivo	0,020
Regadío	0,050
Chopo y álamo	0,120
Viñedos	0,050
Secano	0,045
Otras frondosas	0,120
Pastizal y matorral	0,050

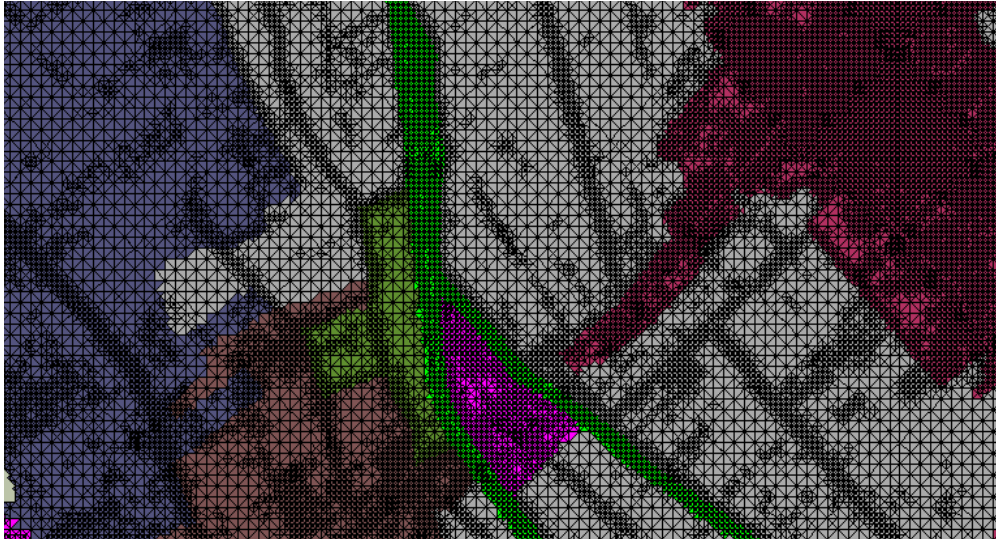


Figura 5 Asignación automática de coeficientes de Manning en función de la cobertura de usos del suelo

## 6 Asignación de condiciones de contorno e iniciales

### 6.1 Hidrogramas de entrada

Se han establecido dos tipos de hidrogramas de entrada, dependiendo de si se quería ejecutar la simulación en régimen permanente o en régimen variable.

#### 6.1.1 Régimen permanente

Se han introducido hidrogramas de cálculo con crecimiento lineal hasta el caudal punta obtenido en el estudio hidrológico previo para cada periodo de retorno, que se mantienen constantes a partir de la segunda hora y se ha establecido un tiempo de simulación suficiente para que el caudal de salida iguale al caudal de entrada.

Tabla 2 Resumen de caudales punta

T(años)	2	5	10	25	50	100	200	500
Q(m <sup>3</sup> /s)	30	51	72	98	135	171	188	212

#### 6.1.2 Régimen variable

Se han introducido los hidrogramas obtenidos en el estudio hidrológico previo, imponiendo un tiempo de simulación suficiente para que se produzca el tránsito de la avenida.

### 6.2 Condición de contorno de salida

Se han asignado a los elementos del contorno de salida de la malla una condición tipo vertedero.

### 6.3 Condición inicial

Se ha especificado que todos los elementos de la malla estaban secos (calado nulo).

## 7 Condiciones internas

### 7.1 Evaluación de pérdidas de carga localizadas

En primer lugar, se decidió evaluar las pérdidas de carga localizadas en los puentes existentes en el tramo, mediante una modelización complementaria con el programa HEC-RAS v.4.1.0.

Se ha de señalar que el modelo IBER permite introducir los puentes como combinación de vertedero y compuerta, o bien especificando el valor del coeficiente de pérdidas localizadas. En cuanto a las pilas, pueden incorporarse a la malla de cálculo. Por ello, en primer lugar se consideró más sencillo realizar una simulación inicial con HEC-RAS, que permite definir las secciones de los puentes mediante coordenadas, a fin de ver la influencia real que iban a tener en la simulación. Asimismo, se emplearon las secciones cortadas a partir del Modelo Digital del Terreno para analizar la definición del cauce, dada la problemática expuesta en el epígrafe 4.1.

No obstante, al final se decidió realizar una primera simulación sin condiciones internas donde se identificaron las obras de fábrica donde los calados obtenidos eran superiores a la cota inferior del tablero, introduciéndolas a continuación como combinación de vertedero y compuerta.

### 7.2 Diagnóstico inicial de las obras de fábrica existentes

#### 7.2.1 Autovía A-52

La llanura de inundación aguas arriba del terraplén de la autovía es tan amplia, que los cuatro pasos inferiores existentes a ambos lados del viaducto entran en funcionamiento, aunque su dimensionamiento es suficiente para evitar que entren en carga con la avenida de 100 años de periodo de retorno del arroyo de la Almucera.

#### 7.2.2 Carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera

El puente sobre el arroyo San Juan, de mampostería y tres arcos, así como la obra de fábrica denominada 2 en la Figura 6, también de mampostería y dos arcos, presentan una sección de desagüe que podría resultar insuficiente. Además, la obra de fábrica 2 apenas presenta pendiente longitudinal.

En cuanto a las baterías de tubos existentes en la isleta (numeradas como 3, 4 y 5 en la Figura 6), presentan diámetros respectivos de 1 m, 0,80 m y 0,75 m, por lo que su capacidad de evacuación del flujo es muy limitada y además existe un riesgo considerable de obstrucción de los conductos.

Por último, en relación al pontón sobre el arroyo de la Almucera (la número 6 de la figura siguiente), a priori se considera que su dimensionamiento es óptimo (15 m de luz libre).



Figura 6 Planta de situación de obras de fábrica bajo la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera

### 7.2.3 Carretera N-525

Las obras de paso bajo la carretera nacional presentan una capacidad de evacuación a todas luces insuficiente, por lo que la carretera supone un verdadero “dique” ante eventos de crecida.

## 8 Estudio de la situación actual

### 8.1 Análisis de la problemática existente

De las simulaciones ejecutadas en la situación actual para los periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, se extraen las siguientes conclusiones:



Figura 7 Lámina de agua correspondiente a la avenida de 100 años en la situación actual

- Los pasos bajo la autovía A-52 determinan cómo se distribuye el flujo aguas abajo, puesto que la llanura de inundación es tan amplia que todos entran en funcionamiento.
- La carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera tiene pendiente hacia el pueblo, por lo que una vez que supera la carretera, el flujo se dirige hacia el interior del núcleo urbano. Por tanto, las posibles alternativas que se propongan deberán ir encaminadas a evitar que el agua supere la rasante de la carretera.
- En este sentido, los principales problemas se detectan en los cruces de las carreteras de Quiruelas a Aguilar de Tera y en la N-525, cuyas obras de drenaje transversal no son suficientes para evacuar el caudal de referencia.
- En cualquier caso, los problemas de inundabilidad del núcleo urbano se deben principalmente a la presencia de la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera.

## 9 Análisis de las motas existentes

Tal y como se ha expuesto, las motas existentes resultan ineficaces ante los eventos de crecida del arroyo de la Almucera, presentando también el inconveniente añadido de impedir el retorno del agua de las llanuras de inundación al cauce, es decir, suponiendo un obstáculo para la conectividad lateral del mismo. Por tanto, se decidió estudiar una situación ficticia eliminando las motas existentes del Modelo Digital de Elevaciones.

Tras realizar la simulación en la situación modificada (sin las motas), se observa que la componente horizontal de los vectores velocidad en la llanura de inundación tiene sentido hacia el pueblo. Por tanto, el agua de la llanura de inundación de la margen derecha se reintegra al cauce, que desborda hacia la izquierda y se acumula en el punto crítico (es decir, en la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera, hasta que sobrepasa la rasante y comienza a entrar en el pueblo).

Sin embargo, dejando la mota de la margen izquierda del arroyo de la Almucera, se impide que al retornar el agua de la margen derecha al cauce éste desborde hacia la izquierda, hasta llegar a la zona de la isleta. A este respecto, se propone mantener únicamente esta mota desde aguas abajo de la autovía A-52 hasta la bifurcación de la Almucera y el arroyo de San Juan.

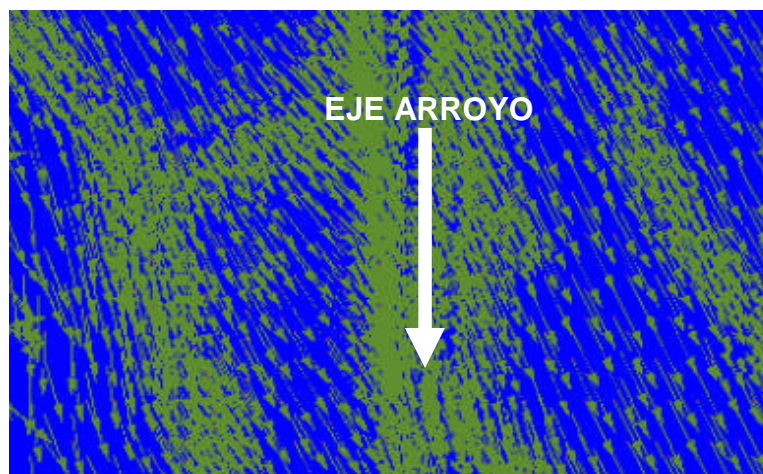


Figura 8 Vectores velocidad en la simulación sin motas

## 10 Estudio de soluciones

Una vez realizado el estudio hidráulico de la situación actual e identificada la problemática de la zona, se decidió adoptar una solución que contemplaba las siguientes actuaciones complementarias:

### 10.1 Retirada de las motas existentes

Se propone eliminar las motas existentes, excepto la de la margen izquierda del arroyo de la Almucera desde aguas abajo de la autovía A-52 hasta el comienzo de la isleta entre el arroyo de la Almucera y el arroyo San Juan.

### 10.2 Explanación de la isleta entre los dos arroyos

Se plantea desbrozar y rebajar la cota de la isleta existente entre los arroyos de la Almucera y de San Juan un máximo de 75 cm, a fin de favorecer las condiciones de evacuación del flujo en régimen de avenidas.

Asimismo, y como ya se ha señalado, se eliminan las motas del arroyo de la Almucera a su paso por la isleta, para que una vez que el cauce desborda, el agua circule sobre la isleta y entren en funcionamiento los pasos bajo la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera.



De igual modo, se propone retirar las motas del arroyo San Juan, a fin de que el desagüe de la llanura de inundación izquierda se produzca lo más rápidamente posible y demoler la edificación existente.

### 10.3 Recrecimiento de camino agrícola

Se propone recrecer el camino agrícola existente entre la margen izquierda del arroyo de la Almucera, y prolongarlo en paralelo a la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera hasta el puente sobre el arroyo de San Juan, a fin de evitar que la lámina de agua sobrepase la carretera y fluya hacia el pueblo.

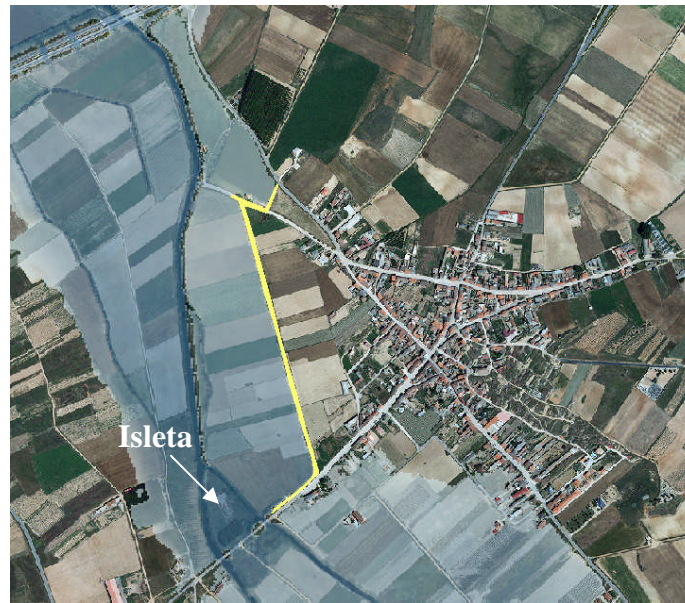


Figura 9 Planta del camino y lámina de inundación  $T=100$  años en la situación actual.

### 10.4 Ampliación de la capacidad de paso bajo la carretera de Quiruelas a Aguilar

Las obras de paso existentes en la isleta presentan una capacidad de desagüe limitada y un funcionamiento deficiente, por lo que se propone sustituir algunas de ellas por otras de mayor sección transversal. Además, al rebajar la cota de la isleta, la solera de algunas de las obras existentes quedaría por encima de la del terreno, por lo que sería necesario que la lámina de agua se elevase una cierta cota antes de que entraran en funcionamiento.

En este sentido, se ha realizado un estudio complementario de la capacidad de desagüe a implantar en la isleta, a fin de optimizar la solución final.

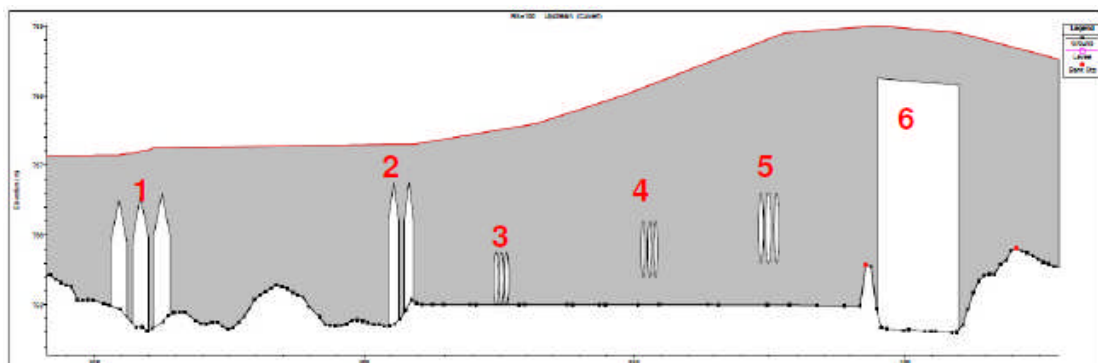


Figura 10 Obras de fábrica existentes en la isleta.

## 11 Optimización de la solución

Para un primer estudio de soluciones, se ha decidido realizar un modelo unidimensional del flujo bajo la carretera de Quiruelas a Aguilar de Tera. Esta elección ha estado motivada porque, tras la explicación de la isleta, se podían aceptar las simplificaciones inherentes a este tipo de modelos, lo que suponía un ahorro de tiempo y coste computacional importante.

El programa utilizado para tal fin ha sido HEC-RAS v.4.1.0., así como la extensión HEC-GeoRAS compatible con ArcGis 9.3.

En este sentido, el primer paso consistió en tantear las condiciones de contorno que daban alturas de lámina de agua similares al modelo bidimensional en las secciones de referencia, donde los vectores de flujo eran prácticamente paralelos. Para ello, como se pretendía utilizar la rutina de cálculo “Multiple Opening Approach”, que únicamente permite ejecutar la simulación en régimen subcrítico, se impuso como condición de contorno en la última sección aguas abajo una altura de agua conocida (“Known Water Surface”), que se había obtenido previamente del modelo bidimensional (simulando la solución sin optimizar, con una capacidad de desagüe mayor que la necesaria).

Como avenida de proyecto se ha empleado la correspondiente a 100 años de periodo de retorno, ejecutando la simulación en régimen permanente, lo que permitirá estar del lado de la seguridad al no tener en cuenta la laminación del hidrograma de crecida en el tramo y la consecuente disminución del caudal punta.

A continuación, se evaluaron diferentes alternativas, de modo que en ningún caso la altura de lámina de agua aguas arriba de la carretera superase la del recrecimiento del camino propuesto.

Finalmente, se propuso como solución mínima sustituir las baterías de tubos existentes (señaladas como 3, 4 y 5 en la Figura 10) por tres marcos de hormigón de 6x2 metros, recomendando la sustitución de la número 2 y la ampliación de la capacidad del puente sobre el arroyo de San Juan.

## 12 Apuntes sobre el modelo IBER

Las ventajas que ha supuesto el uso de un modelo bidimensional como es IBER en el presente estudio son patentes, puesto que un modelo unidimensional como HEC-RAS no hubiese permitido caracterizar adecuadamente el flujo en las llanuras de inundación y determinar la funcionalidad de las motas existentes.

No obstante, se considera que podría ser de interés que incluyese la posibilidad de acoplar en puntos específicos la simulación bidimensional con tramos de simulación puramente unidimensional, a fin de permitir un mejor análisis de las infraestructuras existentes sin necesidad de recurrir a otro modelo complementario.

## 13 Referencias bibliográficas

CEDEX, GEAMA, FLUMEN y CIMNE 2010: *IBER. Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas. Manual básico de usuario.*

US Army Corps of Engineers 2010: *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1.*

US Army Corps of Engineers 2010: *HEC-RAS River Analysis System User's Manual. Version 4.1.*