Capítulo 0. Objetivos, descripción de la tesis y conclusiones

0.1. Objetivos

El conocimiento del funcionamiento hidráulico de un río durante el transcurso de una avenida es fundamental para la resolución de gran variedad de problemas de ingeniería y dinámica fluvial: delimitación de zonas inundables, diseño de encauzamientos, obras de protección frente a avenidas, proyectos de recuperación medioambiental de cauces, diseño de embalses o balsas de laminación, estabilización de las márgenes de un río, optimización hidráulica de obras singulares en ríos (puentes, desvíos, confluencias), determinación del riesgo de daños humanos y materiales en episodios extraordinarios de lluvia o sucesos de rotura de balsa o presa, diseño de obras de drenaje, etc.

Para ello es necesario el estudio del flujo de agua en lámina libre en régimen no permanente. Para geometrías complicadas, como son las de los ríos, esto solamente puede hacerse mediante modelos físicos a escala reducida o mediante la modelación numérica. Los modelos reducidos son aun hoy en día una herramienta fundamental e imprescindible, pero tienen la desventaja de sus elevados costes de construcción y operación, así como el prolongado tiempo requerido para construirlos y realizar cualquier estudio. En régimen variable estos costes y dificultades de construcción, operación y toma de datos se incrementan en gran medida hasta el punto que a la práctica pueden ser inviables. Por ello es deseable disponer de herramientas precisas para la modelación numérica de la hidrodinámica en cauces naturales, altamente irregulares, algo de lo que hasta el momento no se disponía.

En el campo de la modelación numérica del flujo en lámina libre existe una gran variedad de modelos comerciales, modelos no comerciales, y esquemas numéricos, como se detalla en el *Capítulo 1* de la tesis. Tal variedad es la consecuencia de años de investigación para conseguir un esquema numérico con posibilidad de aplicación a casos reales, que a su vez sea fiable y robusto. El trabajo realizado en esta tesis intenta ser un paso más en este camino. Se ha trabajado en el desarrollo de esquemas numéricos unidimensionales y bidimensionales para la modelación del flujo de agua en lámina libre en ríos y sus llanuras de inundación, que permitan considerar lo más fielmente posible las geometrías irregulares reales, a la vez que se ha trabajado para resolver algunos aspectos pendientes en esquemas de trabajos anteriores, concretamente la posibilidad de estudiar geometrías reales fuertemente irregulares con esquemas capaces de simular correctamente cambios de régimen sin necesidad de modificar para ello el propio esquema numérico. Por esta ultima razón, en esta tesis, después de algunos tientos iniciales en con esquemas en diferencias finitas, se ha optado por trabajar con esquemas en volúmenes finitos.

Los esquemas en volúmenes finitos son muy adecuados para sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólicos y no lineales, como son las ecuaciones de Saint Venant (ecuaciones del flujo en lámina libre y régimen variable), por su capacidad de modelación de las singularidades (frentes de onda, resaltos hidráulicos). Sin embargo, hay una serie de problemas en el tratamiento del término independiente (pendiente del fondo, fricción) tanto en una como en dos dimensiones y, en una dimensión, en como incorporar en los esquemas la posibilidad de tratar geometrías irregulares (cauces no prismáticos y cambios bruscos de sección a lo largo del río). Las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales tienen la particularidad que el vector de flujo presenta variaciones espaciales por variación de la geometría y no sólo de las variables dependientes. Uno de los objetivos de la tesis ha sido el correcto tratamiento de dichas variaciones, así como una discretización del término independiente de acuerdo con ellas. Sin ello, cualquier esquema numérico podría no converger a soluciones estacionarias, o hacerlo a soluciones incorrectas. En este sentido se desconoce la existencia hasta el momento de un esquema numérico unidimensional en volúmenes finitos basado en las ecuaciones del régimen variable, capaz de simular correctamente el régimen permanente gradualmente variado en geometrías irregulares, ni siquiera en régimen lento, algo por otro lado tan sencillo de hacer con esquemas basados en la ecuación de conservación de la energía. Es claro que si el esquema no es capaz de modelar correctamente el régimen permanente, las soluciones que se obtengan en régimen variable tampoco tendrán la precisión que sería deseable.

En esta tesis se trabaja en la resolución de estos problemas pendientes, analizando primero las ecuaciones de partida (conservación de la masa y cantidad de movimiento), estudiando sus particularidades y singularidades a la hora de aplicarlas a propagación de avenidas en ríos, para luego desarrollar esquemas numéricos para obtener soluciones fieles a las leyes de conservación. Finalmente, los esquemas desarrollados se utilizan para resolver una serie de problema ingenieriles reales y poner de manifiesto su aplicabilidad. En esta tesis se trabaja en la obtención de esquemas numéricos que sean de *alta resolución*, entendiendo como tal la capacidad de obtener de forma precisa tanto soluciones suaves como discontinuas (cambios de régimen, frentes de onda), manteniendo segundo orden de precisión en las zonas de solución suave, y evitando que se produzca la disipación (suavización de la solución) típica de los esquemas de primer orden de precisión en las singularidades.

Otro objetivo de la tesis, resultante de la búsqueda de esquemas útiles y eficientes en la práctica, ha sido la integración de los esquemas en una y dos dimensiones, de manera que en el estudio de la propagación de una misma avenida se pueda dividir el tramo de estudio y utilizar una discretización unidimensional o bidimensional en cada zona según se crea conveniente. La aproximación unidimensional es menos costosa en necesidad de información topográfica y coste computacional, pero requiere que el flujo que se pretende modelar sea efectivamente básicamente unidimensional. Donde eso no sea así, (confluencias de ríos, curvas, inundaciones de llanuras con líneas de corriente en direcciones diferentes al eje del río, distinta rugosidad en distintas partes de una misma sección transversal del río, etc.), se podrá utilizar una aproximación en dos dimensiones. El cálculo se realiza así en todo el dominio (uni y bidimensional) a la vez, sin necesidad de imponer condiciones de contorno en las divisorias entre una y otra aproximación. De esta manera se logra una mayor eficiencia de la modelación, permitiendo abordar problemas en dominios de grandes dimensiones con una precisión que de otro modo no se podría conseguir. Las conexiones entre las zonas de cálculo en una y en dos dimensiones pueden ser según el eje del río, o según la dirección transversal al mismo (desbordamiento lateral del cauce hacia las llanuras de inundación).

Es de destacar que la teoría matemática en la que se basan los esquemas de alta resolución se desarrolló para ecuaciones más simples (siempre sin término independiente, y a menudo escalares o con coeficientes constantes), extrapolando luego los resultados a las ecuaciones de Saint Venant. Por ello es necesario realizar una completa verificación de los esquemas propuestos, tanto en una como en dos dimensiones. La verificación, y en algún caso calibración, se hace mediante la comparación con problemas con solución analítica, resultados de otros esquemas numéricos y experiencias de laboratorio, tanto en régimen permanente como en régimen variable y para flujos continuos o con singularidades (cambios de régimen, frentes de onda).

Se pretende que la metodología propuesta sea una herramienta útil para la resolución de problemas concretos de ingeniería y dinámica fluvial y no sólo una contribución teórica al desarrollo de un tipo concreto de esquemas numéricos. Por ello se incorporan distintas posibilidades de consideración de las condiciones de contorno, condiciones iniciales en régimen permanente en flujo gradualmente variado, avance sobre fondo seco y secado del dominio, rugosidad variable en el espacio y en función de las características del flujo, posibilidad de trabajar con mallas irregulares no estructuradas formadas por cuadriláteros o triángulos, cauces compuestos (cauce central y llanuras) en la aproximación unidimensional, y distintas tipologías de conexión entre dominios unidimensionales y bidimensionales. La comprobación final de la utilidad de la metodología se hará con la aplicación de los modelos desarrollados para la resolución de una serie de problemas reales: diseño de estructuras hidráulicas, delimitación de zonas inundables por grandes avenidas o roturas de presa, estudio del funcionamiento hidráulico de la confluencia de dos ríos y estudio de niveles de agua y velocidades en inundaciones de zonas urbanas y rurales para determinación del riesgo asociado.

Un objetivo adicional ha sido la integración del esquema numérico de calculo en una interface de pre y postproceso para acabar teniendo una herramienta de uso práctico lo más amigable posible, con posibilidades de incorporación de información topográfica a partir de modelos digitales del terreno y de rugosidades a partir de bases de datos externas, facilidad a la hora de generar mallas de calculo y asignación de condiciones iniciales y de contorno, así como visualización y tratamiento de resultados de forma gráfica. Se decidió también incorporar en la modelación bidimensional la posibilidad de considerar la lluvia como aportación de agua al modelo, para obtener así un modelo hidrológico distribuido de transformación lluvia-escorrentía basado en las ecuaciones completas del flujo en lámina libre, con capacidad para modelar la topografía de forma detallada, e integrado totalmente en el modelo hidráulico.

0.2. Descripción de la tesis

La tesis se estructura en ocho capítulos, más el presente de introducción. En el *Capítulo 1*, de antecedentes y revisión bibliográfica, se hace un repaso bibliográfico y de la evolución histórica de la modelación numérica del flujo de agua en lámina libre, y se describen los modelos existentes, comerciales y de investigación, utilizados para la resolución de problemáticas afines a los objetivos de esta tesis. En primer lugar se hace una revisión de los modelos unidimensionales, empezando por esquemas en régimen permanente, para seguir con flujo variable, haciendo especial hincapié en aquellos esquemas que son además de alta resolución. La revisión bibliográfica de los modelos bidimensionales sigue el mismo esquema, y finalmente se hace un repaso a los modelos comerciales existentes, destacando sus limitaciones a pesar de su atractiva apariencia.

En el *Capítulo 2* se hace un exhaustivo análisis de las ecuaciones de Saint Venant (ecuaciones del flujo variable de agua en lámina libre), tanto en una como en dos dimensiones. En primer lugar se deducen las ecuaciones a partir de las leyes físicas de conservación fundamentales. A continuación se analizan las propiedades de las ecuaciones, haciendo énfasis en la teoría de las características (bicaracterísticas en dos dimensiones), teoría que es particular de los sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólicos y no lineales, lo que permite resaltar algunas propiedades de las mismas ecuaciones y de sus soluciones que son de gran ayuda posteriormente para el desarrollo de los esquemas numéricos. Concretamente se obtienen las relaciones de compatibilidad sobre las características, fundamentales para una posterior implementación de las condiciones de contorno. También se deduce la estructura de los dominios de dependencia y de influencia de un punto. En el mismo capítulo se estudia a continuación como se propaga una onda o perturbación, así como los distintos tipos de onda posibles, para posteriormente definir el problema de Riemann para las ecuaciones de Saint Venant, la descomposición en base a ondas simples de su solución, y acabar viendo la estructura de la solución de una rotura de presa en una dimensión sobre lecho plano.

El *Capítulo 3* es un capítulo descriptivo, donde se presentan algunas propiedades que deben cumplir los esquemas numéricos en volúmenes finitos, como los desarrollados en este trabajo, para que el resultado final sea un buen esquema numérico (reproduzca fielmente el fenómeno real que se modela) de alta resolución. Se demuestra porqué precisamente deben utilizarse esquemas en volúmenes finitos, y basados en la forma conservativa de las ecuaciones, para poder modelar correctamente cambios de régimen y frentes de onda. En este capítulo se introducen los conceptos de esquema *upwind* (esquemas numéricos para ecuaciones hiperbólicas que utilizan en su formulación información sobre las direcciones de transmisión de la información) así como como los conceptos de monotonicidad y variación total decreciente (TVD) entre otros, conceptos necesarios para desarrollar mecanismos que eviten las inestabilidades que se producen con los esquemas de segundo orden de precisión en puntos próximos a discontinuidades o zonas con grandes gradientes.

En el *Capítulo 4* se entra de lleno en el desarrollo de los esquemas numéricos en una dimensión, explícitos y basados en la técnica de los volúmenes finitos. La estructura del capítulo, igual que la del *Capítulo 5*, consiste en desarrollar en primer lugar un esquema de primer orden de precisión (método de Godunov), centrándose en su aplicabilidad a geometrías irregulares de cauces naturales. Para ello es fundamental la discretización que se realiza del vector de flujo de las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión, que, a diferencia de otros sistemas de ecuaciones, presenta una variabilidad espacial debida precisamente a la irregularidad de la geometría. A continuación se desarrollan esquemas de segundo orden, que se pueden escribir como los esquemas de primer orden ya vistos más unos términos de extensión a segundo orden. Los esquemas de alta resolución se obtienen luego mediante la limitación de los términos de extensión de segundo orden mencionados. Todo ello se hace extrapolando a las ecuaciones de Saint Venant algunas propiedades matemáticas que se pueden demostrar sólo para ecuaciones hiperbólicas más simples. Para los distintos esquemas presentados se propone una discretización del término independiente de acuerdo con el resto de la ecuación. Con ello se consiguen, como se muestra en el capítulo, esquemas unidimensionales que convergen en régimen permanente a soluciones estacionarias correctas (régimen permanente gradualmente variado). En este capítulo también se particulariza la teoría general de las características vista en el *Capítulo 2* para poder hacer un tratamiento adecuado de las condiciones de contorno.

El *Capítulo 5* tiene exactamente la misma estructura que el anterior, pero para los esquemas en dos dimensiones: desarrollo del esquema de primer orden, extensión a segundo orden, y esquemas de alta resolución. Para cada uno de ellos se presenta el tratamiento del término independiente implementado. Curiosamente, las ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones presentan una formulación más sencilla que en una dimensión (no existe variación del flujo por variación de la geometría) por lo que el balance del término independiente con el vector de flujo se simplifica.

En el *Capítulo 6* se presenta al programa CARPA (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas) que se ha construido a partir de los esquemas numéricos presentados en los capítulos anteriores. Se detallan las capacidades del modelo en cuanto a esquemas numéricos finalmente implementados, funciones de limitación utilizadas para el desarrollo de esquemas de alta resolución, posibilidades de discretización del dominio, implementación del mojado para avance sobre fondo seco y secado de elementos, condiciones de contorno, tratamiento de cauces compuestos con la aproximación unidimensional, y descripción del modelo hidrológico de transformación lluvia-caudal. En este mismo capítulo se detalla como se ha hecho la integración de los modelos en una y dos dimensiones, y como se han tratado los contornos comunes a ambos dominios. Finalmente, se muestra la implementación en la interface de pre y postproceso GiD, las capacidades de la misma para importación de geometrías, desarrollo de mallas de cálculo, asignación de condiciones de contorno e iniciales, y visualización de resultados.

En el *Capítulo 7* se pretende verificar toda la metodología desarrollada hasta el momento. En primer lugar se realiza la verificación para régimen permanente en una dimensión, para una serie de problemas con geometrías muy sencillas, algunos de los cuales tienen solución analítica, y otros se pueden calcular con el clásico esquema *paso a paso*. Más adelante se hace la misma comparación pero ya para una geometría real de un tramo del río Llobregat. Los mismos problemas se utilizan para la verificación del esquema bidimensional, así como la modelación de un fenómeno de ondas cruzadas en régimen rápido. En este mismo capítulo se verifica el esquema en régimen variable para el caso de rotura de presa unidimensional sin fricción, ejemplo para el cual también existe solución analítica. Este ejemplo se calcula también con el esquema bidimensional. A continuación se estudia la propagación de un pulso de caudal en un tramo del río Ebro, con su geometría real, mediante la comparación con el esquema numérico de Preissmann, de amplia aceptación para las características del flujo que se presentan para este caso. En el mismo *Capítulo 7* se verifica el modelo mediante una comparación numérico-experimental para una serie de problemas para los cuales se dispone de medidas en laboratorio. La comparación numérico-experimental se realiza para el esquema bidimensional tanto en régimen permanente como en régimen variable, para el flujo en un cruce de calles y para dos modelos reducidos de ríos (Besòs y Francolí).

Finalmente, en el *Capítuo 8,* se presentan una serie de aplicaciones del modelo. Todas las aplicaciones corresponden a problemas reales de ingeniería y dinámica fluvial, en los cuales se ha utilizado el programa CARPA. En primer lugar se aplica el modelo al diseño de distintas estructuras hidráulicas (desvío del río Cardener, canal de slalom de Ponts), determinación del área inundable por la rotura de una balsa de riego, estudio hidráulico de la confluencia de dos ríos (Fluvià y Llierca) y propagación de una avenida por una zona urbana (Atenas) y otra rural (Llobregat).

0.3. Conclusiones

En el presente trabajo se ha desarrollado y verificado una herramienta de cálculo numérico del flujo de agua en lámina libre y régimen variable. El programa CARPA, se ha pensado principalmente para la modelación de propagación de avenidas en ríos, aunque también se puede aplicar, como se ha hecho en este trabajo, en otros ámbitos como diseño de estructuras hidráulicas o estudios hidrológicos de transformación lluvia-escorrentía. De manera más concreta, las principales conclusiones son:

1. En esta tesis se ha optado por trabajar con esquemas explícitos basados en la técnica de los volúmenes finitos para la modelación del régimen variable en lámina libre, tanto en una como en dos dimensiones. En la última década ha habido un importante avance en el desarrollo de este tipo de esquemas, que tienen claras ventajas sobre las diferencias finitas y elementos finitos, sobretodo a la hora de desarrollar esquemas *shock-capturing,* que son esquemas capaces de simular correctamente flujos discontinuos (frentes de onda, resaltos hidráulicos) sin necesidad de tratamientos específicos de las discontinuidades. Sin embargo, hasta el momento las principales aplicaciones de dichos esquemas habían sido para geometrías muy sencillas (mayoritariamente fondo plano o canales prismáticos) pero no para las geometrías irregulares de cauces reales. Con los desarrollos que se presentan en esta tesis, juntamente con los avances en velocidad de cálculo de los ordenadores, este tipo de esquemas han podido ser adaptados para la modelación de propagación de avenidas con geometrías reales y zonas de estudio de grandes dimensiones.

2. A la hora de realizar la modelación numérica del flujo de agua en cauces naturales, se debe optar bien por una aproximación unidimensional (1D) bien por una bidimensional (2D), según sea la naturaleza del fenómeno que se pretende modelar o la información disponible. La modelación unidimensional es mucho menos costosa tanto en tiempo de cálculo como de información (secciones transversales separadas una cierta distancia entre ellas) y en muchos tramos de río suficientemente precisa. Sin embargo, hay casos en que en ciertas áreas (confluencias, inundación de llanuras, variaciones bruscas de geometría, etc.) el flujo real tiene un fuerte carácter bidimensional, por lo que debería modelarse de esta manera. El flujo en estas zonas marcadamente bidimensionales suele venir condicionado por el flujo en los tramos de río unidimensionales y viceversa, por lo que no se puede desacoplar el cálculo y utilizar un tipo de modelo en unas zonas y otro en otras. Esto lleva a que si se opta por una modelación unidimensional en todo el dominio, las zonas 2D no serán modeladas con suficiente precisión (y las imprecisiones pueden afectar a la misma zona 1D), mientras que un cálculo enteramente bidimensional puede ser prohibitivo en tiempo de cálculo, muy caro para disponer de la información necesaria para la discretización 2D de toda la zona, y costoso a la hora de generar las mallas de cálculo y asignar sus propiedades. En esta tesis se ha trabajado para la integración de esquemas unidimensionales y bidimensionales en un único modelo, aprovechando las propiedades de los esquemas explícitos que los hacen especialmente adecuados para dicha integración. Se propone una metodología para el tratamiento de los contornos comunes a ambas aproximaciones, que consigue la integración de forma sencilla, y que permite conectar dominios unidimensionales y bidimensionales ya sea según la dirección del eje del río, o bien transversalmente por desbordamiento del cauce. La modelación conjunta permite tener mucha más precisión que una modelación únicamente unidimensional, con menos coste de información y computacional que si se modelara todo el dominio en dos dimensiones.

3. Los esquemas utilizados en esta tesis (explícitos, en volúmenes finitos, basados en el método de Godunov mediante la utilización de *Riemann Solvers*) fueron inicialmente desarrollados para aplicaciones a campos distintos de la hidráulica (destaca su aplicación a problemas de dinámica de gases). La similitud de las ecuaciones (en forma leyes físicas de conservación) propició posteriormente su utilización para la modelación del flujo de agua en lámina libre (ecuaciones de Saint Venant). En una dimensión, estas ecuaciones escritas de forma conservativa (como es conveniente hacerlo para el desarrollo de este tipo de esquemas numéricos) presentan una particularidad que las diferencia de otras formalmente muy similares, que es que el vector de flujo puede tener variaciones espaciales no sólo debido a variaciones en las variables dependientes (área de la sección mojada, caudal) sino también a variaciones de la geometría del contorno o cauce. Esta variación espacial del vector de flujo por variaciones de geometría, no considerada en ningún caso hasta muy recientemente, ha sido uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo del esquema numérico unidimensional, para conseguir un correcto balance entre el tratamiento numérico del vector de flujo y el término independiente de las ecuaciones de Saint Venant. No se conocen trabajos anteriores donde esto se haya tenido en cuenta para

geometrías irregulares como son las de un río, únicamente alguno para canales rectangulares, lo que simplifica en gran manera su aplicación respecto una geometría cualquiera.

4. Otro aspecto recientemente objeto de gran número de estudios, y absolutamente obviado hace tan sólo diez años, es el correcto tratamiento del término independiente de las ecuaciones de Saint Venant, concretamente la parte del término independiente correspondiente a la pendiente de fondo. A diferencia de otras ecuaciones, las ecuaciones de Saint Venant no son homogéneas, y además existe una estrecha relación entre el término independiente y el vector de flujo, que hace que la discretización de uno deba hacerse de acuerdo con la del otro. En caso contrario los esquemas numéricos no serán capaces de modelar correctamente ni siquiera situaciones estacionarias como agua parada o régimen permanente. Sólo recientemente se han presentado trabajos que consiguen un correcto balance entre la discretización del vector de flujo y la del término independiente, pero en ellos se suele analizar sólo el caso de agua parada. Para las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales, un balance que consiga modelar correctamente una situación de agua parada en general no tiene porque simular correctamente un régimen permanente. Incluso aunque el esquema se estabilice a una situación estacionaria, ésta puede no ser la correcta. En el esquema unidimensional, gracias al tratamiento del vector de flujo comentado en el punto anterior, junto con un tratamiento *upwind* del término independiente, y una correcta aproximación de las variables dependientes en los contornos de cada volumen finito, se consigue un esquema en régimen variable que, con condiciones de contorno constantes, converge a la solución correcta del régimen permanente gradualmente variado. No se conocen otros esquemas unidimensionales explícitos en volúmenes finitos donde esto ocurra, para geometrías .

5. Se ha implementado un algoritmo para la simulación del secado y mojado del dominio, que permite eliminar del cálculo los volúmenes finitos secos, e incorporarlos si se mojan, y que conserva exactamente el volumen de agua incluso en presencia de fuertes irregularidades geométricas. Esto ocurre tanto en la modelación en una como en dos dimensiones y es fundamental para la mejora de la eficiencia del modelo.

6. El esquema numérico WAF TVD (*Weight Averaged Flux Total Variation Diminishing*), que es una extensión del método de Godunov con el *Riemann solver* de Roe, con las consideraciones implementadas en este trabajo, es un esquema de alta resolución. El esquema es capaz de modelar las zonas con solución suave con segundo orden de precisión, mientras que en las discontinuidades o zonas con fuertes gradientes (resaltos hidráulicos, frentes de onda) no produce oscilaciones espurias, como sí ocurre con esquemas de segundo orden, a la vez que se evita la disipación típica de los esquemas de primer orden. El esquema es aplicable a geometrías reales, fuertemente irregulares. La discretización de la geometría en volúmenes finitos puede realizarse con mallas de cálculo irregulares, estructuradas o no estructuradas, formadas por triángulos, cuadriláteros o combinaciones de ambos, lo que da una gran flexibilidad al modelo y una gran capacidad de reproducción de geometrías reales.

7. Para el tratamiento de las condiciones de contorno, tanto en una como en dos dimensiones, se ha recurrido a la teoría de las características (o bicaracterísticas en dos dimensiones). La teoría de las características pone de relieve las particularidades de la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólicos y no lineales, como son las ecuaciones de Saint Venant y, a la vez que permite desarrollar herramientas para el correcto tratamiento de las singularidades, a partir de ella se pueden obtener una serie de relaciones de compatibilidad que a su vez permiten un tratamiento de las condiciones de contorno con precisión. La implementación de estas condiciones de contorno se ha hecho de manera que el propio modelo detecta el tipo de flujo existente (entrante o saliente, subcrítico o supercrítico) y el número y tipo de de condiciones que se requieren en los contornos.

8. Los esquemas numéricos desarrollados han sido implementados en una interfaz de preproceso y postproceso (GiD), que permite generar mallas de cálculo bidimensional y secciones transversales para el cálculo unidimensional a partir de modelos digitales del terreno, asignar condiciones de contorno e iniciales, asignar manualmente la rugosidad o importarla de bases de datos de usos del suelo, ejecutar los cálculos desde la misma interfaz y visualizar los resultados. Todo ello de forma amigable y eficaz.

9. Aprovechando que se trabaja con las ecuaciones de Saint Venant en forma conservativa (que son la expresión matemática de las leyes físicas de conservación de la masa y de cantidad de movimiento) y la discretización en volúmenes finitos, se ha construido un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía basado en el esquema bidimensional. De esta manera se dispone de un modelo hidrológico

distribuido, basado en las ecuaciones completas bidimensionales del flujo en lámina libre, completamente integrado en un modelo hidráulico de propagación de avenidas, y con todas las herramientas de preproceso (generación de mallas de calculo a partir de modelos digitales del terreno, implementación de condiciones iniciales y de contorno, incluida la lluvia, asignación de parámetros de definición de las funciones de pérdidas) y postproceso (visualización de resultados) implementadas.

10. La verificación realizada en el Capítulo 7 pone de manifiesto el grado de precisión de los esquemas numéricos desarrollados, tanto en una como en dos dimensiones. La verificación es fundamental en cualqueir modelo, pero especialmente en este caso donde en el desarrollo se utiliza una teoría matemática demostrada sólo para ecuaciones hiperbólicas más simples, extrapolando luego los resultados a las ecuaciones de Saint Venant. La verificación se ha realizado mediante la comparación de los resultados obtenidos con la solución exacta para problemas donde ésta existe (algunos casos especiales de flujo permanente en canal no prismático en una dimensión, ondas cruzadas en régimen permanente en dos dimensiones, rotura ideal de presa en régimen variable en una y dos dimensiones), mediante la comparación con otros esquemas numéricos de amplia aceptación en algunas condiciones determinadas de flujo (método paso a paso en régimen permanente unidimensional, esquema de Preissmann en régimen variable para flujo claramente subcrítico e hidrogramas suaves) y mediante la comparación con medidas de calados y velocidades en experiencias de laboratorio (régimen permanente en geometrías simples aunque con flujos bidimensionales complejos con discontinuidades, flujos continuos con geometrías irregulares de modelos de cauces naturales, y régimen variable utilizando medidas en laboratorio de otros autores). En el capítulo de verificación también se ponen de manifiesto las diferencias entre los esquemas de primer orden de precisión y alta resolución, así como la completa conservación del volumen en cualquier situación con los esquemas desarrollados. También se verifica la metodología de conexión entre zonas modeladas en una y dos dimensiones, tanto para cambios de aproximación en el sentido del flujo como por desbordamiento lateral de un cauce unidimensional a una llanura modelada en dos dimensiones.

11. En esta tesis se ha trabajado con esquemas explícitos en volúmenes finitos por ser los más adecuados para el cálculo de flujos con singularidades (cambios de régimen, frentes de onda) donde presentan ventajas frente a otras aproximaciones (diferencias finitas o elementos finitos). Sin embargo, estos esquemas precisan de incrementos de tiempo de cálculo muy pequeños, más pequeños cuanto más fina sea la malla de cálculo, lo que puede ser una limitación en algunos casos. Por ello, al abordar un problema real de propagación en un cauce irregular, es conveniente sospesar las ventajas e inconvenientes de las distintas aproximaciones y esquemas existentes. En algunos de los ejemplos empleados en esta tesis es posible que los esquemas desarrollados aquí no sean los más efectivos. En este sentido, para la geometría e hidrogramas del apartado 7.7 del Capítulo 7 (flujo variable en el río Ebro, régimen subcrítico, hidrogramas suaves) el clásico esquema de Preissman puede ser preferible a cualquiera de los desarrollados en esta tesis (igual precisión con menos esfuerzo). Igualmente, para el caso estudiado en el aprtado 7.9.2 (régimen permanente en el río Besós, flujo subcrítico sin singularidades) también se podrían obtener soluciones del mismo orden de precisión con otros esquemas, aunque, eso sí, siempre que se realice un buen trabajo de calibración de los parámetros que intervienen en cada caso. La relevancia de los dos apartados mencionados no recae pues en el grado de precisión conseguido, aun así en ambos casos muy aceptable, sino en el hecho de conseguirlo con esquemas explícitos de alta resolución en volúmenes finitos (1D en el río Ebro y 2D en el Besós), superando las limitaciones de este tipo de esquemas para aplicarlos a geometrías altamente irregulares.

12. Cualquier modelo numérico, y por tanto también el elaborado en esta tesis, es sólo una aproximación a la realidad, y por lo tanto con un campo de aplicación limitado. Las limitaciones vienen dadas por las ecuaciones de partida (ecuaciones de Saint Venant en una o dos dimensiones) y las hipótesis que llevan implícitas, la precisión del esquema numérico utilizado, la correcta discretización del dominio, y la buena estimación de los parámetros que intervienen (en este caso el coeficiente de rugosidad de Manning). Un flujo real en una geometría altamente irregular, como podría ser el cauce de un río, puede que no se ajuste a estas condiciones por distintos motivos: que en el flujo exista una componente tridimensional importante, que algunos aspectos no considerados en las ecuaciones (como por ejemplo la turbulencia) sean relevantes, imposibilidad de modelar la geometría con detalle por falta de información, incapacidad de los ordenadores actuales de trabajar con una discretización muy refinada, o finalmente imprecisión a la hora de estimar el coeficiente de rugosidad que interviene en los términos de fricción. Todo ello conduce a la necesidad de realizar una buena calibración para poder asegurar la fiabilidad de una modelación determinada y, en cualquier caso, ser consciente de las limitaciones del modelo e interpretar los resultados en función del grado de imprecisión que se pueda sospechar. En el

apartado 7.9.2 del capítulo de verificación, en el cual los coeficientes de rugosidad se tuvieron que variar de forma considerable respecto de la primera estimación para un correcto ajuste entre resultados numéricos y datos experimentales, se pone de manifiesto la necesidad de dicha calibración. Es conocido que el coeficiente de rugosidad de Manning depende de las dimensiones del problema, y por lo tanto debe cambiar si lo hacen, por ejemplo, la sección mojada o el caudal. En este sentido, es posible que la calibración realizada para el caso del apartado 7.9.2 deba modificarse para otros rangos de caudal con la misma geometría, o que pueda ser mejorada con otros modelos basados en otras aproximaciones o que incluyan otros términos en las ecuaciones (por ejemplo turbulencia). Por todo ello, a pesar de la existencia de los modelos numéricos, es a menudo recomendable un estudio en modelo reducido, o bien la doble aproximación numérico-experimental, como se ha realizado en algunas de las aplicaciones y ejemplos de verificación que se presentan

13. El modelo CARPA desarrollado en este trabajo tiene una utilidad práctica que se ha puesto en evidencia durante la realización la tesis con la resolución de problemas reales de dinámica fluvial (*Capítulo 8*). Se ha aplicado para el diseño y definición de estructuras hidráulicas específicas (obras de desvío de un río, diseño de un canal de slalom), para estudios de rotura de presa y delimitación de la inundación producida, para el estudio del flujo hidráulico en avenida en una zona de confluencia de ríos junto con el efecto de nuevas infraestructuras, y para delimitación de zonas inundables y determinación del riesgo asociado tanto en zonas urbanas como en áreas rurales de grandes dimensiones. En estas aplicaciones se han utilizado tanto modelaciones unidimensionales y bidimensionales como mixtas, con resultados en régimen permanente y régimen variable, y geometrías reales complejas con discretizaciones en volúmenes finitos en forma de cuadriláteros y triángulos.

14. En definitiva, se ha desarrollado y verificado una nueva herramienta para la modelación hidrodinámica de cauces naturales, con geometrías irregulares, que integra las aproximaciones en una y en dos dimensiones con distintas posibilidades de conexión entre dominios. El modelo utiliza esquemas numéricos de alta resolución que permiten el cálculo de flujos discontinuos, y permite trabajar en dos dimensiones con mallas irregulares no estructuradas formadas por cuadriláteros o triángulos y, en la aproximación unidimensional, con cauces compuestos (cauce central y llanuras). Por otro lado se han implementado mecanismos para considerar el mojado y secado del dominio así como rugosidad variable en el espacio y en función de las características del flujo. Finalmente se ha desarrollado un modelo hidrológico distribuido de transformación lluvia escorrentía basado en las ecuaciones completas de Saint Venant, totalmente integrado en la modelación hidráulica.

0.4. Futuros desarrollos

Pensando en una posible continuación del trabajo realizado de modelación numérica en el campo de la dinámica fluvial, surgen una serie de aspectos de claro interés de investigación:

1. Un paso adelante inmediato sería la integración del modelo hidráulico CARPA en modelos generales de evaluación y cuantificación de riesgos asociados a avenidas y sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS, de *Decision Support Systems*). Para ello no se requiere modificar el modelo existente, sino que sería tan solo un trabajo de tratamiento y visualización de los resultados, que podría hacerse con la misma interface gráfica utilizada (GiD). Se trataría de traducir los resultados del modelo en forma de variables hidráulicas (calado, velocidades, tiempo de permanencia de la inundación) a indicadores de riesgo (sin riesgo, riesgo moderado, grave, etc.). Para ello el principal trabajo sería de elección o desarrollo de criterios de riesgo, sobretodo en función del uso de la zona y los criterios de gestión o de la administración correspondiente. Un primer paso en este sentido ya se ha realizado como parte del proyecto de investigación europeo Ramflood.

2. Otro aspecto de claro interés sería aprovechar todo el trabajo realizado para la creación de un modelo numérico morfológico, que contemplara transporte de sedimentos y fondo móvil. Esto no es complicado numéricamente incluyendo en el modelo la ecuación de Exner, de continuidad del caudal sólido, junto con alguna ecuación de transporte de fondo tipo Meyer-Peter-Muller o Einstein-Brown. Las principales incertidumbres están precisamente en la aplicabilidad de estas últimas ecuaciones, u otras, a cada caso real, así como la evaluación de los parámetros que en ellas intervienen. La concreción de este trabajo requeriría en primer lugar un estudio de aplicabilidad de las distintas ecuaciones de transporte de fondo, pero sobretodo seria fundamental la calibración del modelo a cada caso concreto, con las dificultades de caracterización del sedimento y toma de datos de campo para la verificación que ello comportaría. Cualquier modelo morfológico sin una buena calibración podría tan sólo dar una información muy burda de las posibles tendencias, pero sus resultados deberían tomarse con mucha precaución. La modelación morfológica podría extenderse considerando también transporte en suspensión, con sedimentación y resuspensión, o considerando material sólido no uniforme.

3. El modelo hidrológico desarrollado en esta tesis es elemental, contemplando únicamente unas funciones de pérdidas basadas en el modelo lineal. El trabajo de Cubells (2004) ya supone un adelanto en este sentido, con implementación de distintas funciones de pérdidas, verificación de conservación de volúmenes y comparación con metodologías clásicas. Aun así, antes de su aplicación a estudios hidrológicos reales, sería necesaria una verificación completa, con comparación de resultados con medidas de campo, y análisis de sensibilidad a los distintos parámetros que intervienen, muy especialmente el coeficiente de rugosidad de Manning y el umbral de secado-mojado. Para cuencas de estudio de grandes dimensiones el tamaño de la malla de cálculo será probablemente también grande, y por lo tanto el coeficiente de rugosidad de Manning debería incorporar no sólo la fricción producida por el material del contorno (suelo) sino también todos los efectos de la geometría sub-malla, es decir, formas geométricas que no pueden ser incorporadas en el modelo por tener dimensiones menores que el paso de la malla utilizada. Este incremento del coeficiente de rugosidad debería ser objeto de investigación. Por otro lado, en el presente trabajo se ha considerado un umbral de secado-mojado por debajo del cual no se considera flujo. En un modelo hidrológico, con valores de intensidad de precipitación normales, se produciría un continuo mojado y secado de elementos que sin duda influiría en los resultados finales, en forma de hidrograma, a la salida de la cuenca. Debería estudiarse con más detalle el efecto de dicho mojado-secado o, en su caso, desarrollar alguna alternativa al mismo.

4. Desde un punto de vista matemático-académico, los esquemas numéricos propuestos presentan un error puntual en el cálculo del caudal en el punto de localización del resalto hidráulico cuando éste se produce. Las razones teóricas de este error se exponen en el *Capítulo 5* y *Anejo 1*, mientras que sus efectos se muestran en el *Capítulo 7* de verificación. Aunque este error no tiene repercusión en la lámina de agua, ni en los caudales o velocidades fuera del punto donde se produce, el esquema numérico sería más elegante si pudiera evitarse.

5. El caso de estudio del apartado 7.9.2, del capítulo de verificación, contiene un cauce y unas llanuras, es decir una morfología fluvial, con un flujo desbordado propio de las avenidas. En esta tesis se ha

buscado, para este caso particular, el ajuste por modificación de los coeficientes de rugosidad pero queda abierta la pregunta de por qué son necesarias reducciones de los coeficientes (notables y de distinta proporción en cauce y llanuras) o bien qué significan. De entre los distintos ensayos que se realizaron en laboratorio con el modelo del río Besós, se podría pensar que el ensayo usado fuera de los más favorable al ajuste, ya que el grado de inmersión de cauce y llanuras es muy grande, de modo que la diferencia entre los dos elementos es pequeña (o bien sólo debida a la rugosidad). Podría ser interesante estudiar la influencia del grado de inmersión con ensayos de menor caudal para estudiar la influencia del caudal o grado de inmersión en los ajustes, así como la aplicabilidad de las reducciones de los coeficientes a otros casos, por ejemplo sin plantas (sólo existiría la influencia geométrica). Aun así, en los ensayos con menor inmersión puede aparecer la duda de hasta que punto las probables variaciones en el coeficiente de rugosidad se deben también a la mayor influencia de la rugosidad de forma (geometría sub-malla) que puede existir al tener calados del mismo orden de magnitud que la rugosidad absoluta (gravas de 2 cm), y cuya influencia será distinta para cada caudal, por lo que difícilmente los resultados podrán ser extrapolados a oros casos u obtenerse conclusiones generales.