

Capítulo 6. Descripción del modelo CARPA

6.1. Introducción y estructura del modelo

El modelo CARPA (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas) permite una modelación conjunta en una y dos dimensiones de una red fluvial y sus llanuras de inundación. El área de estudio se puede dividir en distintas zonas, y en cada una de ellas utilizar una aproximación unidimensional o bidimensional según sean las condiciones reales del flujo, la precisión que se desee y el coste computacional asumible.

El modelo resuelve las ecuaciones de Saint Venant con alguno de los métodos expuestos en los capítulos anteriores, dadas unas condiciones iniciales, unas condiciones de contorno, una rugosidad y unos parámetros de cálculo (incremento de tiempo de cálculo, umbral de secado-mojado).

En este capítulo se describe el algoritmo utilizado en el proceso de secado y mojado, que consigue mantener exactamente el volumen incluso con geometrías irregulares (pendiente de fondo variable). Se explica también la incorporación en el esquema de aportaciones procedentes de precipitación, lo que integra al modelo hidráulico un modelo hidrológico distribuido, que utiliza las ecuaciones de Saint Venant para la modelación de la transformación lluvia-caudal.

A continuación se describen las distintas posibilidades de esquemas numéricos, capacidades del modelo, y herramientas de pre y post proceso implementadas, que convierten el modelo en una herramienta potente, práctica y amigable para aplicar a casos reales. Debido a que algunas de las capacidades del modelo se implementaron en primer lugar en dos dimensiones, y posteriormente se añadieron al cálculo unidimensional, en primer lugar se describe el módulo 2D, y posteriormente el 1D. Para algunos procesos, como en el caso de secado-mojado de elementos, una vez implementado en 2D la simplificación a 1D es inmediata.

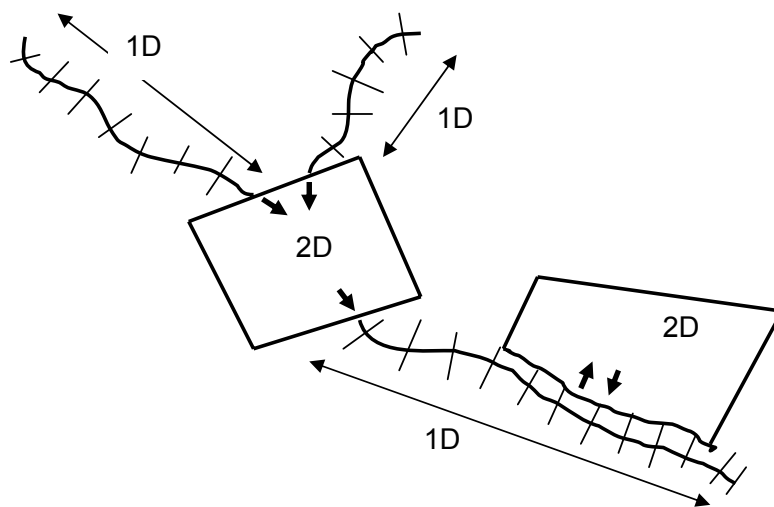


Figura 6.1. Descomposición del área de estudio en dominios unidimensionales o bidimensionales

6.2. Módulo bidimensional

El módulo bidimensional del modelo CARPA resuelve las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales en un dominio discretizado por una malla de cálculo irregular y no estructurada, con distintos esquemas numéricos y variantes de los mismos, permitiendo simular el mojado y secado del terreno. Incorpora asimismo la posibilidad de considerar el efecto de la precipitación con distintas funciones de pérdidas, siendo por lo tanto también un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía

6.2.1. Esquemas numéricos

En el modelo CARPA se han implementado algunos de los esquemas numéricos para la resolución de las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales descritos en el apartado 5.5 del *Capítulo 5*, y en concreto los que se muestran en la Tabla 6.1 (siempre utilizando la discretización en volúmenes finitos). Respecto del esquema de McCormack, cabe recordar que el tratamiento del término independiente puede hacerse de distintas maneras, pero que tan sólo dos de ellas (tercera y cuarta, apartado 5.4.2.1 del *Capítulo 5*, o puntos 3 y 4 de la Tabla 6.1) consiguen un correcto balance con la parte homogénea de la ecuación. De estas dos variantes del esquema, similares entre ellas en cuanto a precisión, la última es más eficiente y sencilla de programar. De todos modos, incluso esta última versión del esquema de McCormack no posee ninguna ventaja respecto del esquema WAF TVD, más consistente, en el que, por otro lado, se basa. Por ello el esquema WAF TVD es el que se recomienda en alta resolución.

Para el esquema MUSL TVD no se dispone de un tratamiento del término independiente de acuerdo con el resto de la ecuación, por lo que sólo se debería utilizar para ejemplos con pendiente de fondo constante en todo el dominio.

En la Tabla 6.1 se resaltan en negrita los dos métodos recomendados según el orden de precisión que se desee, teniendo en cuenta que el coste computacional del esquema de primer orden es sensiblemente menor.

Orden de precisión	Esquema	Término independiente
1r orden	Godunov + Roe 2D	Upwind
Alta resolución	McCormack TVD 2D	1. Centrado en predictor y corrector
		2. Ponderado en predictor y corrector
		3. Ponderado en predictor y corrector con corrección TVD
		4. Upwind (en un solo paso)
	MUSCL TVD 2D	Centrado
WAF TVD 2D	Upwind	

Tabla 6.1. Esquemas numéricos implementados

6.2.2. Funciones de limitación

Con cualquiera de los esquemas TVD se puede optar por cualquiera de las funciones de limitación presentadas en el Capítulo 4, apartado 4.4.1, es decir, *Van Leer*, *Minmod*, *Superbee*, *Van Albada* o *Ultrabee*.

6.2.3. Discretización del dominio

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los volúmenes finitos pueden ser, para cualquiera de los esquemas numéricos implementados, cuadriláteros o triángulos, o combinaciones de ambos. Para ellos se puede utilizar una malla regular o irregular y, en este caso, puede ser estructurada o no estructurada. En la Figura 6.2 se puede ver el detalle de cuatro mallas utilizadas en distintas aplicaciones (cruce de calles, río Segre, río Llobregat y río Francolí).

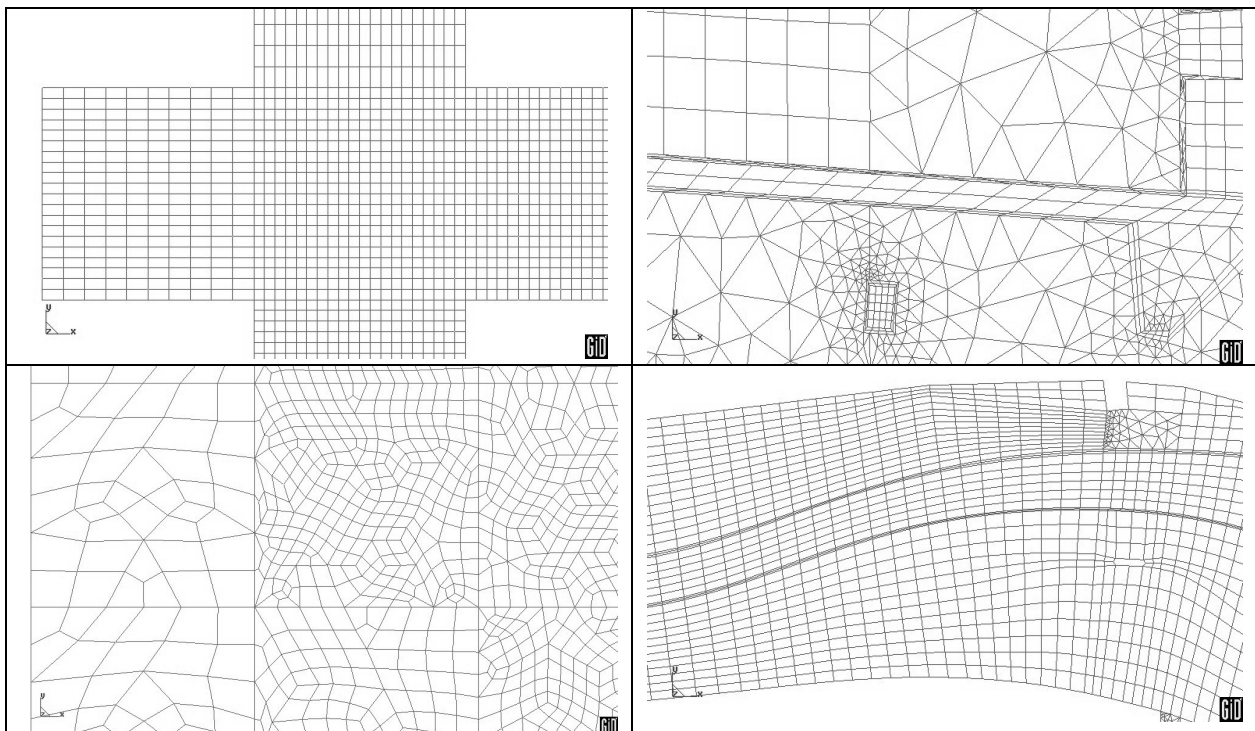


Figura 6.2. Detalle de distintas mallas utilizadas en las aplicaciones.

6.2.4. Condiciones iniciales

En la modelación bidimensional, como condición inicial se deben imponer, en cada elemento de volumen, el calado (o alternativamente la cota de la lámina de agua), y las dos componentes de la velocidad. El modelo permite empezar el cálculo con todo el dominio, o una parte del mismo, seco. Para los elementos secos se considera que el valor del calado y de las componentes de la velocidad son nulos.

6.2.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se pueden utilizar son las descritas en el apartado 4.3.5 y que se resumen en la Tabla 6.2. Por supuesto se pueden imponer distintas condiciones de contorno en distintos instantes de tiempo para dar condiciones variables como hidrogramas de entrada, o niveles de agua variables en la salida, entre los instantes dados el programa interpola linealmente.

Extremo	Régimen hidráulico	Condición impuesta
Entrada	Rápido	1a. Calado y componentes de la velocidad según las direcciones normal y tangente al contorno. 1b. Calado y caudal específico según las direcciones normal y tangente al contorno.
	Lento	2a. Componentes de la velocidad según las direcciones normal y tangente al contorno. 2b. Caudal específico según las direcciones normal y tangente al contorno. 2c. Calado y componente de la velocidad en la dirección tangente al contorno.
Salida	Lento	3a. Calado 3b. Velocidad normal al contorno 3c. Caudal específico normal al contorno 3d. Relación caudal normal al contorno -calado
	Rápido	
Pared material		
Conexión con una zona modelada mediante aproximación unidimensional		

Tabla 6.2. Condiciones de contorno posibles en los límites de un dominio bidimensional

6.2.6. Mojado y secado

La correcta simulación del proceso de secado y mojado de elementos es fundamental para asegurar la conservación de la masa. Tradicionalmente la aproximación más utilizada para considerar este proceso consiste en dividir los elementos en dos categorías, secos y mojados, según la profundidad de agua en cada uno de ellos sea respectivamente menor o mayor que una cierta cantidad prefijada. Si el elemento está seco, no interviene en el cálculo. La diferencia entre los distintos métodos recae principalmente en cómo se detecta que un elemento vuelve a estar mojado. Por lo general se suele hacer o bien en función de los niveles de agua en elementos contiguos, o bien considerando en los elementos secos pero junto a un mojado la ecuación de continuidad pero no la de conservación de la cantidad de movimiento.

Sin embargo, estas metodologías presentan grandes problemas de conservación de la masa, acrecentados aun más si el fondo no es plano, por el efecto del término independiente de las ecuaciones.

En este trabajo se ha abordado el problema considerando tres posibles estados para cada elemento: *seco no mojable*, *seco mojable* o *mojado*, y según el estado del elemento se aborda su cálculo de una manera distinta:

- Se considera elemento *seco no mojable* aquel que tiene una profundidad de agua por debajo de cierta tolerancia, y además está rodeado por elementos secos (mojables o no). La tolerancia puede ser cero, aunque suele ser recomendable utilizar un valor algo mayor para evitar problemas con el término de fricción que pueden aparecer con profundidades muy pequeñas. En los elementos secos no mojables, las dos componentes de la velocidad son nulas y no se realiza ningún cálculo de propagación. El único cálculo que se realiza corresponde al posible aumento del volumen almacenado en el elemento por efecto de la precipitación, o disminución del mismo por efecto de las pérdidas consideradas en el modelo hidrológico.
- Se considera elemento *seco mojable* aquel que tiene una profundidad de agua inferior a la tolerancia (cuyo valor puede ser cero) y por alguno de sus lados conecta con un elemento mojado. Las dos componentes de la velocidad son nulas. Para cada lado del elemento, si el elemento contiguo está seco (mojable o no), el flujo numérico y el término independiente se consideran nulos. En cada incremento de tiempo, se permite que el volumen de agua en un elemento *seco mojable* aumente o disminuya por efecto de la precipitación o las pérdidas, pero a través de los contornos que conectan con un elemento mojado sólo se permite que entre agua, nunca que salga. Si a través de dicho lado el volumen de agua tiende a disminuir, el flujo numérico y término independiente se igualan a cero, pues no tiene sentido que un elemento seco se seque más. De esta manera sólo habrá flujo a través de los contornos que conecten con un elemento mojado, y sólo en el caso que el flujo sea entrante.

- Se considera elemento *mojado* aquel que tiene una profundidad de agua mayor que una cierta tolerancia. En los lados de un elemento mojado comunes a otro elemento mojado, el cálculo se realiza normalmente según lo expuesto en el capítulo anterior. En los lados que conectan con un elemento seco (que será *seco mojado* por estar al lado de un mojado) puede haber flujo saliente, pero naturalmente no puede haber flujo entrante desde un elemento seco.

Para calcular el flujo en un contorno entre elemento mojado y otro seco, y asegurar la conservación de la masa, se aplica la idea presentada por Brufau, (2000) distinguiendo según $(h + z_0)$ sea menor en el elemento seco que en el mojado, o a la inversa Figura 6.3.

En el caso $(h + z_0)_{\text{seco}} < (h + z_0)_{\text{mojado}}$ el cálculo se realiza normalmente según lo expuesto en el capítulo anterior. En cambio, en el caso $(h + z_0)_{\text{seco}} > (h + z_0)_{\text{mojado}}$ hay que considerar una corrección en el cálculo de la pendiente de fondo (que interviene en el cálculo de $\tilde{\beta}$ en (4.163)) para asegurar la conservación de la masa (y evitar por ejemplo que, en la situación de agua en reposo, el cálculo produzca flujo hacia el elemento mojado por efecto de la pendiente de fondo).

Si denotamos con i al elemento mojado y con j al seco, la corrección para el cálculo de Δz_{ij} queda:

$$\begin{aligned} \Delta z_{ij} &= z_j - z_i & \text{si } (h + z_0)_j < (h + z_0)_i \\ \Delta z_{ij} &= h_i - h_j & \text{si } (h + z_0)_j > (h + z_0)_i \end{aligned} \quad (6.1)$$

De esta manera, en un estado estacionario con lámina de agua horizontal, la pendiente de fondo en el término independiente compensará exactamente el gradiente de calados, y el estado de agua en reposo se mantendrá. Esto no ocurriría sin la corrección mencionada.

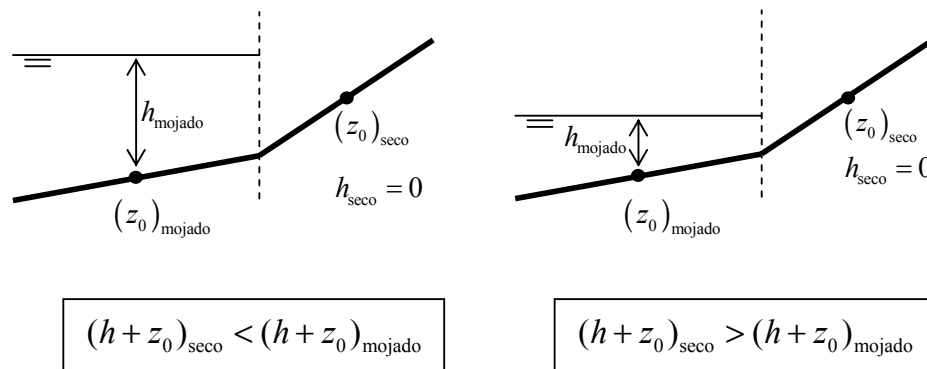


Figura 6.3. Mojado y secado de elementos

6.2.7. Modelo hidrológico

Aunque el objetivo de la tesis no es el de la modelación hidrológica, debido a que la formulación en volúmenes finitos permite implementar de fórmula muy simple una aportación o detracción de volumen en cada elemento de la malla, se ha implementado en el módulo bidimensional del modelo CARPA la posibilidad de considerar el efecto de la precipitación, así como un modelo de pérdidas simple para considerar la infiltración de agua en el terreno, u otros procesos (evapotranspiración, interceptación, acumulación en pequeñas depresiones). Para ello se deben modificar las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (2.47) alterando el término independiente \mathbf{H} , que queda como:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} I - L \\ gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

siendo I la intensidad de precipitación y L las pérdidas, ambas en volumen por unidad de tiempo y unidad de área. Con la discretización en volúmenes finitos utilizada, la inclusión de estos términos, que afectan tan solo la ecuación de continuidad, en el esquema numérico es inmediata. La descomposición del término independiente (5.18) quedará ahora

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^1 + \mathbf{H}^2 + \mathbf{H}^3 \quad (6.3)$$

con \mathbf{H}^1 y \mathbf{H}^2 dados por (5.19) y (5.20) y

$$\mathbf{H}^3 = \begin{pmatrix} I - L \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

De esta manera, \mathbf{H}_i^* en (5.21) quedará como $\mathbf{H}_i^* = \mathbf{H}_i^{*1} + \mathbf{H}_i^{*2} + \mathbf{H}_i^{*3}$ con $\mathbf{H}_i^{*3} = V_i \mathbf{H}_i^3$.

Para la definición de la precipitación es necesario dar el valor de la intensidad en una serie de instantes de tiempo en cada uno de los elementos de la malla de cálculo. En los instantes intermedios, el modelo interpola linealmente con los valores dados. De esta manera, es posible definir una precipitación variable tanto temporalmente como espacialmente.

La función de pérdidas implementada en el modelo consiste en el conocido modelo lineal, que considera una abstracción inicial P_0 (volumen por unidad de área) que debe satisfacerse para que empiece la escorrentía, y a continuación unas pérdidas continuas ϕ constantes (volumen por unidad de área y por unidad de tiempo). El valor tanto de la abstracción inicial como de las pérdidas continuas puede variar de elemento en elemento. Este modelo se ha implementado para comprobar la utilidad del modelo en la transformación lluvia-escorrentía, la conservación de volumen, la capacidad de mojado y secado, y el buen funcionamiento incluso con profundidades muy pequeñas. Con poco esfuerzo podrían implementarse otros modelos de pérdidas de precipitación (por ejemplo el método del Número de Curva del SCS, el de Horton o el de Green-Ampt para infiltración, etc.).

Se dispone pues de una herramienta para transformación lluvia-caudal de onda completa, que se puede utilizar como alternativa a los métodos clásicos (hidrograma unitario en subcuencas y propagación por Muskingum). Al no tener que recurrir a hidrogramas unitarios sintéticos los resultados pueden reflejar mucho mejor la geometría de la cuenca, para la propagación no hace falta estimar parámetros sino que se realiza a partir de la geometría y rugosidad de la cuenca y cauce, se pueden modelar precipitaciones variables temporal y espacialmente, y mediante el software de pre y post proceso utilizado (GiD) se puede incorporar fácilmente la información topográfica a partir de modelos digitales de terreno y representar gráficamente los resultados (hidrológicos e hidráulicos).

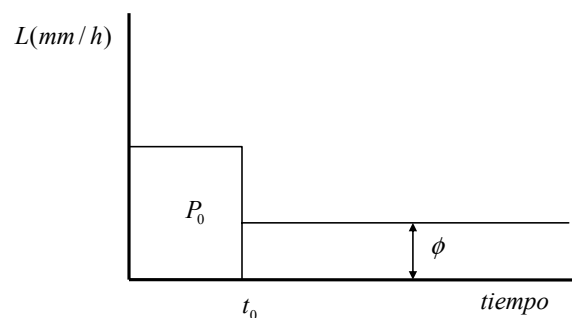


Figura 6.4. Modelo lineal de pérdidas implementado en el módulo hidrológico.

6.3. Módulo unidimensional

El módulo unidimensional resuelve las ecuaciones del régimen variable en lámina libre en una dimensión, pudiéndose escoger entre distintos esquemas numéricos y distintas variantes de cada uno de ellos, para un cauce de geometría cualquiera y coeficiente de rugosidad variable dentro de una misma sección transversal. Permite la simulación del avance sobre fondo seco, así como el secado completo del cauce. En el módulo 1D no tiene demasiado sentido la incorporación de un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía, ni se ha implementado un modelo de pérdidas.

6.3.1. Esquemas numéricos

En la Tabla 4.1 se resumen los distintos esquemas numéricos implementados y que se pueden utilizar en la modelación unidimensional, todos ellos detallados en el capítulo anterior. Igual que en el caso 2D, tan sólo las dos últimas variantes del esquema de McCormack son válidas para geometrías irregulares (canal no prismático), y ambas son superadas en eficiencia y consistencia por el esquema WAF TVD. El esquema MUSCL TVD tampoco es de aplicación para canales no prismáticos por no existir un tratamiento del término independiente que consiga un correcto balance con el resto de la ecuación.

Orden de precisión	Esquema	Término independiente
1r orden	Godunov + Roe 1D	Upwind
Alta resolución	McCormack TVD 1D	1. Centrado en predictor y corrector
		2. Ponderado en predictor y corrector
		3. Ponderado en predictor y corrector con corrección TVD
4. Upwind (en un solo paso)		
	MUSCL TVD 1D	Centrado
	WAF TVD 1D	Upwind

Tabla 6.3. Esquemas numéricos implementados

6.3.2. Funciones de limitación

Igual que en el caso 2D, con cualquiera de los esquemas TVD se puede optar por las siguientes funciones de limitación: *Van Leer*, *Minmod*, *Superbee*, *Van Albada* o *Ultrabee*.

6.3.3. Condiciones iniciales

En el cálculo unidimensional, como condiciones iniciales se requiere conocer el valor del caudal y calado en cada una de las secciones de estudio. Para ello, con el valor del caudal y las condiciones de contorno en el primer instante de tiempo, el modelo realiza un cálculo en régimen permanente gradualmente variado para determinar el resto de variables hidráulicas en cada sección. El cálculo se realiza integrando la ecuación de conservación de la energía con el conocido método paso a paso, considerando secciones compuestas, según el método explicado en (DEHMA, 1996).

6.3.4. Condiciones de contorno

La distintas posibilidades de condiciones de contorno implementadas en el modelo, y que se pueden imponer en cada extremo de los tramos de río tratados unidimensionalmente, se han descrito en detalle en el apartado 4.5 del *Capítulo 4* y se resumen en la Tabla 6.4. Estas condiciones se imponen en unos instantes de tiempo determinados. En el resto, las condiciones de contorno se obtienen por interpolación lineal.

Extremo	Régimen hidráulico	Condición impuesta
Entrada	Rápido	1a. Caudal y calado 1b. Velocidad y calado
	Lento	2a. Caudal 2b. Velocidad 2c. Calado
Salida	Lento	3a. Caudal 3b. Velocidad 3c. Calado 3d. Relación caudal-calado
	Rápido	
Conexión con una zona modelada mediante aproximación bidimensional		

Tabla 6.4. Condiciones de contorno posibles en un extremo de un tramo unidimensional

6.3.5. Mojado y secado

En el módulo 1D se ha implementado un proceso de secado análogo al del caso bidimensional, considerando tres posibles estados para cada elemento: *seco no mojable*, *seco mojable* o *mojado*:

- Se considera elemento *seco no mojable* aquel que tiene una profundidad de agua por debajo de cierta tolerancia (cuyo valor puede ser cero), y además no tiene al lado ningún elemento mojado. En ellos el caudal es nulo y no se realiza ningún cálculo.
- Se considera elemento *seco mojable* aquel que tiene una profundidad de agua inferior a la tolerancia y al menos en un lado tiene un elemento mojado. El caudal es nulo. Si por un lado conecta con un elemento seco (mojable o no), el flujo numérico y el término independiente en dicho lado se consideran nulos. En un elemento mojable sólo se permite que entre agua, nunca que salga.
- Se considera elemento *mojado* aquel que tiene una profundidad de agua mayor que una cierta tolerancia. En los lados comunes a otro elemento mojado, el cálculo se realiza normalmente según lo expuesto en el capítulo anterior. En los lados que conectan con un elemento seco puede haber flujo saliente.

En un contorno entre elemento seco y mojado, se aplica el mismo procedimiento visto en el cálculo bidimensional para asegurar la conservación de la masa, distinguiendo según $(y + z_0)$ sea menor en el elemento seco que en el mojado, o a la inversa. En el caso $(h + z_0)_{\text{seco}} < (h + z_0)_{\text{mojado}}$ el cálculo se realiza normalmente, pero si $(h + z_0)_{\text{seco}} > (h + z_0)_{\text{mojado}}$ hay que considerar la corrección de la pendiente de fondo (que interviene en $\tilde{\beta}$ (en (4.48)):

$$\begin{aligned} \Delta z_{ij} &= z_j - z_i & \text{si } (h + z_0)_j < (h + z_0)_i \\ \Delta z_{ij} &= h_i - h_j & \text{si } (h + z_0)_j > (h + z_0)_i \end{aligned} \quad (6.5)$$

donde i indica el elemento mojado y j el seco. De esta manera, en un estado estacionario con lámina de agua horizontal, la pendiente de fondo en el término independiente compensará el gradiente de calados y el estado de agua en reposo se mantendrá.

6.3.6. Cauces compuestos

El modelo considera que una sección transversal del río está constituida por un cauce central y una llanura de inundación (que puede existir o no) a cada lado. Asimismo, cada una de estas tres zonas puede estar formada por subzonas con distinta rugosidad. En cada una de las tres zonas (I: llanura izquierda, C: cauce central y D: llanura derecha) el coeficiente de rugosidad de Manning, n_I , n_C , n_R se puede calcular a partir del coeficiente de rugosidad en las subzonas que la constituyen:

$$n_I = \frac{A_I R_{h,I}^{2/3}}{\sum_i \frac{1}{n_{I_i}} A_{I_i} R_{h,I_i}^{2/3}} ; \quad n_C = \frac{A_C R_{h,C}^{2/3}}{\sum_j \frac{1}{n_{C_j}} A_{C_j} R_{h,C_j}^{2/3}} ; \quad n_D = \frac{A_D R_{h,D}^{2/3}}{\sum_k \frac{1}{n_{D_k}} A_{D_k} R_{h,D_k}^{2/3}} \quad (6.6)$$

donde A indica área, R_h radio hidráulico y n el coeficiente de rugosidad de Manning. Los subíndices I , C y D indican respectivamente la llanura izquierda, el cauce central y la llanura derecha, mientras que los subíndices I_i , C_j y D_k indican los tramos de distinta rugosidad de cada una de estas zonas. A su vez, el coeficiente de rugosidad de la sección (coeficiente de rugosidad equivalente n_{eq}) se calcula como:

$$n_{eq} = \frac{A R_h^{2/3}}{\frac{1}{n_I} A_I R_{h,I}^{2/3} + \frac{1}{n_C} A_C R_{h,C}^{2/3} + \frac{1}{n_D} A_D R_{h,D}^{2/3}} \quad (6.7)$$

Esta formulación (fórmula de Lotter (Chaudhry, 1993)), se deduce a partir de la hipótesis que el caudal en toda la sección es la suma del caudal en cada subzona, y que en toda la sección existe una única pendiente motriz.

Otra posible formulación, también implementada en el modelo, es el método de Horton que propone una única velocidad media en toda la sección. A partir de esta hipótesis el equivalente a las ecuaciones (6.6) y (6.7) es:

$$n_I = \left(\frac{\sum_i P_{I_i} n_{I_i}^{3/2}}{P} \right)^{2/3} ; \quad n_C = \left(\frac{\sum_j P_{C_j} n_{C_j}^{3/2}}{P} \right)^{2/3} ; \quad n_D = \left(\frac{\sum_k P_{D_k} n_{D_k}^{3/2}}{P} \right)^{2/3} \quad (6.8)$$

$$n_{eq} = \left(\frac{P_I n_I^{3/2} + P_C n_C^{3/2} + P_D n_D^{3/2}}{P} \right)^{2/3} \quad (6.9)$$

donde P indica el perímetro mojado.

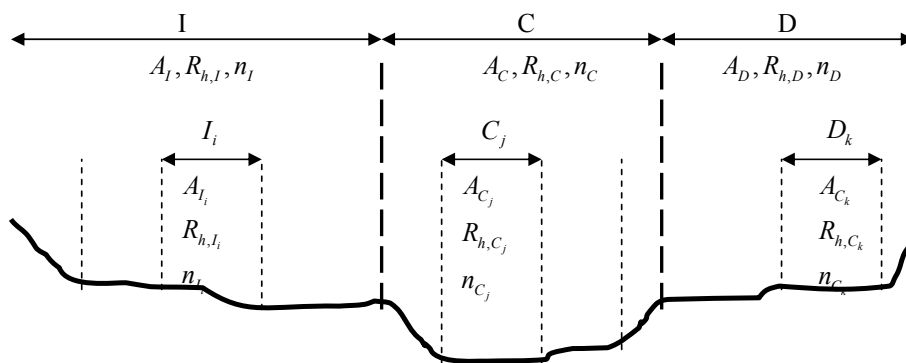


Figura 6.5. Sección compuesta

6.4. Ensamblaje módulos 1D y 2D

CARPA integra la resolución de las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales y bidimensionales en un único modelo. En el capítulo anterior se han descrito los modelos numéricos en los dominios unidimensionales y bidimensionales, así como las capacidades del modelo realizado. En los próximos apartados se describe como se lleva a cabo el cálculo en las fronteras entre dominio unidimensional y bidimensional. Se han considerado dos tipos de frontera distintos (Figura 3.1):

1. Cambio de dominio en el sentido del flujo.
2. Desbordamiento lateral del río

6.4.1. Cambio de dominio en el sentido del flujo

Se produce en el extremo aguas abajo o aguas arriba de un tramo unidimensional en contacto con una zona de flujo bidimensional, como una confluencia, un encauzamiento que finaliza en una gran llanura, un tramo de río con estructuras que alteran la unidimensionalidad del flujo, etc. Como la aproximación unidimensional implica que la velocidad del agua tiene la dirección normal a una sección transversal, se supone que el flujo es normal al contorno de entrada del dominio bidimensional.

En un contorno 1D-2D en el sentido del flujo, habrá una serie de elementos del dominio 2D que conectarán con el tramo 1D y, más concretamente, con el cauce central, la llanura izquierda, o la llanura derecha (Figura 6.6). La discretización en volúmenes finitos en una dimensión implica que cada sección es representativa de un tramo de río o celda 1D, y los valores de las variables en la sección se pueden entender como los valores promedio en la celda.

La base del esquema de cálculo consiste en considerar en el modelo el cambio de dominio como un contorno más. Al ser el esquema explícito, para calcular las variables dentro del dominio 2D en un instante de tiempo se requiere el valor de las variables en el instante anterior dentro del dominio y en los elementos ficticios que conforman su contorno (apartado 4.3.5 del *Capítulo 4*). Para una entrada a la zona 2D desde un tramo 1D se utilizará, como condición de contorno, el valor de las variables en el último tramo de río modelado unidimensionalmente, mientras que para una salida se utilizarán como condición de contorno las variables del primer tramo del río 1D aguas abajo.

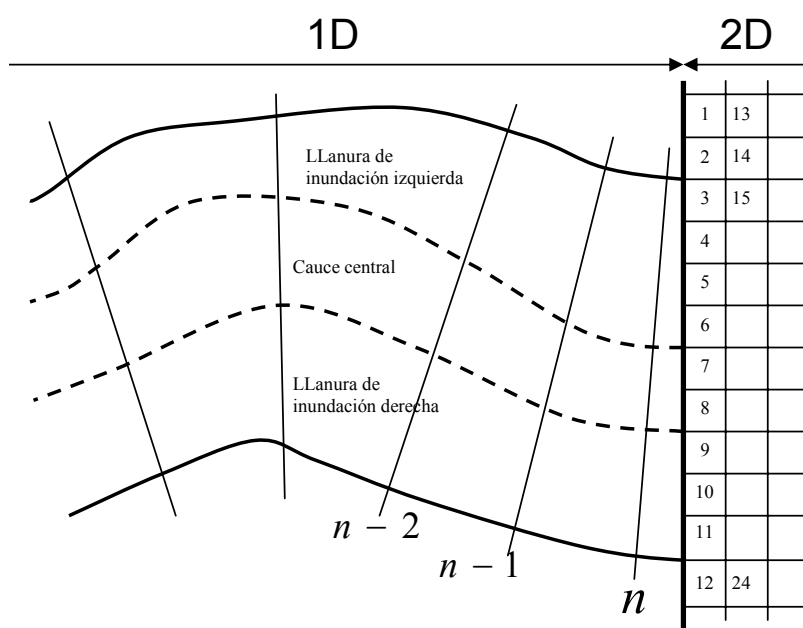


Figura 6.6. Esquema de conexión 1D-2D

Así, las condiciones de contorno que se imponen en el contorno 2D son la cota de la lámina de agua, la velocidad, y que la corriente sea perpendicular al contorno. La cota de la lámina de agua y la velocidad se obtienen directamente de la última sección del tramo 1D: la primera es un resultado directo del cálculo mientras que para la segunda se considera la velocidad en la llanura izquierda, cauce central, o llanura derecha, dependiendo de con cual de estas tres zonas esté en contacto el elemento en cuestión. La velocidad en cada una de las tres zonas se obtiene como el cociente del caudal de cada zona dividida por el área, y el caudal se obtiene con la hipótesis de igual pendiente motriz en cauce y llanuras:

$$v_I = \frac{Q_I}{A_I} \quad ; \quad Q_I = Q \frac{\frac{1}{n_I} A_I R_{h,I}^{2/3}}{\frac{1}{n_{eq}} A R_h^{2/3}} \quad (6.10)$$

$$v_C = \frac{Q_C}{A_C} \quad ; \quad Q_C = Q \frac{\frac{1}{n_C} A_C R_{h,C}^{2/3}}{\frac{1}{n_{eq}} A R_h^{2/3}} \quad (6.11)$$

$$v_D = \frac{Q_D}{A_D} \quad ; \quad Q_D = Q \frac{\frac{1}{n_D} A_D R_{h,D}^{2/3}}{\frac{1}{n_{eq}} A R_h^{2/3}} \quad (6.12)$$

donde v_I , v_C y v_D son respectivamente la velocidad en la llanura izquierda, cauce central y llanura derecha.

En los dominios 1D la condición de contorno aguas arriba se obtiene de los elementos de la zona 2D en contacto con este extremo, y lo mismo para el extremo aguas abajo. Para ello es necesario determinar una cota de agua y un caudal en el elemento de contorno a partir de los valores en el dominio 2D. El caudal se obtiene integrando el caudal unitario en todo el contorno común a los dominios 1D y 2D, y la cota de la lámina de agua con un promedio, ponderado según la longitud de los lados de los elementos, de la cota de la lámina de agua en los elementos 2D:

$$Q_{n+1} = \sum_{k=1}^{n_e} h_k u_{n,k} l_k \quad (6.13)$$

$$z_{n+1} = \frac{\sum_{k=1}^{n_e} z_k l_k}{\sum_{k=1}^{n_e} l_k} \quad (6.14)$$

siendo Q_{n+1} y z_{n+1} el caudal y la cota de la lámina de agua en el elemento de contorno 1D, y h_k , $u_{n,k}$, l_k y z_k el calado, la velocidad normal al contorno, la longitud de contorno y la cota de la lámina de agua de cada elemento del dominio 2D en contacto con el dominio 1D.

En la Figura 6.7 se puede apreciar la situación relativa de los elementos de contorno 1D y 2D en relación a los límites de los dominios. Se aprecia que el elemento de contorno 1D cae dentro del dominio 2D, concretamente se solapa con los elementos bidimensionales más próximos al contorno, y por lo tanto en él se impondrán como condiciones los valores de las variables en estos elementos 2D. Análogamente, los elementos de contorno 2D se solapan con el elemento unidimensional adyacente al contorno, de manera que en ellos las variables tomarán el valor de la última sección 1D.

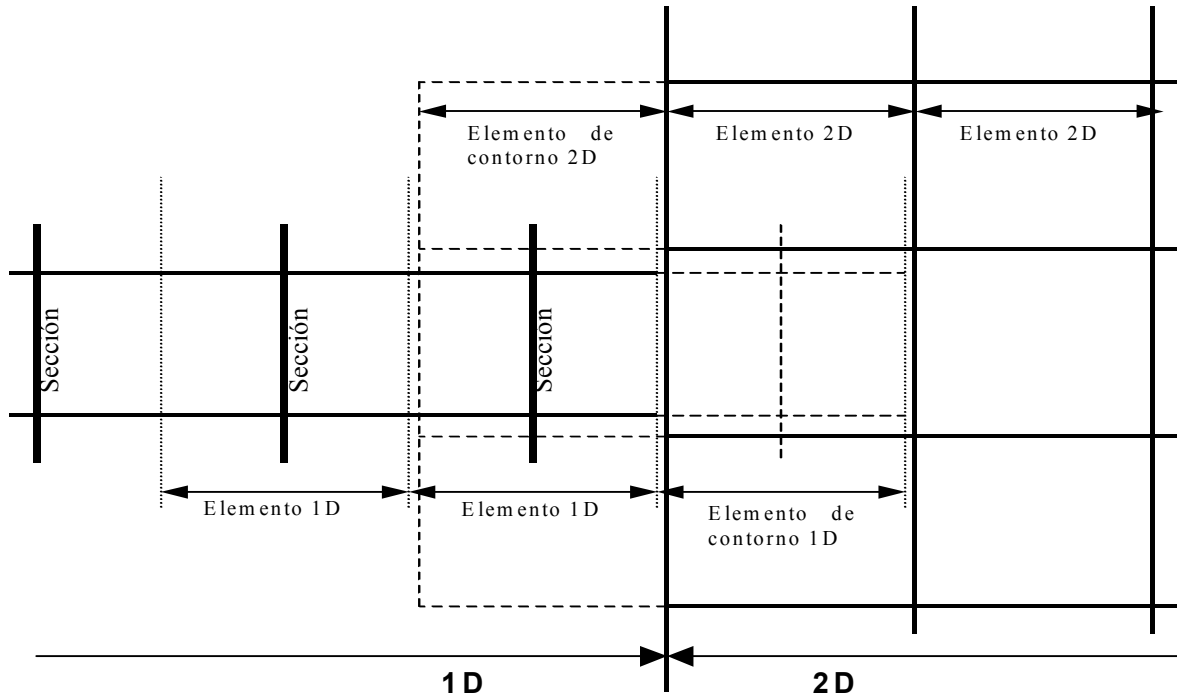


Figura 6.7. Situación relativa de elementos de contorno 1D-2D

6.4.2. Desbordamiento lateral del río

Se produce un desbordamiento lateral del río cuando la cota de la lámina de agua supera los límites de la sección que define el cauce, y pasa a inundar la llanura adyacente. En este caso, se han considerado dos tipos de conexión entre el río y la llanura adyacente: conexiones tipo vertedero y conexiones tipo río (Bladé et al. 1994).

1. **Conexión tipo vertedero.** Indicada cuando el desbordamiento se produce por encima de una mota o elevación, natural o artificial, y modelada con la ecuación de un vertedero de pared delgada, con caída libre o sumergida. Si z_w es la cota del vertedero, z_1 la cota de la lámina de agua en el lado aguas arriba del vertedero (dominio 1D o 2D) y z_2 la cota de la lámina de agua en el otro dominio, la ecuación utilizada para calcular el caudal unitario de transferencia, considerando la posible sumergencia del vertedero, es:

$$\left\{ \begin{array}{ll} q = Cd(z_1 - z_w)^{3/2} & \text{si } \frac{2}{3}(z_1 - z_w) > (z_2 - z_w) \\ q = \frac{3^{3/2}}{2} Cd(z_2 - z_w)(z_1 - z_2)^{1/2} & \text{si } \frac{2}{3}(z_1 - z_w) < (z_2 - z_w) \end{array} \right. \quad (6.15)$$

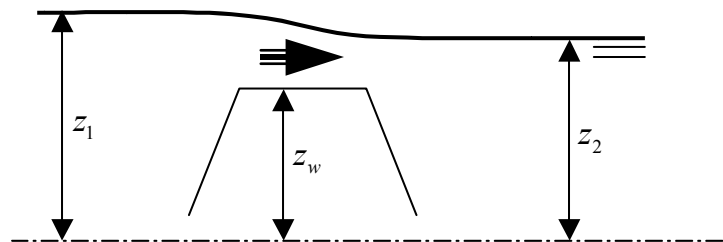


Figura 6.8. Conexión tipo vertedero entre dominios 1D y 2D

2. **Conexión tipo río.** Indicada cuando la llanura de inundación es una prolongación del cauce, sin existir un claro obstáculo entre una y otro. El caudal de transferencia viene condicionado principalmente por la rugosidad del fondo, y se evalúa con la fórmula de Manning:

$$q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (6.16)$$

donde n es el coeficiente de rugosidad de Manning, A el área de la sección de transferencia, R_h su radio hidráulico e i la pendiente de la lámina de agua entre el centro del elemento 2D (z_2) y el río (z_1).

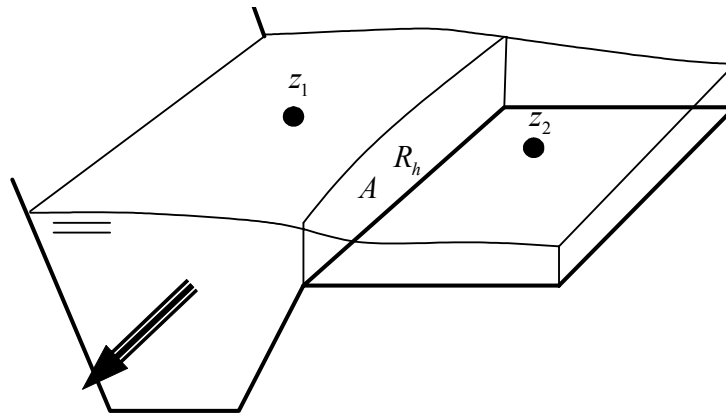


Figura 6.9. Conexión tipo río entre dominios 1D y 2D

6.4.2.1 Desbordamiento lateral del río en el dominio unidimensional

El hecho de considerar el desbordamiento lateral del río modifica el término independiente en las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales (2.51)(2.52), quedando (Chaudrhy, 1993):

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} q_l \\ gI_2 + gA(S_0 - S_f) + v_x q_l \end{pmatrix} \quad (6.17)$$

donde q_l es el caudal lateral por unidad de longitud de entrada al río, y v_x es la componente de la velocidad de dicho caudal en la dirección del eje del río. En este trabajo se ha supuesto que la dirección del flujo lateral es perpendicular al eje del río, por lo que $v_x = 0$. De esta manera el desbordamiento lateral modifica únicamente la ecuación de continuidad. Con esta modificación, el tratamiento del término independiente de la ecuación (4.84) debería modificarse según:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^1 + \mathbf{H}^2 + \mathbf{H}^3 \quad (6.18)$$

con

$$\mathbf{H}^3 = \begin{pmatrix} q_l \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

Así, la ecuación (4.94) quedaría

$$\mathbf{H}_i^* = \mathbf{H}_i^{*1} + \mathbf{H}_i^{*2} + \mathbf{H}_i^{*3} \quad (6.20)$$

con

$$\mathbf{H}_i^{*3} = \Delta x \mathbf{H}_i^3 \quad (6.21)$$

El valor de q_l se calcula con (6.15) o (6.16) según sea el caso si el flujo es de río a llanura. Con un flujo de la llanura hacia el río el caudal de transferencia se obtiene del cálculo bidimensional imponiendo la cota de agua en

el río si el régimen es lento, suponiendo calado crítico si la llanura funciona en régimen lento pero el nivel de agua en el río está por debajo de la sección de transferencia, o directamente del cálculo bidimensional si ésta funciona en régimen rápido.

6.4.2.2 Desbordamiento lateral del río en el dominio bidimensional

Para el dominio bidimensional, en un contorno correspondiente a un desbordamiento lateral del río habrá que imponer un caudal de transferencia y una cota de lámina de agua en los elementos del contorno.

Para una conexión tipo río, la ecuación (6.16) se emplea siempre que exista un flujo del río hacia la llanura, pero, en caso de que el flujo sea en sentido inverso, dicha ecuación sólo se utiliza en el caso en que el régimen hidráulico en la sección de transferencia calculado con (6.16) sea subcrítico. Si el cálculo indica flujo supercrítico, la condición que se utiliza en el contorno 2D es de calado crítico (como el modelo automáticamente utiliza el número de condiciones necesarias según el tipo de flujo, en el caso en que el flujo de la llanura a río sea supercrítico por la topografía de la propia llanura, el programa no requiere de ninguna condición de contorno y por lo tanto no utiliza la condición de calado crítico mencionada).

Así, para una conexión tipo río, las condiciones impuestas en cuanto a caudal y calado en cada caso son las detalladas en la Tabla 6.5.

Sentido del Flujo	Régimen hidráulico	Condiciones de contorno
Río a Llanura	Lento	Se impone el caudal según (6.16)
	Rápido	Se impone el caudal y la cota de agua: caudal según (6.16) y cota de agua igual a la del río
Llanura a río	Lento	1. Si la cota de agua en el río es mayor que la cota del calado crítico en la sección de transferencia: se impone la cota de agua en el río. 2. En caso contrario: Relación caudal-cota de agua dada por el calado crítico en la sección de transferencia
	Rápido	No es necesario imponer condición de contorno

Tabla 6.5. Condiciones de contorno en el dominio bidimensional en una conexión tipo río.

6.5. Preproceso y postproceso

Para la simulación de la propagación de una avenida por una red de cauces, realizando en algunas zonas un cálculo unidimensional y en otras un cálculo bidimensional, se requiere un considerable esfuerzo para la gestión de la información (topográfica y de usos del suelo), para preparar las mallas de cálculo (sección es transversales en zonas 1D, cuadriláteros o triángulos en zonas 2D), así como para asignar condiciones iniciales, condiciones de contorno, rugosidades, parámetros para la estimación de pérdidas de precipitación, etc. Para ello, y para la visualización de resultados, ha resultado muy útil el programa GiD (www.gidhome.com) desarrollado por el CIMNE (Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria). GiD consiste en una interfaz para el tratamiento de datos de geometría, generación de mallas de cálculo y visualización de resultados que puede ser adaptado a cualquier programa de cálculo basado en elementos finitos, volúmenes finitos o diferencias finitas, y personalizado al gusto del usuario.

La adaptación de GiD para CARPA se ha realizado dentro del proyecto Ramflood, subvencionado por el 5º Programa Marco de la Comunidad Europea. Tanto el CIMNE como la UPC forman parte del consorcio del proyecto. CARPA ha sido el modelo utilizado en las simulaciones hidráulicas realizadas en el proyecto. Para la adaptación se ha creado nuevo código específico para GiD, así como herramientas auxiliares para tratar con los formatos utilizados por los Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Finalmente, CARPA ha quedado como un paquete totalmente integrado, desde el cual se puede importar la geometría, definir zonas de estudio 1D y zonas 2D, construir respectivamente secciones transversales y mallas de cálculo, asignar condiciones iniciales, rugosidades, condiciones de contorno, datos de precipitación y pérdidas, ejecutar los cálculos y visualizar los resultados, tanto numéricamente como gráficamente.

6.5.1. Importación de geometría a partir de modelos digitales del terreno

Para la importación de geometría a partir de modelos digitales del terreno se ha implementado la importación a partir de dos formatos muy extendidos: archivos DXF y archivos en formato *grid ASCII* de Arc/Info. El objetivo de la importación es, a partir de los datos topográficos en uno de estos formatos, construir una superficie, o varias conectadas entre ellas, que reproduzcan de la forma más fiel posible la superficie del terreno. A continuación, el mallado y asignación de condiciones y propiedades a estas superficies permitirá generar los archivos de entrada para CARPA. GiD ya incorpora por defecto la importación a partir de archivos DXF, por lo que el trabajo se ha centrado en la importación de archivos Arc/Info en formato *grid ASCII*, llamados también archivos DTM (de *Digital Terrain Model*).

Los archivos DTM, en formato *grid ASCII* de Arc/Info, constan de una cabecera y, a continuación, los valores (en nuestro caso de cota) en una malla rectangular equiespaciada. Para importar la información en GiD se ha escrito nuevo código (en lenguaje *tcl*) que básicamente lee los archivos DTM, construye líneas paralelas con los puntos con misma coordenada *y* para, a partir de dichas líneas, construir una superficie para cada archivo importado. Para que la importación sea útil para generar una malla de cálculo, las distintas superficies creadas deben tener un contorno común. También es conveniente poder decidir el tamaño de superficie a importar ya que en la generación de malla se podrá escoger un tipo de elemento (triángulo o cuadrilátero) y un tamaño del mismo para cada superficie, pero no se pueden crear elementos de distinto tipo y tamaño en una única superficie.

Los archivos DTM suministrados por los servicios cartográficos tienen unos tamaños predeterminados y se suelen solapar entre ellos, por lo que no sirven directamente para generar mallas de cálculo. Por ello se ha realizado una pequeña aplicación (*DTM_maker*), también integrada en GiD, que a partir de una lista de archivos DTM crea otro conjunto de archivos, del tamaño que se especifique y eliminando solapes entre ellos.

Por otro lado, los archivos DTM tienen un cierto paso de malla. En algunos casos este paso puede ser muy pequeño (por ejemplo 1 m) y, si el área de estudio es grande (cientos de km^2), la cantidad de información si se importan los archivos completos puede ser excesiva (en el sentido que la malla de cálculo tendrá un paso mucho mayor y no aprovechará toda la información importada) y puede llegar a saturar la memoria del ordenador. Por este motivo, la importación de archivos DTM en GiD se ha implementado con la posibilidad de escoger un cierto paso de malla para la importación, de manera que se realiza ya un filtrado de la cantidad de información con que se trabajará.

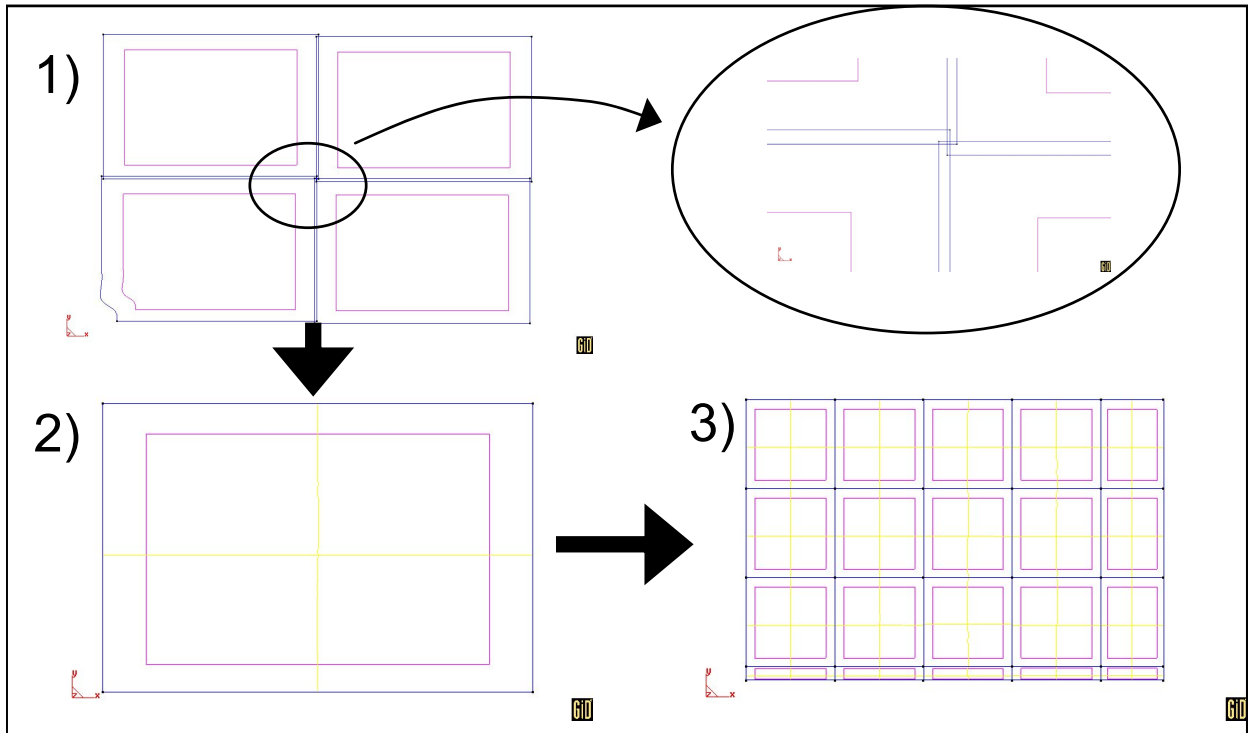


Figura 6.10. Pasos para importar archivos DTM: 1)Archivos originales, 2)Eliminación de solapes, 3)Importación con dimensiones especificadas

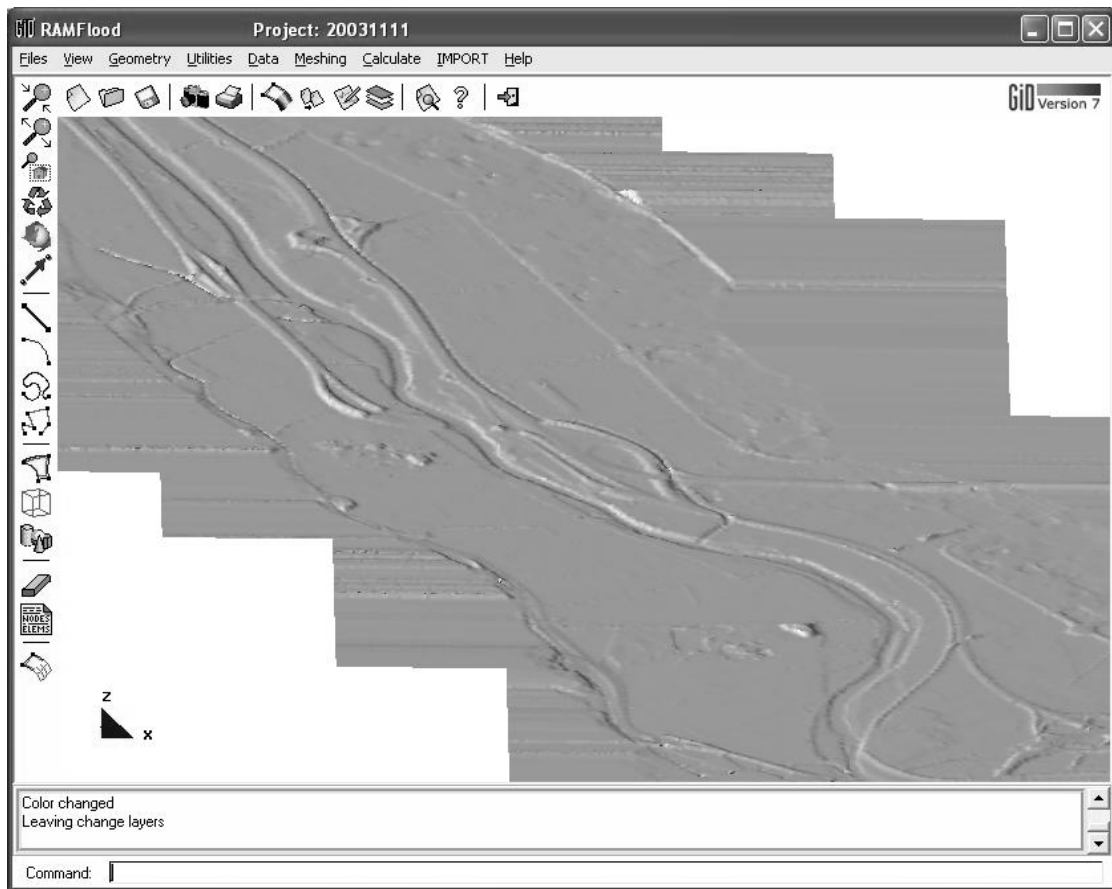


Figura 6.11. Interfaz GiD para CARPA con la visualización de una geometría importada a partir de archivos DTM en formato grid ASCII de Arc/Info

Es de destacar que la importación de archivos DTM en formato *grid ASCII* de Arc/Info produce, para una zona determinada, mejores superficies que la importación de archivos DXF, debido a la mayor regularidad espacial de puntos importados. En los archivos DXF la información topográfica suele venir como curvas de nivel, por lo que habrá zonas con mucha densidad de información, y zonas llanas con puntos muy separados. A la hora de construir una superficie que se aproxime de la mejor manera posible a todos los puntos, esta falta de regularidad hace que en las zonas con poca densidad de puntos la geometría creada pueda diferir mucho de la realidad.

Naturalmente, en el caso de dominios formados por figuras geométricas simples, la geometría se puede construir directamente en pantalla en base a puntos, líneas y superficies.

6.5.2. Elaboración de mallas de cálculo y asignación de propiedades y condiciones de contorno

Para la elaboración de la malla de cálculo en las zonas 2D se debe especificar el tipo de elemento en cada superficie (triángulo o cuadrilátero), el tamaño del mismo, y si la malla se desea estructurada o no. GiD dispone de tres malladores distintos RFast, RSurf y 2Dumg a escoger.

En los tramos 1D, para obtener las secciones transversales es necesario en primer lugar generar la malla 2D y, a continuación, marcar en planta sobre la misma el eje del río y las secciones transversales que se desean mediante una serie de líneas. El programa automáticamente creará secciones transversales con los puntos de intersección entre lados de elementos 2D y las líneas.

En los capítulos de verificación y aplicaciones se pueden ver tramos unidimensionales discretizados con secciones transversales y distintas mallas de cálculo bidimensionales.

Las condiciones de contorno y demás propiedades (rugosidad, condición inicial) se pueden asignar sobre la geometría o sobre la malla según se desee. Para ello en la personalización de GiD se han incluido una serie de menús específicos para las asignaciones.

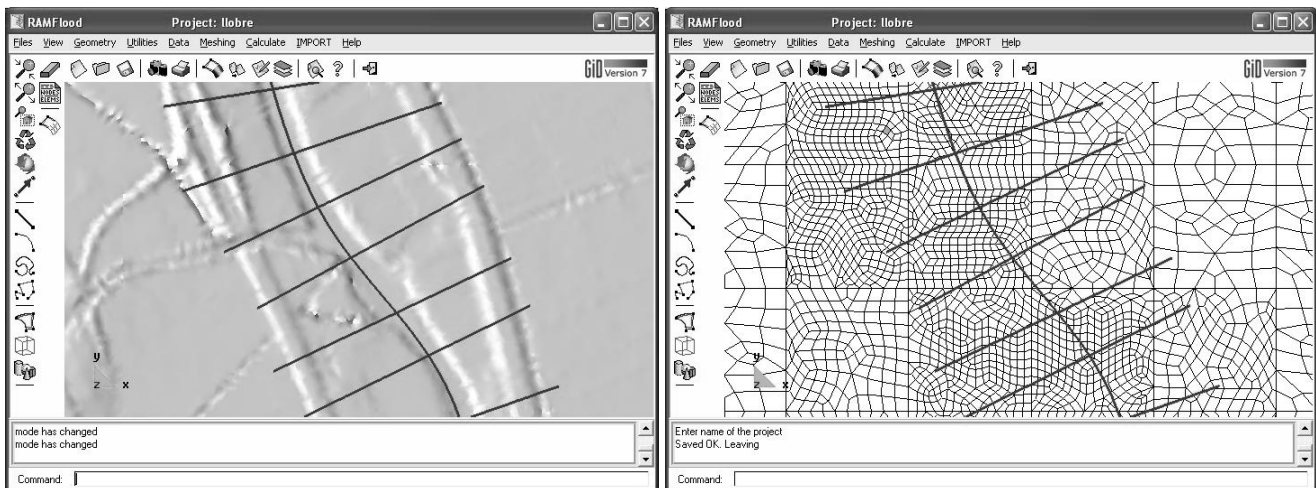


Figura 6.12. Creación de secciones transversales a partir de la malla 2D.

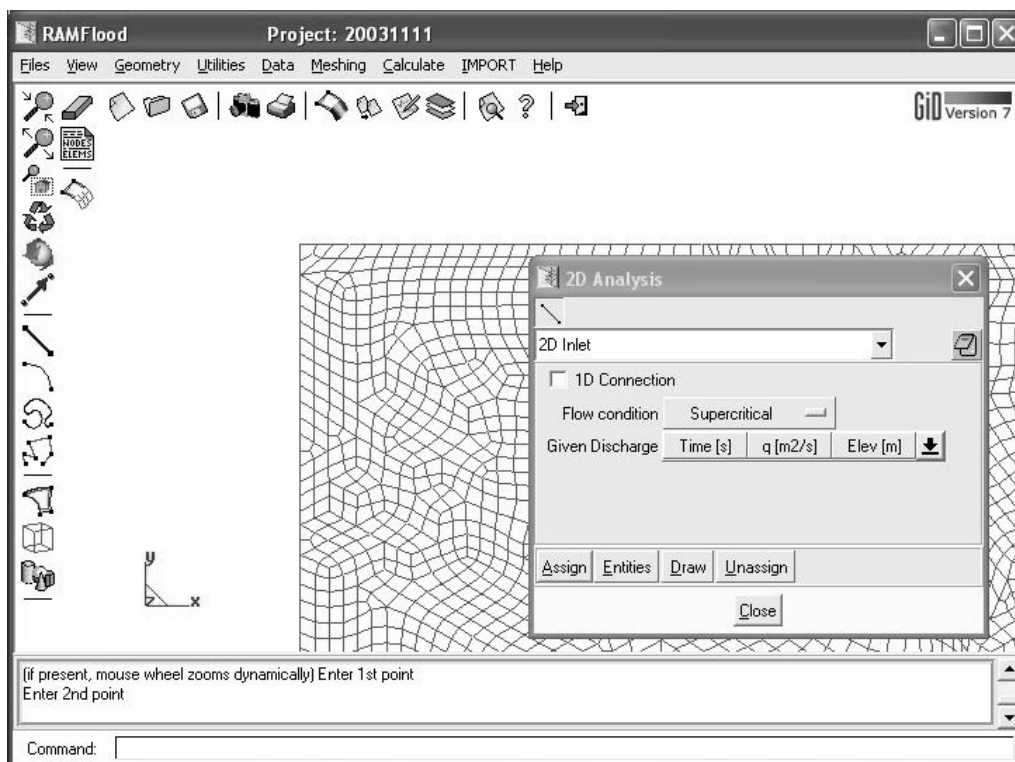


Figura 6.13. Ejemplo de menú desplegable para asignación de condiciones de contorno 2D.

6.5.3. Visualización de resultados

GiD dispone de un gran abanico de posibilidades para visualizar los resultados en dos dimensiones. Para la visualización de un resultado (por ejemplo velocidad) existen las siguientes opciones:

1. Vectores. Se representa el módulo, dirección y sentido en forma de vector.
2. Contornos.
3. Contornos suavizados
4. Isolíneas
5. Rangos
6. Máximo y mínimo

Para las variables vectoriales, se puede escoger la visualización de una componente o del módulo. GiD tiene también la opción de producir animaciones con cualquier visualización.

Los resultados que se obtienen directamente de CARPA son calados y campos de velocidad, sin embargo, en el postproceso se pueden obtener otros resultados derivados de los anteriores. En este sentido, se ha incorporado la posibilidad de visualizar los resultados no como variables hidráulicas, sino según el criterio de riesgo asociado a una inundación utilizado por la Agència Catalana de l'Aigua (ACA 2003). Este criterio clasifica una inundación en un punto como de riesgo elevado, riesgo moderado o sin riesgo según el valor del calado, de la velocidad, y el producto de ambos.

Riesgo	Criterio
Elevado	$v > 1m/s$ o $y > 1m$ o $vy > 0.5m^2/s$
Moderado	$v > 0.4m/s$ o $y > 0.4m$ o $vy > 0.08m^2/s$
Sin riesgo	en caso contrario

Tabla 6.6. Criterios de riesgo de la Agència Catalana de l'Aigua.

Las distintas posibilidades de visualización e interpretación de resultados finalmente implementadas en GiD son:

1. Variables geométricas:
 - a. Cota del terreno
2. Variables hidráulicas
 - a. Calado
 - b. Velocidad
 - c. Caudal específico
 - d. Número de Froude
 - e. Cota de la lámina de agua
 - f. Coeficiente de rugosidad de Manning
3. Variables hidrológicas
 - a. Intensidad de precipitación
 - b. Tasa de infiltración
4. Variables de riesgo
 - a. Riesgo
 - b. Tiempo de inundación
5. Mapas de máximos
 - a. Calado
 - b. Velocidad
 - c. Caudal específico

Ejemplos de visualización de resultados se encuentran en los capítulos 7 y 8.

