

# Aplicación de la modelización matemática en la ingeniería fluvial

Miguel Hernanz Sánchez<sup>(1)</sup>, Marta González Sánchez<sup>(1)</sup>, José Manuel García-Guijas Redondo<sup>(1)</sup>, Alfonso Saiz de la Hoya Zamacola<sup>(1)</sup>, Francisco Javier Sánchez Martínez<sup>(2)</sup>, Mónica Aparicio Martín<sup>(2)</sup>

(1) Dirección Técnica de Tragsa

(2) Subdirección de Gestión Integrada del Dominio Público Hidráulico. Dirección General del Agua. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente

jgarcia5@tragsa.es

---

No solo en el ámbito de la ingeniería fluvial, sino, cada vez más en otros campos de la ingeniería, la modelización es una herramienta que permite reducir costes, y mejorar los rendimientos de las obras acometidas.

Para el desarrollo de proyectos de estabilización de taludes en ríos nos apoyamos en las modelizaciones hidrológico-hidráulica y de mecánica de suelos, complementadas con las tecnologías LIDAR, para obtener la topografía. Todo esto nos permite prever cómo van a reaccionar las actuaciones realizadas frente a condiciones normales y límite.

Debido al desarrollo de medios computacionales, cada vez más potentes, se ha producido un avance significativo en la ingeniería fluvial con los modelos hidráulicos bidimensionales. Tales modelos ya no contemplan el flujo del agua en una sola dirección, como lo hacían hasta hace poco los modelos existentes, y al considerar este en dos direcciones, han permitido aumentar significativamente la precisión en el cálculo de velocidades y tensiones. Respecto de la modelización de la mecánica de suelos, resulta fundamental poder asegurar la estabilidad de estos, tanto una vez terminados los trabajos como en el transcurso de los mismos (Ej. paso de maquinaria).

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La modelización es una herramienta que permite reducir costes, y mejorar los rendimientos de las obras acometidas. El aumento de la capacidad computacional de los equipos informáticos ha permitido hacer modelos matemáticos cada vez más complejos, abarcando cada vez más variables. Entendiendo por modelo matemático el conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno, que conduce a un problema matemático que es necesario resolver mediante las técnicas apropiadas.

En muchos casos las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos no pueden resolverse analíticamente, por ejemplo, las ecuaciones de Saint Venant todavía no tienen solución, por lo que es necesario utilizar métodos aproximados mediante un proceso de computación, siendo los más utilizados los métodos de elementos finitos y el de diferencia finitas. El primero, discretiza el medio en que tiene lugar el fenómeno en estudio utilizando comúnmente una red de triángulos o malla, mientras que el segundo, utiliza de manera global la red de rectángulos, que es menos complicada, y proporciona una descripción suficiente de los contornos. La esencia de éste método de diferencia finitas, es sustituir los sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que rigen el fenómeno en estudio, por sistemas de ecuaciones algebraicas proporcionando valores en los puntos de la malla mediante la solución de métodos explícitos e implícitos.

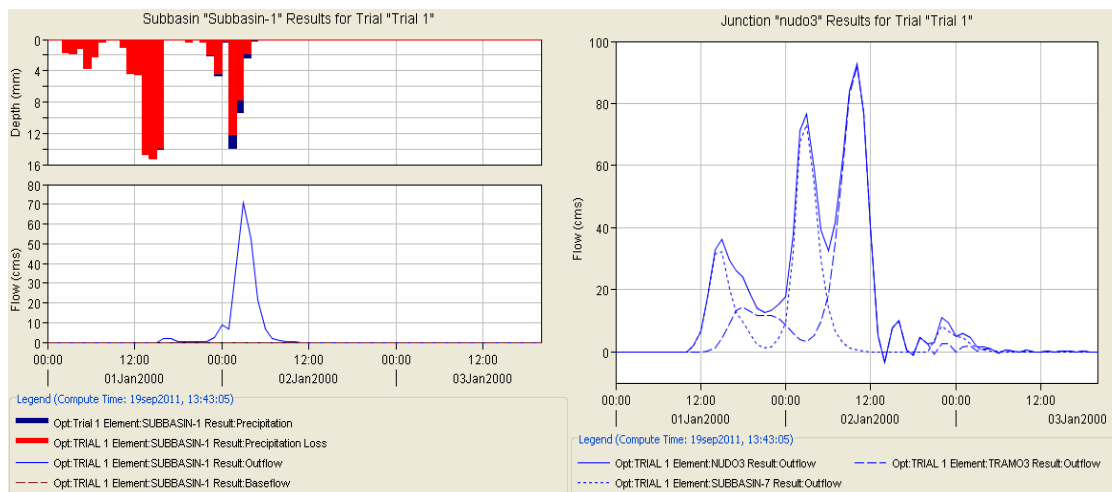
La precisión de los modelos matemáticos está íntimamente ligada a su costo de explotación, por lo que deben tomarse en cuenta los siguientes factores: exactitud de los datos iniciales, tipo de fenómeno a estudiar, exactitud de las ecuaciones.

La modelización llevada a cabo en las obras fluviales, son principalmente dos: la modelización hidráulica, que recoge información sobre procesos erosivos y de inundación, etc. y, la modelización de estabilidad de taludes, que no solo indica la superficie de deslizamiento más probable si no un factor de seguridad de la misma. De manera complementaria se requiere de otras herramientas auxiliares, como son la modelización hidrológica (que en la mayoría de las ocasiones va unida al modelo hidráulico), y la tecnología LIDAR, para obtener la topografía y las correspondientes mallas. Todo esto nos permitirá prever cómo van a reaccionar las actuaciones realizadas frente a condiciones normales y límite.

## 2. MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA-HIDRÁULICA

La modelación se usa para estudiar situaciones difícilmente observables en la realidad, estimar las condiciones de fallo de una estructura o simular avenidas poco frecuentes. En este sentido la modelación ha resultado ser una pieza muy importante del diseño y seguimiento de las técnicas de bioingeniería o actuaciones en cauces. Sin embargo las modelaciones o simulaciones deben tener un proceso de calibración, donde se ajusten variables como la rugosidad, escorrentía, etc. ya bien sea con mediciones tomadas en campo o análisis de sensibilidad.

En el diseño los modelos hidrológicos resultan una herramienta fundamental para ayudar a estimar el caudal de diseño, cuando no se dispone de estación de aforos o el cauce no está regulado. Se lleva usando muchos años y por el momento no ha sufrido muchas variaciones. Esto se debe a que para la fiabilidad o exactitud que representa de momento no se han requerido cálculos más complejos.



Figuras 1 y 2. Resultado de las modelaciones hidrológicas realizadas en el arroyo Piedralá (Ciudad Real)

## 2.1. Modelización hidráulica

Es en la modelización hidráulica donde más evolución se ha observado, especialmente tras la aparición del entorno GID de libre difusión, que ha permitido desarrollar a partir de ella, diversas aplicaciones también de libre difusión que en este entorno son capaces de modelizar las ecuaciones de Saint Venant (una simplificación de las mismas 2D, para aguas someras). El entorno GID, de pre/postproceso gráfico permite tratar modelos geométricos altamente complejos y generar mallas y otros datos requeridos para el análisis. Posteriormente, pueden visualizarse en él los resultados del análisis mediante diversas técnicas gráficas.

Hasta hace poco (incluso hoy en día) el cálculo hidráulico se relegaba a la ecuación de la energía en su versión unidimensional, así como las ecuaciones de los momentos en situaciones en las que el perfil de la superficie del agua es rápidamente variado. Existiendo diversos softwares, tanto comerciales como de libre difusión. Esta herramienta ha dado muy buenos resultados en zonas donde el flujo del agua es unidireccional y relativamente constantes, como son el caso de canales, ríos con condiciones uniformes. Sin embargo existían dudas de la respuesta de estas herramientas en zonas donde el flujo no es claramente unidireccional, así como cuando se requerían datos de precisión en variables más complejas como velocidades y tensiones.

Aunque los modelos bidimensionales resuelven los problemas planteados anteriormente y responden a las expectativas que se tiene de ellos en el diseño de obras, también son susceptibles de mejorar ya que todavía consideran simplificaciones, como la consideración de las velocidades medias como constante a lo largo de un calado medio (ver figura 1).

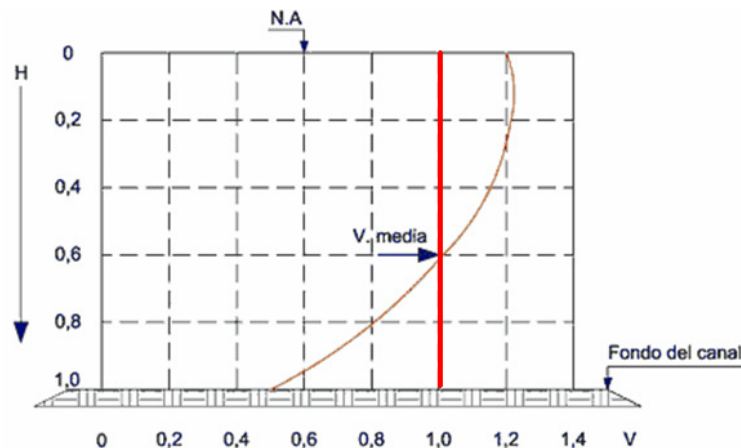
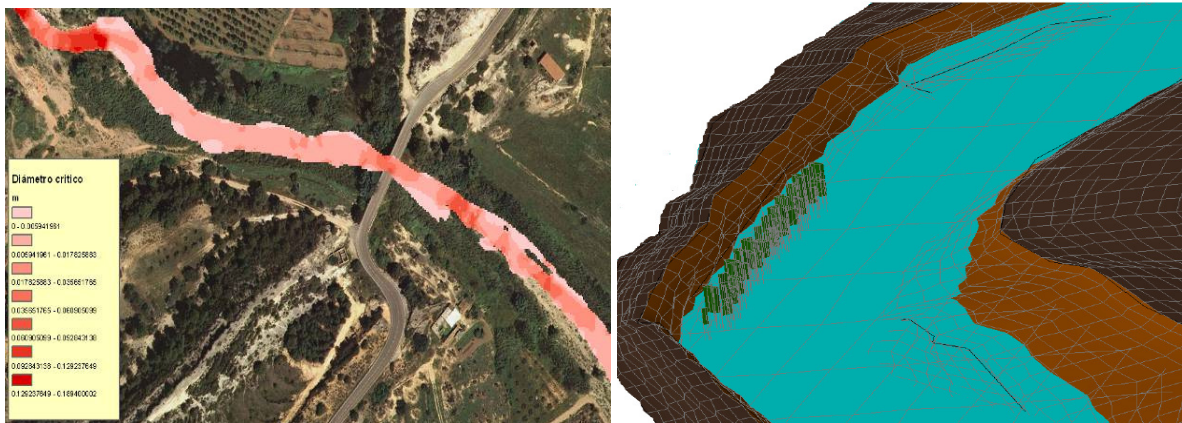


Figura 3. Distribución de velocidades

Ya existen modelos tridimensionales, o también llamados modelos de partículas. Sin embargo, hoy por hoy todavía no se puede generalizar su aplicación en el diseño de cauces dado su elevado coste computacional. Se reservan para el diseño de elementos muy concretos, como desagües de presas, diseño de alaves, etc. Además en el diseño de obras fluviales todavía no se ha encontrado la necesidad de recurrir a ellos dado que los modelos bidimensionales cumplen las expectativas.

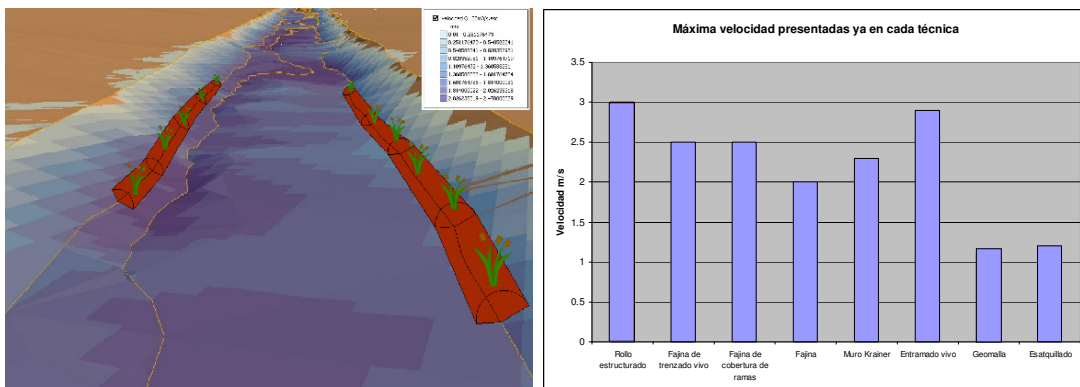
## 2.2. Experiencia del grupo Tragsa en la utilización de modelos

En el grupo Tragsa, los modelos se han usado para el diseño de obras de restauración de cauces, estabilización de taludes (frente a erosiones), diseño de obras fluviales y particularmente para el “Proyecto de I+D+i de optimización de técnicas de bioingeniería para la mejora del estado ecológico y estabilización de márgenes de los ríos”. Particularmente en el citado proyecto se han querido comparar los datos obtenidos por los modelos unidimensionales y bidimensionales. Además en este proyecto no solo han determinado las zonas más susceptibles de erosionarse, si no que han contribuido también a determinar las dimensiones de las técnicas para evitar el lavado del material, su ubicación más óptima dentro del cauce, o el efecto que producen aguas arriba y abajo de las mismas.



Figuras 4 y 5. Resultado de las modelizaciones hidráulicas: se muestra el diámetro crítico con el caudal simulado (simulación realizada con IBER)(figura izqda.) y simulación realizada con Hec-Ras donde la cota de la lámina de agua ha definido la altura de la empalizada (figura dcha.)

Uno de los objetivos del proyecto ha sido definir los valores límite que soportaba cada técnica y para ello los modelos hidráulicos han sido de gran importancia. Con cada episodio de avenida, se ha realizado un recuento de daños, relacionando cada uno de esos daños con esa avenida y a través de los modelos hidráulicos con una velocidad, tensión y potencia disipada.



Figuras 6 y 7. Resultado de las modelizaciones hidráulicas: velocidades soportadas por el biorrollo para un determinado caudal (figura izqda.) y las máximas velocidades soportadas por las técnicas (figura dcha.)

El principal condicionante de los modelos hidráulicos ejecutados en este proyecto respecto a otros modelos convencionales, es la definición de la geometría. Para modelados destinados

al cálculo de zonas inundables la precisión necesaria, no suele requerir MDT con resoluciones mayores de 1m, y la zona de estudio, es una zona de gran amplitud. Sin embargo, para los modelos usados en el presente proyecto la llanura de inundación no tiene relevancia, ya que los datos más relevantes junto con el caudal, son la velocidad y la tensión en el cauce. Además las variaciones más significativas de estos datos se producen mientras se llena la caja del cauce, una vez rebasadas las variaciones en el cauce no son importantes.

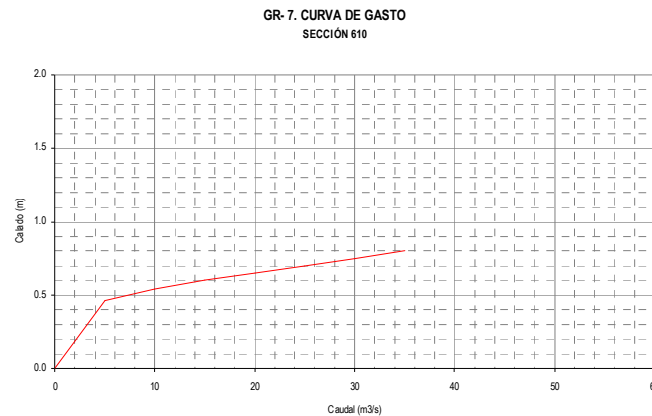


Figura 8. Curva de gasto del arroyo Piedralá (Ciudad Real), donde se aprecia como varía progresión del calado a partir de que el agua rebase el cauce

Por lo anteriormente comentado, la geometría usada en estos modelos ha diferenciado muy claramente la precisión usada en la llanura de inundación de la del cauce. Para representar la llanura de inundación se ha usado el MDT de libre descarga, proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional de 5m<sup>2</sup>m. En cambio para definir la geometría del cauce se ha usado:

- Tecnología LIDAR con resolución de 1 punto cada 25cm, información que hay que filtrar y depurar hasta generar el MDT, libre de vegetación, que respete las líneas de rotura, etc.

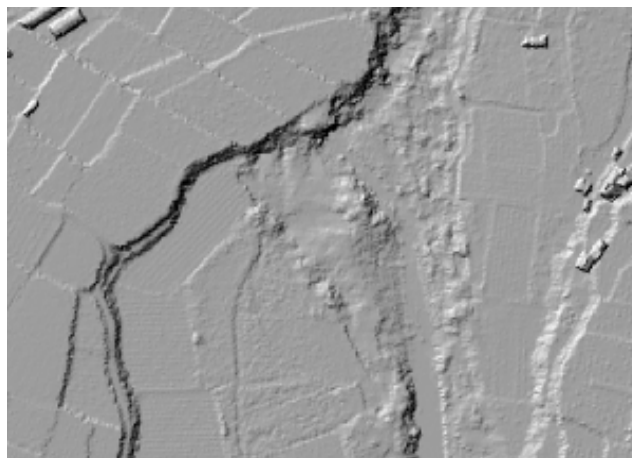


Figura 9. MDT generado a partir de LIDAR

- Levantamiento topográfico, donde en cada línea de rotura se toman por lo menos 2 puntos por metro lineal.



Figura 10. Imagen de las líneas de rotura tomadas para definir la geometría del cauce

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el transcurso del proyecto de I+D+i se han observado los siguientes resultados en cuanto a los tipos de modelos y a la modelización en general.

#### 3.1. Comparación de modelos hidráulicos

En las primeras fases del proyecto se sopesó la conveniencia de usar modelos unidimensionales o bidimensionales. En un principio se empezó con modelos unidimensionales para las actuaciones de menor entidad, aunque poco a poco fueron sustituyéndose por modelos bidimensionales. En este sentido, hay que tener en cuenta que los esfuerzos para conseguir un estudio unidimensional son menores, y hasta ahora para labores como calcular el Dominio Público Hidráulico (DPH), se han venido usando estos, obteniendo buenos resultados. Como se aprecia en la imagen siguiente, no hay diferencias significativas en las variaciones del calado entre ambos modelos (imagen procedente del estudio hidráulico en el río Linares).

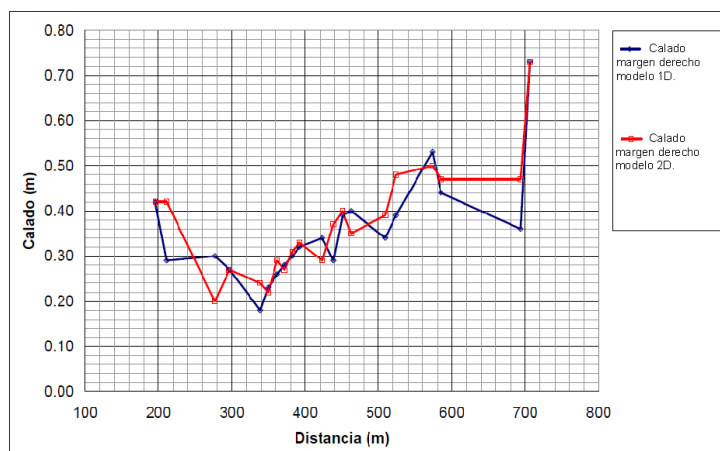


Figura 11. Gráfico comparativo de calados, entre un modelo unidimensional y bidimensional



No obstante para caracterizar la distribución de velocidades en una sección, las simplificaciones adoptadas por los modelos unidimensionales dan diferencias más significativas con respecto a la modelización bidimensional (gráfico procedente del estudio hidráulico del río Linares).

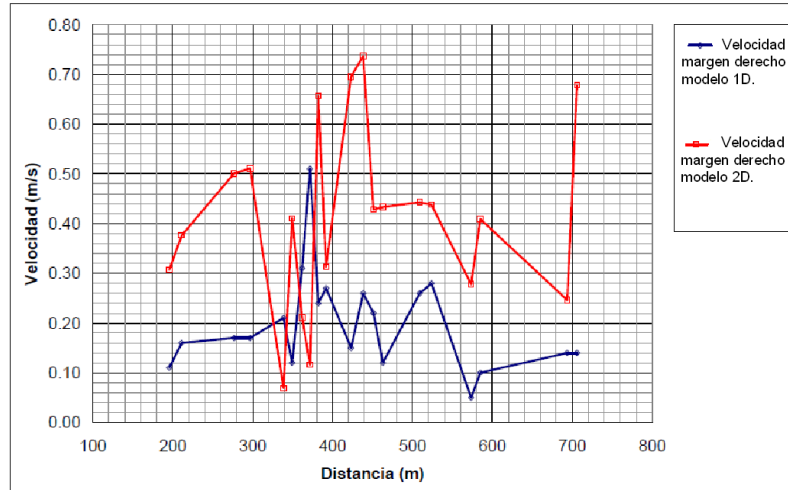


Figura 12. Gráfico comparativo de velocidades, entre un modelo unidimensional y bidimensional

Estas diferencias se ven acentuadas si se estudian variables como la tensión de corte o la potencia disipada (gráficos procedentes del estudio hidráulico del río Linares).

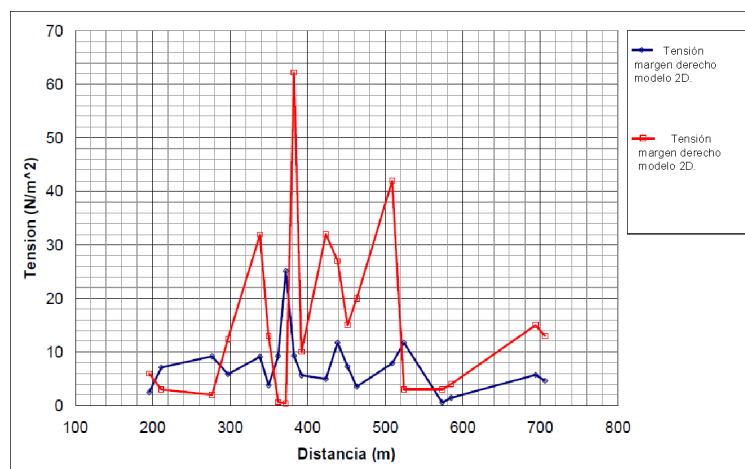


Figura 13. Gráfico comparativo de tensiones, entre un modelo unidimensional y bidimensional

Cuantitativamente, las desviaciones entre los resultados de los calados son como máximo de un 20 por ciento, entre el modelo unidimensional y bidimensional, mientras que en el análisis de la velocidad esta diferencia llega al 400 por ciento, diferencia que aumenta aún más si cabe en el estudio de la tensión. Además, el coeficiente de correlación entre los calados de ambos modelos es de 0,75 mientras que los coeficientes de correlación de velocidades y tensiones entre los modelos unidimensionales y bidimensionales son de -0,018 y 0,027 respectivamente. De esto se puede deducir que los modelos unidimensionales se pueden usar para aproximar un valor del calado, mientras que se deben descartar para el cálculo de velocidades y tensiones.

Por lo tanto el proyecto de I+D+i contempla la caracterización hidráulica de diferentes actuaciones por medio de modelos bidimensionales. El objetivo principal de dichos modelos ha sido aproximar los valores de calado, velocidad, número de Froude, tensión tangencial, y potencia disipada en cada punto, para un determinado caudal, obteniendo así no sólo los parámetros de cálculo sino también los lugares del cauce más críticos para situar la técnica óptima.

Los modelos bidimensionales han ido acompañados por modelos unidimensionales, principalmente por dos razones:

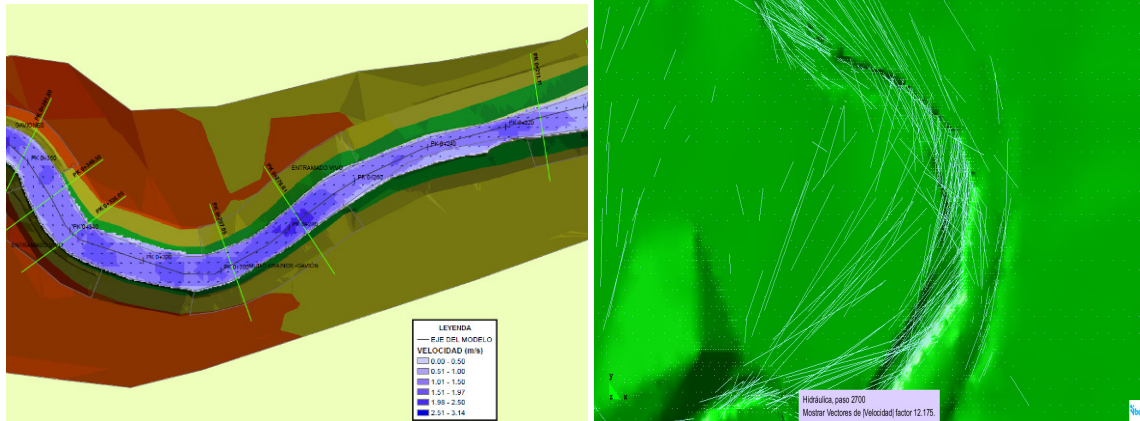
- Para complementar los estudios bidimensionales. Por ejemplo, para estudiar la potencia disipada se considera muy útil ver como varia la línea de energía.
- Para comparar los resultados, aunque hay que tener en cuenta que los modelos unidimensionales obtienen resultados medios en la sección y los bidimensionales dan resultados en cada punto de la misma.

### **3.2. Conclusiones de la modelización**

A partir de la experiencia acumulada se realizan las siguientes consideraciones:

- La calidad del modelo depende totalmente de su capacidad descriptiva del sistema físico en términos de topografía, de los datos de rugosidad, la representatividad de las ecuaciones y los métodos numéricos aplicados.
- La simulación de estructuras intercaladas en los cauces como puentes, azudes, etc. es más práctica en modelos unidimensionales que en modelos bidimensionales. En los primeros hay desarrollada e implementada formulación empírica, que describen adecuadamente el comportamiento de estos elementos. Como ejemplo claro, la discretización del puente en el río Ara en el modelo Hec-Ras permite una representación detallada de su geometría, parámetros característicos y condiciones de funcionamiento que el modelo bidimensional no lo permite de forma tan práctica.
- Los modelos bidimensionales permiten una mejor visualización general de propiedades en zonas concretas del área de estudio que en el modelo unidimensional, los últimos requieren un nivel técnico mayor para una interpretación de los resultados. Con este tipo de modelos se ha obtenido mayor precisión en los datos como velocidades y tensiones presentadas en el cauce.





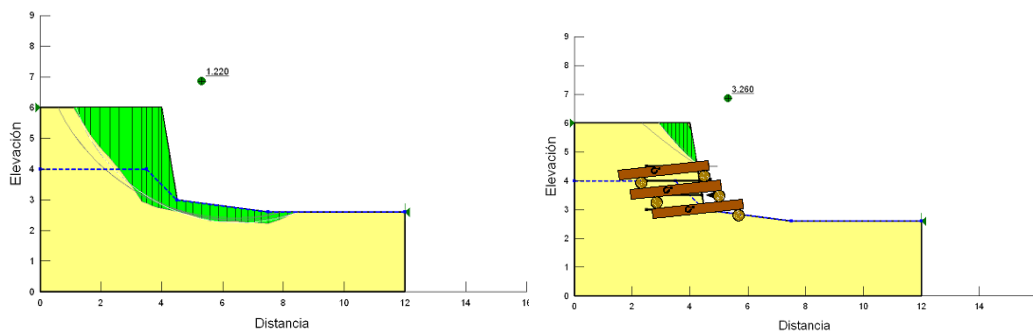
Figuras 14 y 15. Resultado de modelo bidimensional del río Linares (Guadalajara), donde se aprecian las velocidades que han afectado a diferentes técnicas (izqda.), y dirección de los vectores de la velocidad (dcha.)

#### 4. MODELIZACIÓN GEOTÉCNICA

La estabilidad del talud en ríos difiere de los taludes convencionales, ya que en este caso también hay que sumar el efecto de la erosión producida en el pie del talud por la corriente del agua. Este fenómeno además es reiterativo, ya que la socavación provoca la inestabilidad, que si se desestabiliza a su vez provoca terreno disgregado más fácilmente erosionable. Aunque ya se ha trabajado en la posibilidad de modelizar ambos fenómenos, todavía no se ha conseguido. Por este motivo, para el estudio de esta situación se deben estudiar las dos situaciones por separado.

Para el análisis de la estabilidad de taludes se recurrido a método de Morgenstern-Price que es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Por este método se establece la superficie de fallo más desfavorable, asignándole el coeficiente de seguridad correspondiente. Como pasaba anteriormente con los modelos hidráulicos esta solución se obtiene gracias a la resolución por elementos finitos, obtenida por las sucesivas iteraciones de un modelo matemático.

Los modelos geotécnicos han ayudado a determinar el coeficiente de seguridad, cargas admisibles del talud, así como las dimensiones que deberían tener las técnicas para contribuir eficazmente a la estabilización del talud.



Figuras 16 y 17. Resultado de las modelizaciones geotécnicas en el arroyo Linares (Guadalajara)

#### 5. NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Durante el transcurso de los distintos proyectos y experiencias en el diseño de obras fluviales, se ha visto la conveniencia de insistir en el estudio de las siguientes líneas a fin de

continuar con la definición del comportamiento de los taludes en la hidráulica fluvial, resultando la modelización matemática un papel fundamental:

- Afeción del sistema radicular de las plantas en los parámetros que definen las propiedades mecánicas del suelo.
- Efecto de la máxima erosión transitoria: se ha observado que en función de la formulación escogida existen grandes diferencias.
- Degradación de las técnicas de bioingeniería: se considera necesario determinar cuánto tiempo tardan en degradarse.
- Efecto de la supresión en taludes: aunque se han observado procesos de inestabilidad de taludes y se han corregido y solucionado, se considera que aún se puede optimizar el proceso de diseño de medidas correctoras.
- Adaptación de especies de ribera debido a intrusión salina. En actuaciones próximas a desembocaduras, especialmente donde los procesos de marea son muy activos, han existido pobres porcentaje de brotación de determinadas especies relacionados con la salinidad del terreno.