

CAPITULO 3. INTRODUCCIÓN AL HEC-RAS. LIMITACIONES DEL MODELO.

1 INSTALACION Y LINKS INTERESANTES.

El programa Hec-Ras es un modelo hidráulico unidimensional creado por la USACE (United States Army Corps of Engineers), de libre distribución (a diferencia de otros softwares europeos), que se puede descargar directamente desde la web (free download):

– <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

La última versión disponible del programa es la HEC-RAS 4.2, aparecida en mayo del 2008 que ha subsanado los errores existentes en la versión anterior HEC-RAS 4.0, (2007). La versión 4.2 realiza algunas mejoras respecto a la versión HEC-RAS 3.1.3 (Mayo 2005), sobretodo la incorporación de nuevos módulos de cálculo de transporte de sedimentos y efectos de la temperatura en el flujo.

De la página web de la USACE puede ser descargada una serie de documentación indispensable y distintos materiales (en inglés), como son:

HEC-RAS User's Manual	Manual de uso del programa.
HEC-RAS Hydraulic Reference Manual	Descripción de algoritmos y conceptos hidráulicos utilizados por los programadores
HEC-RAS Applications Guide	Descripción de diversos ejemplos prácticos de aplicación.

La instalación de Hec-Ras es inmediata en el PC, y las nuevas versiones no invalidan las antiguas. No se han registrado incompatibilidades hacia atrás de las nuevas versiones con los proyectos antiguos. Cualquier incidencia sobre problemas de programación de las nuevas versiones puede ser reportada a hec.ras@usace.army.mil.

Otros productos muy interesantes de la USACE son:

HEC-HMS 3.0.1: Modelo hidrológico

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

HEC-GeoRAS 4: Aplicaciones de Hec-Ras para entornos GIS (ArcView)

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hec-georas.html>

HEC-GeoHMS 1.1 Aplicaciones de Hec-Hms para entornos GIS (ArcView)

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

Estos programas y aplicaciones son muy importantes para el trabajo ingenieril/fluvial actual, pero no se debe olvidar que únicamente son elementos complementarios (pre y post proceso) de los verdaderos motores de cálculo hidráulico (Hec-Ras) e hidrológico (Hec-Hms). Un conocimiento a fondo de estos últimos programas es indispensable para la resolución de problemas fluviales.

Otro programa libre, creado por GITS, para la delimitación de líneas de inundación (post-proceso) en proyectos Hec-Ras geo-referenciados es:

LAMINA

<http://www.gits.ws/03software/software.htm>

2 INICIANDO UN PROYECTO. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.

Un proyecto Hec-Ras tiene una estructura conceptual muy clara, que se traduce en una serie de archivos de datos y resultados muy definidos que cabe conocer para sacar todo el provecho a las posibilidades del programa.

Un estudio hidráulico consta de dos elementos fundamentales, que son por un lado la geometría del cauce, y por otra, las condiciones de flujo, definidas por el caudal y las condiciones de contorno. La combinación de distintas geometrías y condiciones de flujo provoca diferentes resultados, que pueden ser analizados por separado o conjuntamente. Esta es la filosofía de la estructura del proyecto Hec-Ras, donde un único proyecto puede contener multiplicidad de cálculos distintos.

Iniciamos el proyecto Hec-Ras asignando un nombre al proyecto (“filename”), que se mantendrá invariablemente para todos y cada uno de los ficheros generados posteriormente. También es muy importante definir las unidades o métrica utilizada (en Sistema Internacional, SI, en esta parte de Europa). Así, en el primer nivel se genera el archivo “**filename.prj**”, que contiene la información general de la estructura del proyecto (ficheros existentes y enlaces)

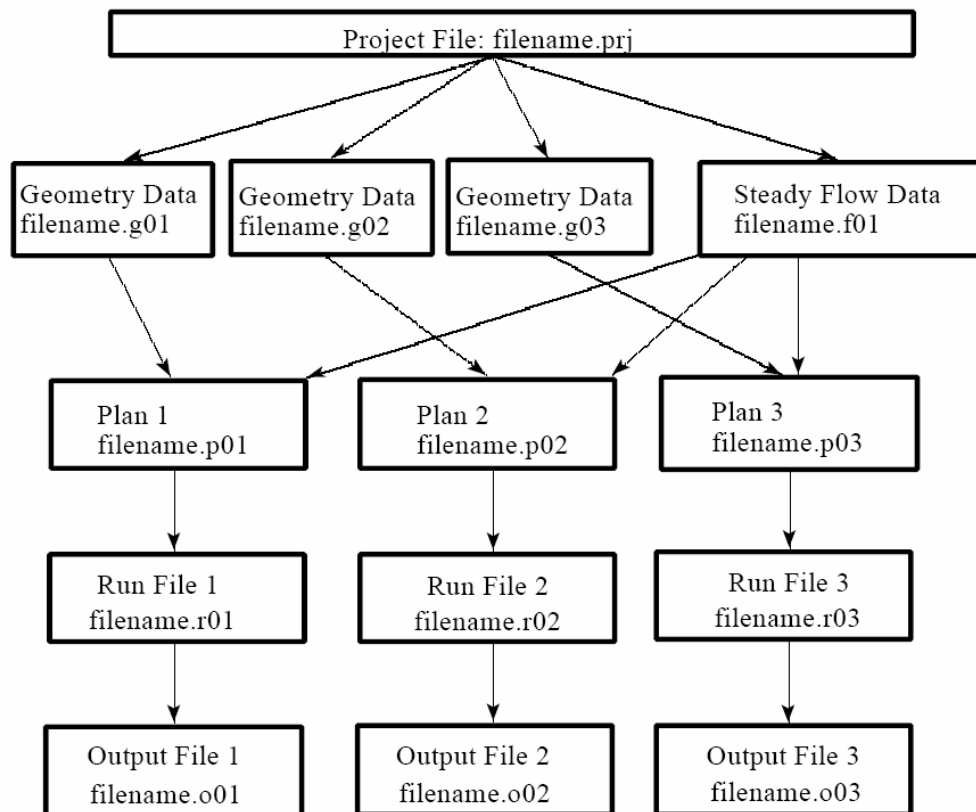


Figura 3.1. Estructura de un proyecto. Diagrama de flechas de relación entre los distintos archivos del programa (fuente: HEC-RAS Hydraulic Reference Manual)

El segundo nivel consiste en los ficheros correspondientes a los datos de geometría y condiciones de flujo:

Archivos de Geometría (.g)	Se denominan “ filename.g** ”, donde el atributo puede ir de .g01 hasta .g99 para cada una de las geometrías distintas e independientes almacenadas.
Archivos de Flujo (.f)	Se denominan “ filename.f** ”, donde el atributo puede ir de .f01 hasta .f99 para cada una de las condiciones de flujo distintas e independientes almacenadas.

En este punto se define toda combinación entre una Geometría $.g^i$ ($i=01$ a 99) y una condición de flujo $.f^j$ ($j=01$ a 99) como un Plan (.p). El archivo resultante es denominado “**filename.p****”, e incluye la información sobre la geometría $.g^i$ utilizada con el flujo $.f^j$ impuesto. Así, la numeración del atributo del Plan ($.p^k$) es independientes de i , j , y tan sólo depende del orden temporal en el que se creó. El archivo de Plan “**filename.p^k**”, con $k=01$ a 99 , estará asociado a los resultados hidráulicos y funciona como una unidad.

Archivos de Plan (.p)	El archivo “ filename.p** ” incluye la información sobre la geometría $.g$ utilizada con el flujo $.f$ impuesto.
------------------------------	---

Una vez realizada la simulación numérica del Plan “**filename.p^k**” en cuestión, los resultados hidráulicos son almacenados en dos archivos de nueva creación que son:

Archivos Run(.r)	El archivo “ filename.r^k ” contiene resultados que son editables (ASCII)
Archivos Output(.o)	El archivo “ filename.o^k ” contiene resultados que no son editables (Binario).

Por tanto, el cálculo hidráulico correspondiente al Plan k consta de 3 archivos, “**filename.p^k**”, “**filename.r^k**” y “**filename.o^k**”. La gran ventaja de este sistema de almacenamiento de resultados es que se pueden visualizar y comparar distintos Planes con mucha rapidez de manejo, dentro de un mismo proyecto.

En la Figura 3.1 se presenta un diagrama de flechas que describe la estructura del proyecto y la composición de los distintos Planes generados como combinación de 3 archivos de geometría y 1 de flujo. Como resultado, dentro del proyecto se generan 3 planes con sus archivos de resultados correspondientes.

En la Figura 3.2 se muestra la Ventana Principal de Hec-Ras con un proyecto generado, “**exemple1.prj**” que incluye un Plan (Plan 1) con su fichero de geometría y flujo asociados (Figura 3.3).

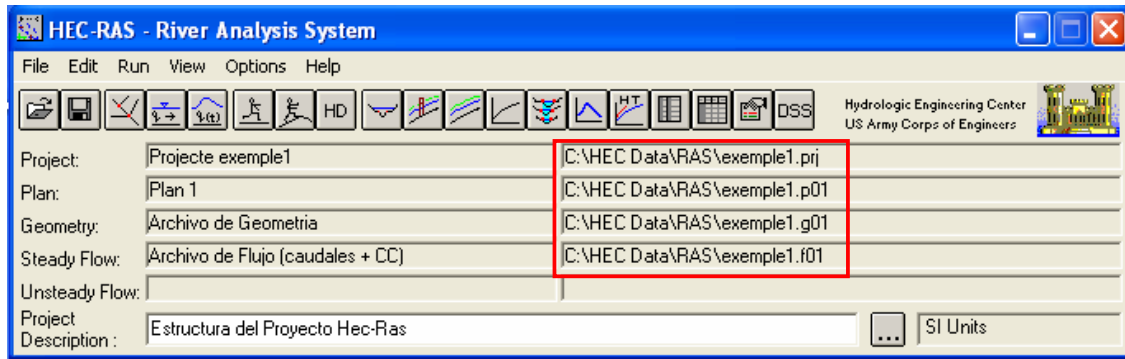


Figura 3.2. Ventana Principal donde se muestran los archivos de proyecto, de geometría, flujo y el archivo de Plan utilizado en ese momento.

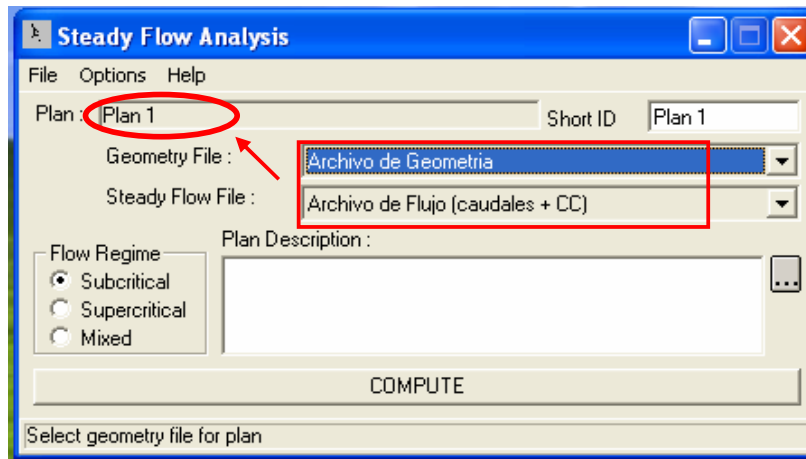


Figura 3.3. Ventana de cálculo donde aparece definido el Plan a calcular y los archivos de geometría y flujo asociados.

A pesar de que el objetivo de este capítulo no es la descripción minuciosa de todos y cada uno de los comandos del programa Hec-Ras, a modo de introducción se realiza una breve descripción de los botones principales que aparecen en la Ventana Principal del Programa, que servirá para tomar conciencia de las posibilidades de simulación y visualización de los resultados hidráulicos.

<i>Open Project</i>	Abre un proyecto existente a través del archivo “*.prj”.
<i>Save Project</i>	Guarda el proyecto actual con el mismo nombre asignado anteriormente.
<i>Geometric Data</i>	Abre la pantalla de Geometría, en la que podemos crear, modificar, combinar e importar geometrías procedentes de otros modelos. Existen una serie de menús de transformación de geometría, interpolación, asignación de rugosidades y otras propiedades para las secciones transversales.
<i>Steady Flow Data</i>	Introduce o edita las condiciones de flujo para el régimen permanente. Se introducen datos de caudal en las distintas

	secciones de los distintos perfiles. Se escogen además el tipo de condición de contorno a aplicar y su localización.
Unsteady Flow Data	Introduce o edita las condiciones de flujo para régimen no permanente o variable. La información requerida son las Condiciones de Contorno variables en el tiempo (caudal(t) y niveles(t)) en las localizaciones correspondientes, así como la condición inicial (caudal (t=0) y niveles(t=0)).

Save Project:
Guarda un proyecto existente

Steady Flow Data:
Introduce o edita las condiciones de flujo (caudal+CC) para el régimen permanente

Unsteady Flow Data:
Introduce o edita las condiciones de flujo caudal(t)+CC(t) para régimen no permanente o variable

Hydraulic Design Functions:
Cálculos Adicionales hidráulicos y de transporte de sedimentos (Extensiones)

Profiles:
Visualiza los perfiles longitudinales (lámina, Energía...)

Stage & flow Hydrographs:
Visualiza los hidrogramas y/o limnogramas en cada sección

Hydraulic Properties:
Tablas y dibujos de propiedades hidráulicas interesantes

XYZ perspectiva Plots:
Visualiza la lámina de agua en 3D

View DSS:
Visualiza la información contenida en formato DSS

Open Project:
Abre un proyecto existente

Steady Flow Analysis:
Cálculo en régimen permanente

Unsteady Flow Analysis:
Cálculo en régimen no permanente (variable en el tiempo)

Geometric Data:
Introduce o edita una Geometría existente

Cross Sections:
Visualiza las Secciones Transversales de Cálculo

Rating Curves:
Visualiza las curvas de Aforo de cada sección (calado-caudal)

Cross Table:
Resultados detallados de cada sección, puente, obra de paso o aliviadero

Warnings:
Resumen de los errores y avisos en el cálculo.

Profile Table:
Tabla Configurable de Resultados para cada perfil

Project: | Projekte exemple1 | C:\HEC Data\RAS\exemple1.pj
Plan: | Plan 1 | C:\HEC Data\RAS\exemple1.p01
Geometry: | Archivo de Geometría | C:\HEC Data\RAS\exemple1.g01
Steady Flow: | Archivo de Flujo (caudales + CC) | C:\HEC Data\RAS\exemple1.f01
Unsteady Flow:
Project Description: | Estructura del Proyecto Hec-Ras | SI Units

Figura 3.4. Ventana Principal de Hec-Ras y explicación de los botones principales.

<i>Steady Flow Analysis</i>	Cálculo en régimen permanente. Se genera y almacena el Plan correspondiente y se configuran los parámetros de cálculo.
<i>UnSteady Flow Analysis</i>	Cálculo en régimen no permanente (variable en el tiempo) donde se definen los parámetros de cálculo (pasos de tiempo,...) del método implícito.
<i>Hydraulic Design Functions</i>	Extensiones de nueva creación para diversos cálculos complementarios como: <ol style="list-style-type: none"> 1. Erosiones en puentes. 2. Cálculo en Uniforme. 3. Transporte de sedimentos. 4. Diseño estable de canales por distintos métodos.
<i>Cross Sections</i>	Visualiza las Secciones Transversales de Cálculo (niveles de agua, velocidades, Energía, estructuras,...)
<i>Profiles</i>	Visualiza los perfiles longitudinales, tanto de lámina de agua, energía y calados críticos, como una multitud de variables hidráulicas complementarias y derivadas, de fácil manejo.
<i>Rating Curves</i>	Permite visualizar las curvas de Aforo (calado-caudal) de cada una de las secciones.
<i>XYZ perspectiva Plots</i>	Este menú permite generar una vista dinámica de la geometría y la lámina de agua en 3D para cada perfil y Plan. Dada su potencia visual, permite una interpretación rápida de las “manchas de inundación”. Para el cálculo en no permanente, se genera un video de inundación.
<i>Stage and flow Hydrographs</i>	Visualiza los hidrogramas (Q(t)) y/o limnogramas (y(t)) en cada sección (sólo en el cálculo en no permanente).
<i>Hydraulic Properties</i>	Tablas y perfiles longitudinales de propiedades hidráulicas interesantes (Áreas y Conveyance), para los resultados provenientes del cálculo en régimen no permanente.
<i>Cross Table</i>	Resultados detallados de cada sección, puente, obra de paso o aliviadero
<i>Profile Table</i>	Tabla resumen de resultados de las distintas secciones para uno o varios perfiles. Esta Tabla es fácilmente configurable para las distintas variables calculadas, y exportable a entorno Windows.
<i>Warnings</i>	En este menú se muestra un listado de todos los errores, avisos y comentarios sobre la calidad del cálculo numérico (convergencias del modelo), sección por sección.

View DSS	Visualiza la información contenida en formato DSS (código de información hidrológica propia de la USACE).
-----------------	---

Dentro de los objetivos del presente curso, y debido en parte a las limitaciones de tiempo, se encuentra únicamente el cálculo y análisis de los regimenes permanentes (sin variaciones temporales). Las versiones 4.2 y 3.1.3 ofrecen la posibilidad de cálculos en régimen no permanente (variados), que serán introducidos, analizados y trabajados en posteriores ediciones del Curso (niveles más avanzados).

3 LIMITACIONES DEL MODELO HEC-RAS

El uso de un modelo numérico unidimensional como el Hec-Ras (que resuelve la ecuación de la energía) y todo su entorno complementario (pre y post-proceso en Arc-View) para la resolución de problemas hidráulicos y/o fluviales conlleva una responsabilidad importante en cuanto a la necesidad de conocer las limitaciones en su aplicación. Debemos entender como profesionales de la ingeniería hidráulica la absoluta necesidad de analizar con visión crítica los resultados numéricos ofrecidos por este tipo de modelos. Cualquier resultado calculado por Hec-Ras no es una solución real...tan sólo es un posible resultado. Se debe aplicar nuestro conocimiento de las leyes y principios hidráulicos para determinar la bondad del resultado.

A continuación se pasa a describir una serie de Ventajas y de inconvenientes que se deben tener en cuenta:

3.1 VENTAJAS:

- Un modelo unidimensional en energías permite el cálculo en dominios con escalas muy grandes, de modo que la simulación de kms de río se realiza con una velocidad de cálculo enorme (orden de segundos). Por tanto, la capacidad de repetición y corrección de un cálculo es muy alta.
- El uso de la ecuación de la energía para el balance entre secciones, dada la incertidumbre existente en la estimación de las pérdidas de carga (resistencia al flujo), es un método bastante aproximado en problemas de gran escala (fluviales). La simplificación del flujo turbulento tridimensional a un flujo unidimensional es relativamente aceptable para grandes escalas (ríos y barrancos) con precisiones poco exigentes.
- Gran libertad geométrica: Permite el análisis con secciones naturales no regulares (secciones fluviales: cauce principal y llanuras de inundación). Es una gran ventaja sobre otro tipo de modelos hidráulicos existentes (y mucho más rígidos).
- Facilidad de creación, modificación y edición de geometrías (entorno visual muy cómodo y rápido) e introducción de datos de rugosidad y estructuras transversales (puentes, obras de paso, aliviaderos). Gran comodidad de visualización de resultados y edición de figuras.

- Gran capacidad de importación y exportación de datos en entorno Windows (comunicación con Excel, Word, Autocad) para el post-proceso de resultados y presentación.
- Las nuevas tecnologías SIG (Sistemas de Información Geográfica), tipo Arc-View, permiten el proceso de grandes cartografías para generar la geometría del cauce con gran precisión, en formatos importables Hec-Ras (.geo). Asimismo, existen extensiones para el Post-proceso de láminas de inundación y mallas (“grids”) de inundación y velocidad.
- Uso extendido en todo el mundo y gran experiencia de uso. Hec-Ras es un modelo bien contrastado, herencia directa (y mejorada) del antiguo HEC-2 (1984) en MS-DOS.
- **ES GRATIS !!!!!!!**(sin licencia).

3.2 INCONVENIENTES Y LIMITACIONES.

- Hec-Ras no es un modelo turbulento. La ecuación de la energía supone siempre distribuciones hidrostáticas de presiones y la ecuación de fricción permanente de Manning. Por tanto, la solución es una pura simplificación, y no se ajusta a la realidad en casos donde las presiones y las tensiones turbulentas se alejan del modelo lineal.
- Hec-Ras no es un modelo 3D (x,y,z) ni 2D (x,y), sino que es un modelo 1D (x), de modo que la solución siempre es una aproximación o promedio de la real. Un ejemplo tan importante como la extensión del flujo por las llanuras de inundación para grandes avenidas es un fenómeno que Hec-Ras no puede evaluar, en principio. La posibilidad de dividir la sección en subsecciones lo convierte en un modelo quasi 2D muy débil pues no tiene en cuenta la transferencia lateral de momentum del flujo. La distribución lateral de velocidades no es correcta. En consecuencia, la solución de flujo en curvas (método de los Flowpaths) es tremendamente aproximada.
- Sólo se pueden modelar ríos y barrancos con pendientes menores de 10° ($\alpha < 10^\circ$, $S_o < 0.18$), ya que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua ($\cos \alpha$) en las ecuaciones.
- Ni saltos ni los obstáculos son reproducidos correctamente (Hec-Ras no realiza balance de fuerzas). Existen métodos para simular o reproducir dichos efectos, pero son altamente arbitrarios y dependen mucho del tipo de flujo.
- El resultado viene altamente condicionado por las consideraciones geométricas adoptadas (Trazado de secciones, Áreas Inefectivas, Leeves, Pérdidas de estrechamiento y expansión, etc...). Por tanto, el resultado sigue siendo bastante “manual” (bajo criterio del calculista)
- Problemas en la elección del calado crítico. Dificultad para hallar el calado crítico en secciones naturales complejas que contienen varios calados críticos (terrazas fluviales). Por defecto el programa escoge el de calado más bajo.
- Siempre ofrece por defecto una solución, es decir, Hec-ras no se cuelga nunca. En consecuencia, se debe ser crítico con el resultado numérico.

- Limitación en la convergencia de la energía a 40 iteraciones en cada sección de cálculo. Por defecto adopta el valor de calado de menor error.

4 COMENTARIOS SOBRE ENTORNOS GIS.

Una de las grandes ventajas del trabajo con entornos SIG (o GIS) es la de extraer directamente de la cartografía unos modelos de terreno que estén Georeferenciados, es decir, que cada una de la secciones transversales contenga sus propias coordenadas UTM (X_{utm}, Y_{utm}). Ello permite trabajar cómodamente con los resultados Hec-Ras y la Cartografía/Ortofotomapas/MDT, a nivel de identificación de zonas, posibles puntos críticos, etc.

5 EJEMPLOS DE ERRORES DE CÁLCULO DE HEC-RAS.

Si bien se acepta la fiabilidad del modelo Hec-Ras en modo general, aparecen errores muy básicos al someter el programa a condiciones de flujo cercanas al crítico con geometrías extremadamente simples y triviales. Las limitaciones en los algoritmos de convergencia de energía, que son de 1º orden, proporciona, en dichos casos soluciones diferentes para las mismas condiciones de flujo y geometría. Por ejemplo, se destacan los errores de este tipo que el programa comete en el cálculo de regimenes cercanos al calado crítico (y_c). Se han seleccionado 3 casos ilustrativos.

5.1 Caso (a): Dos posibles soluciones.

En condiciones de canal recto, largo y trapezoidal, de pendiente $S_o=0.003$ y $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ se calcula la curva de remanso, que evoluciona hacia el calado normal (y_n). Antes unas mismas condiciones de contorno del problema (aguas arriba y aguas abajo), y $n^\circ\text{Fr}$ entre 0.9 y 1.15, el valor del calado normal y_n calculado por Hec-ras depende de cómo se halla realizado el cálculo, y ambos los adopta como buenos (Figura 3.5). Si se calcula en régimen rápido, el valor de calado normal resulta con $\text{Fr}>1$, mientras que si lo calcula en régimen mixto, el valor de calado normal resulta con $\text{Fr}<1$.

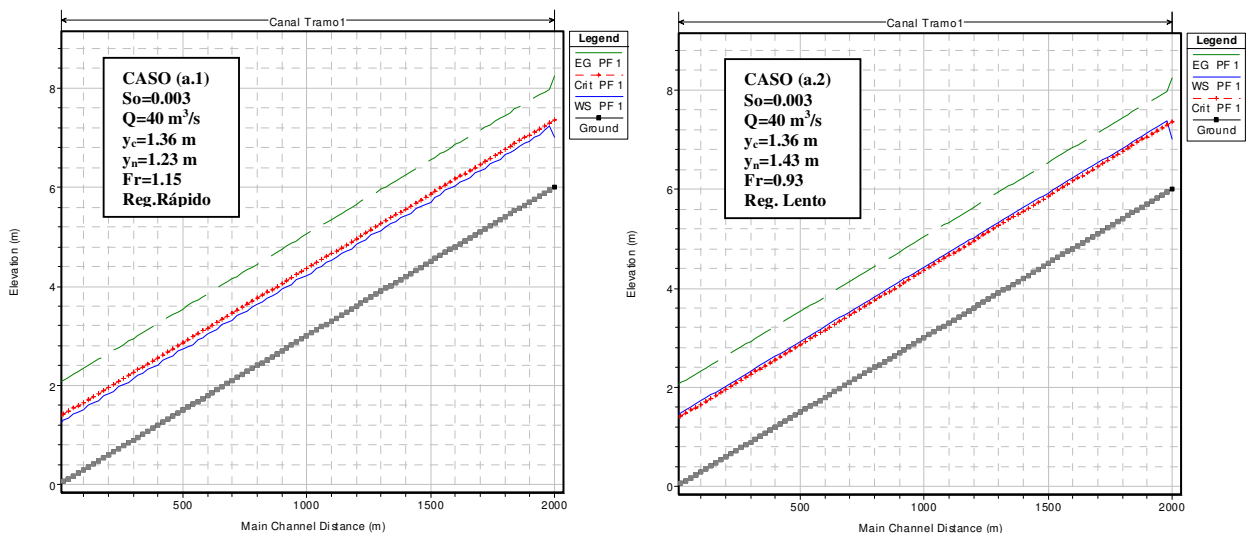


Figura 3.5. Caso (a). Validez de 2 calados normales distintos para el mismo canal y caudal.

5.2 Caso (b): Influencia de la distancia entre secciones.

En condiciones de canal recto, largo y rectangular, de pendiente $S_0=0.01065$ y $q=20 \text{ m}^2/\text{s}$ se calcula la curva de remanso que evoluciona hacia el calado normal (y_n). El Fr teórico es de $Fr=1.47$, el y_c teórico de $y_c=3.43 \text{ m}$ y el normal $y_n=2.66 \text{ m}$. Como se aprecia en la Figura 3.6, los 3 cálculos con interdistancias Δx de 20, 10 y 5 m entre secciones interpolación) ofrecen soluciones diferentes. Los balances de energía convergen de forma distinta para distintas Δx , y es la solución de menor $\Delta x (= 5 \text{ m})$ la que ofrece el único resultado correcto. El método de resolución de Newton-Raphson tiene problemas graves de convergencia con Fr cercanos al crítico (gradientes de energía específica $E(y)$ cercanos a cero).

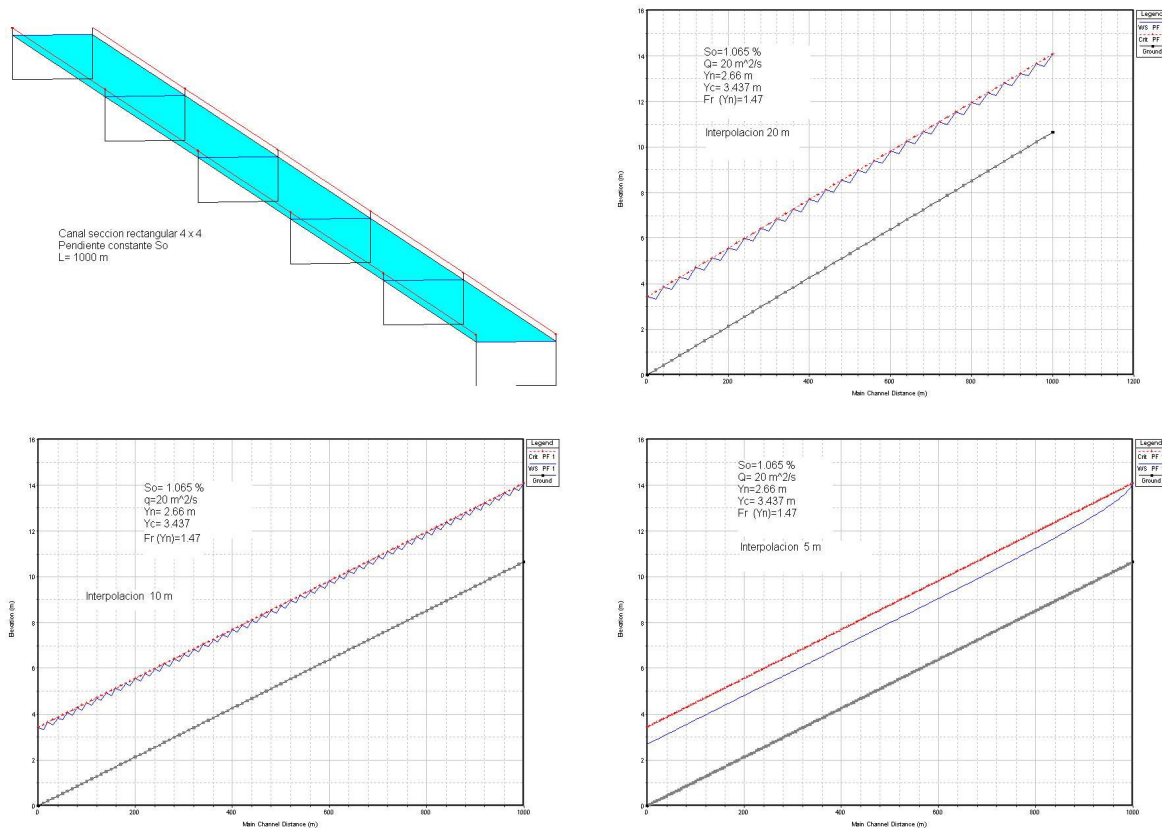


Figura 3.6. Caso (b). Influencia de la distancia entre secciones en el resultado numérico (problemas de convergencia con Fr cercanos a $Fr=1$).

5.3 Caso (c): Influencia de la distancia entre secciones.

En condiciones de canal recto, largo y rectangular, de pendiente $S_0=0.0065$ y $q=20 \text{ m}^2/\text{s}$ se calcula la curva de remanso que evoluciona hacia el calado normal (y_n). El Fr teórico es de $Fr=1.12$, el y_c teórico de $y_c=3.43 \text{ m}$ y el normal $y_n=3.22 \text{ m}$. De la Figura 3.7 se desprende que tan sólo una interpolación igual o menor de $\Delta x=1 \text{ m}$ permite una correcta convergencia de la energía y un resultado válido.

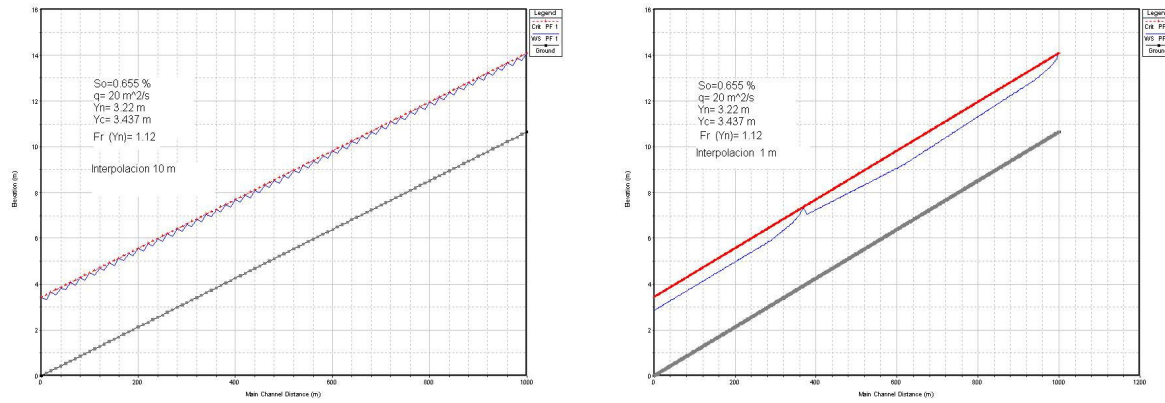


Figura 3.7. Caso (c). Influencia de la distancia entre secciones en el resultado numérico (problemas de convergencia con Fr cercanos a $Fr=1$).

6 ANÁLISIS NUMÉRICO DE ERRORES

Para ciertos cálculos en canales rectos de secciones sencillas, el programa HEC-RAS parece incapaz de dar soluciones correctas a problemas simples. El ejemplo con el que se va a tratar consiste en una canal de sección rectangular de 10 metros de ancho con una pendiente del 4 por mil, la rugosidad de Manning es de 0.02, el caudal total es de $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Con estas características se trata de un canal de tipo M, el calado crítico y_c es de 2.16 metros y el calado normal y_n de 2.28 metros (estos cálculos se realizan con la hipótesis de canal suficientemente ancho con lo que $R_h = h$).

La solución del problema consiste en un canal en régimen normal con un Froude de 0.92. En el caso de calcular en régimen mixto se obtiene la solución deseada. Las condiciones de contorno son un calado rápido aguas arriba y un calado lento aguas abajo. De esta manera se debe formar un resalto en la parte alta del canal.

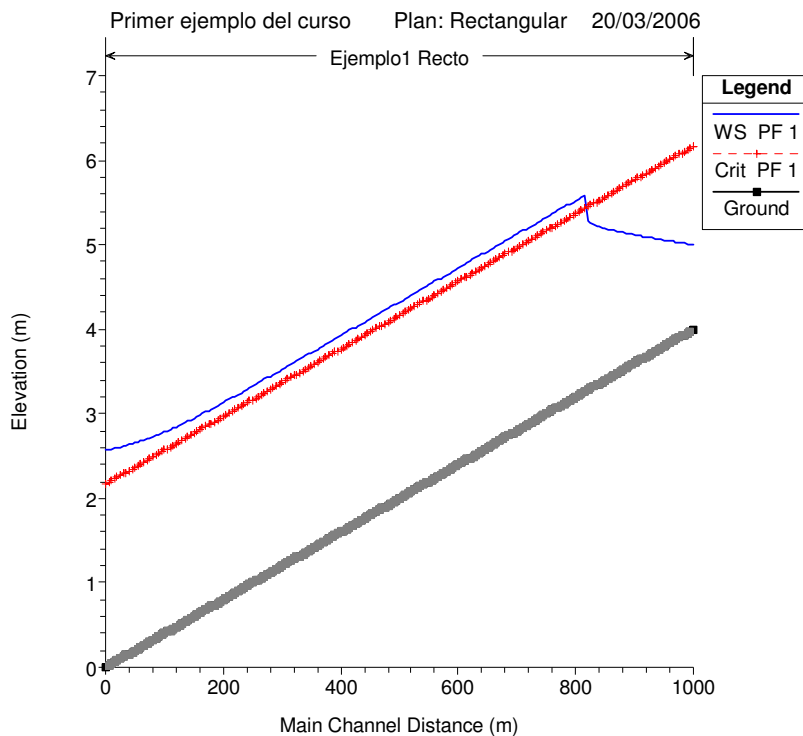


Figura 3.8. Resolución del canal tipo M en modo Mixed

Se observa en la figura 3.8 que efectivamente se ha formado un resalto en la parte alta del canal. Por otra parte si ahora se impone que la solución debería ser en régimen rápido (Supercrítico) el modelo debería dar un resultado tal que toda la solución en rápido fuese al crítico. Sin embargo, la solución del cálculo en régimen rápido que se obtiene aparece en la Figura 3.9.

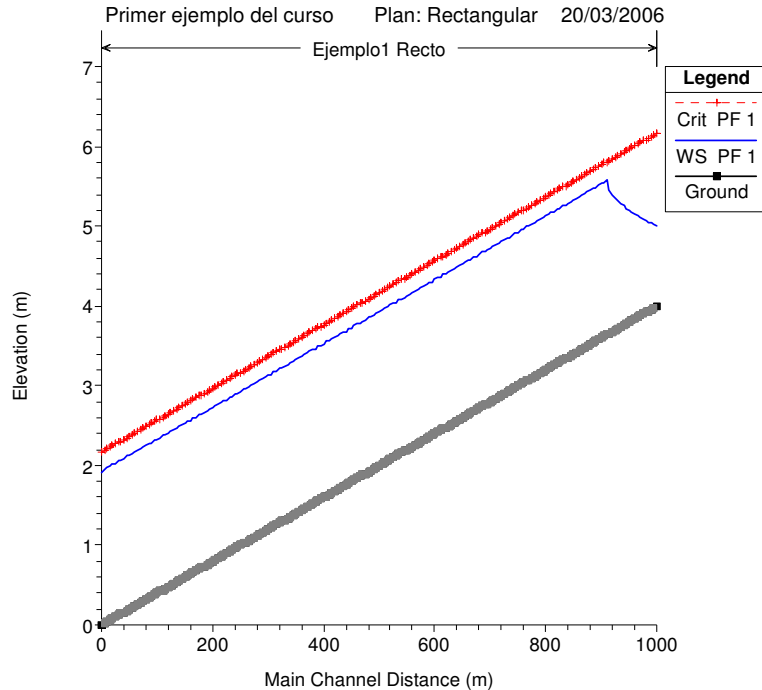


Figura 3.9. Resolución del canal tipo M en modo Supercrítico (rápido)

Es decir, el programa devuelve una solución válida de Froude constante de valor 1.2 como si se tratase de un régimen normal en régimen rápido, es decir de un canal de tipo S. En el caso de que esta solución errónea tenga mayor fuerza específica que la solución correcta en régimen lento el programa dará este resultado que es totalmente equivocado.

Para resolver el *Step Method*, HEC-RAS utiliza un método numérico propio basado en el método de la secante, sin embargo realiza algunas modificaciones para garantizar la estabilidad. Así, cuando la diferencia entre el error en la ecuación de energía de dos iteraciones consecutivas es menor que 0.01, pasa a un método de sustitución sucesiva, que es más lento pero más estable cerca de puntos críticos.

Una posible causa de la anomalía podría ser que en el caso en el que estamos, el método no convergiese, o que de hacerlo no convergiese hacia el calado crítico sino hacia un valor erróneo que finalmente queda como un falso “régimen normal”.

Para realizar la pertinente comprobación numérica, se implementa un EXCEL con el algoritmo HEC-RAS y se introduce el calado de 1.8 metros que el programa está dando como falso “normal” en régimen rápido.

En la Tabla 3.1 se puede ver que el algoritmo sí converge, y que lo hace a un valor de 1.93 metros, es decir realmente el algoritmo funciona correctamente y converge hacia un calado más cercano al crítico. Es decir, en ningún caso parece que caiga en un falso “normal” en rápido sino que se va hacia el crítico, señal inequívoca de que no existe solución en rápido.

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados de unas cuantas iteraciones con el algoritmo HEC-RAS, h1 es el calado en la sección aguas arriba y vemos como el calado en la sección h2 converge hacia 1.93 m, es decir se acerca al crítico como debería ser:

Delta X	q	h1	S0	V1	n	Sf1	E1
20	10	1.8	0.004	5.55555556	0.025	0.00880991	3.45309875

Delta X	q	h2	V2	n	Sf2	E2
20	10	1.5	6.66666667	0.025	0.01617742	3.7652622
20	10	1.10657427	9.03689904	0.025	0.04459417	5.26893637
20	10	1.36512698	7.32532586	0.025	0.0221464	4.10011164
20	10	1.54263714	6.48240585	0.025	0.01473446	3.6844101
20	10	1.71178823	5.84184412	0.025	0.01041629	3.45119408
20	10	1.82828402	5.46960968	0.025	0.00836375	3.35308678
20	10	1.89871674	5.26671504	0.025	0.0073736	3.31249285
20	10	1.92832792	5.18583996	0.025	0.00700289	3.29901784
20	10	1.93530255	5.16715075	0.025	0.00691911	3.29613062
20	10	1.93560414	5.16634563	0.025	0.00691552	3.29600818
20	10	1.93576007	5.16592946	0.025	0.00691366	3.29594495
20	10	1.93583821	5.16572096	0.025	0.00691273	3.29591328
20	10	1.93587732	5.1656166	0.025	0.00691227	3.29589744
20	10	1.93589688	5.16556439	0.025	0.00691204	3.29588952
20	10	1.93590667	5.16553828	0.025	0.00691192	3.29588555
20	10	1.93591156	5.16552522	0.025	0.00691186	3.29588357
20	10	1.93591401	5.1655187	0.025	0.00691183	3.29588258
20	10	1.93591523	5.16551543	0.025	0.00691182	3.29588208
20	10	1.93591584	5.1655138	0.025	0.00691181	3.29588184
20	10	1.93591615	5.16551298	0.025	0.00691181	3.29588171
20	10	1.9359163	5.16551257	0.025	0.0069118	3.29588165
20	10	1.93591638	5.16551237	0.025	0.0069118	3.29588162
20	10	1.93591642	5.16551227	0.025	0.0069118	3.2958816

Tabla 3.1. Resultado de la iteración entre dos secciones mediante algoritmo HecRas.

El hecho de que converja más o menos rápido hacia el calado crítico depende de la discretización, en este caso es de Delta X=20 metros. En la Figura 3.10 se observa una gráfica con la función de error (Error) y los sucesivos valores de h2 ofrecidos por el algoritmo.

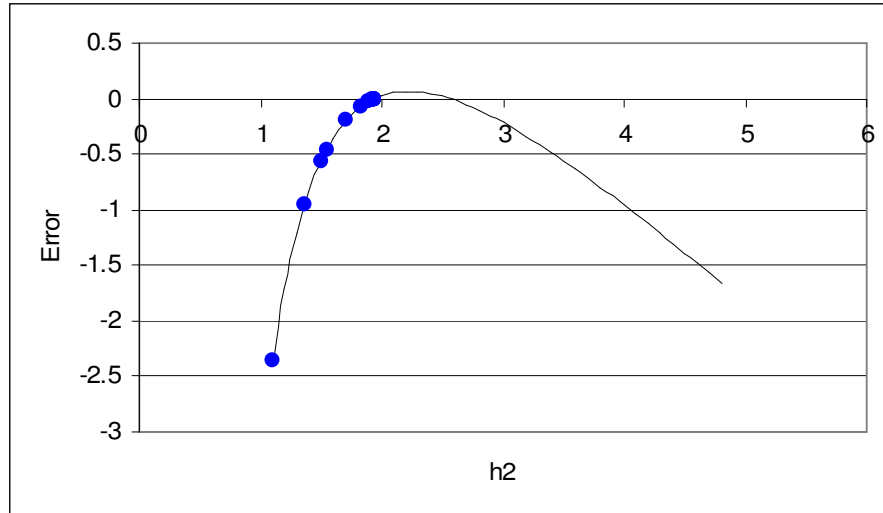


Figura 3.10. Evolución de las iteraciones de h2 según el algoritmo Hec-Ras.

Se comprueba que realmente converge. Por todo ello resulta extraño que el programa no converja correctamente y siga dando como resultado 1.8 metros, como si se tratase de un calado normal.

Si se observa el *log* generado por HEC-RAS para una sección cualquiera obtenemos lo siguiente (las unidades son pies, ya que el módulo de calculo funciona en estas unidades):

At river station 500.*

```

**** CRITWS ****          DETERMINE CRITICAL WSEL
NTRY  IPAR  WSEL  EGC  WSEL1  EG1  EG2  HTINC  X  Y
2     2     13.681 17.231 13.681 17.296 17.32 0.3554 0.01 0.0006
3     3     14.036 17.257 13.681 17.231 17.32 0.3554 0.01 0.0006
4     4     14.392 17.326 13.681 17.231 17.257 0.3554 0.01 0.0006
5     5     13.649 17.231 13.681 17.231 17.257 0.391 0.01 10.1265
6     6     13.671 17.231 13.681 17.231 17.257 0.391 0.01 0.0006
6     2     13.671 17.231 13.671 17.231 17.257 0.391 0.01 0.0006
7     3     14.026 17.255 13.671 17.231 17.257 0.355 0.01 0.0006
8     4     14.381 17.324 13.671 17.231 17.255 0.355 0.01 0.0006
9     5     13.651 17.231 13.671 17.231 17.255 0.3905 0.01 10.1217
10    6     13.665 17.231 13.671 17.231 17.255 0.3905 0.01 0.0006
11    7     13.67  17.231 13.671 17.231 17.255 0.3905 0.01 0.0006
12    8     13.671 17.231 13.671 17.231 17.255 0.3905 0.01 0.0006
    
```

PARABOLIC METHOD CONVERGED

FINAL CRITICAL WATER SURFACE = 13.67 DID IT CONVERGE? T

Por lo tanto el valor del calado crítico es el correcto, sin embargo en la parte en la que itera sobre la ecuación de la energía, se puede ver cómo el error mínimo no aparece para un valor más cercano al calado crítico ($y_c=13.67$), sino para un valor alejado de este; es decir, el programa encuentra una clase de régimen normal en rápido que es incorrecto ($y=12.82$):

**** STD_REAL **** PERFORM STANDARD STEP BETWEEN TWO CROSS SECTIONS										
I	ASSUMED	CALC	ERROR	EG	HL	FL	F_SLOPE	K	A	WP
0	12.87	12.82	0.0497	17.39	0.1147	0.1147	0.00699	42237	206.9	45.4
1	12.83	12.76	0.0712	17.41	0.1207	0.1156	0.00705	41892	205.7	45.4
2	12.95	12.9	0.0487	17.36	0.1465	0.1125	0.00686	43036	209.5	45.6
3	13.2	13.13	0.064	17.28	0.2376	0.1062	0.00647	45538	217.7	46.1
4	12.15	11.45	0.7085	17.91	0.2589	0.136	0.00829	35320	183.5	44
5	13.49	13.37	0.1123	17.24	0.3309	0.0994	0.00606	48482	227.2	46.7
6	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
7	13.03	12.98	0.0509	17.33	0.1791	0.1103	0.00672	43894	212.3	45.8
8	12.73	12.59	0.1392	17.46	0.1386	0.1184	0.00722	40893	202.4	45.1
9	13.21	13.14	0.0653	17.28	0.2414	0.1059	0.00646	45651	218.1	46.1
10	13.63	13.48	0.1469	17.23	0.3728	0.0963	0.00587	49957	231.8	46.9
11	12.87	12.82	0.0495	17.39	0.1164	0.1146	0.00698	42280	207	45.4
12	12.49	12.15	0.3398	17.61	0.1855	0.1255	0.00765	38505	194.4	44.7
13	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
14	13.33	13.24	0.0817	17.26	0.2805	0.1031	0.00629	46839	221.9	46.3
15	12.96	12.91	0.0488	17.36	0.1499	0.1123	0.00685	43125	209.8	45.6
16	12.41	12	0.4138	17.67	0.2013	0.1278	0.00779	37769	191.9	44.5
17	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
18	12.97	12.92	0.0489	17.35	0.1548	0.112	0.00683	43252	210.2	45.6
19	12.66	12.46	0.1957	17.5	0.1526	0.1206	0.00735	40149	199.9	45
20	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
21	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
22	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
23	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47
24	13.67	13.51	0.1583	17.23	0.3846	0.0954	0.00581	50394	233.2	47

Estudiando las posibles causas de que el hecho de minimizar el error en la ecuación de la energía para este caso no converja al régimen crítico, aparece como única causa posible la incorporación al balance de energía de las pérdidas por contracción-expansión. Estas pérdidas son aplicadas siempre que existe una diferencia de velocidades entre secciones, independientemente de que exista o no cambios de anchura de la sección. Por lo tanto, se comprueba que al eliminar estas pérdidas (situando sus valores en 0.0/0.0) se obtiene la solución correcta, tal como se muestra en la Figura 3.11

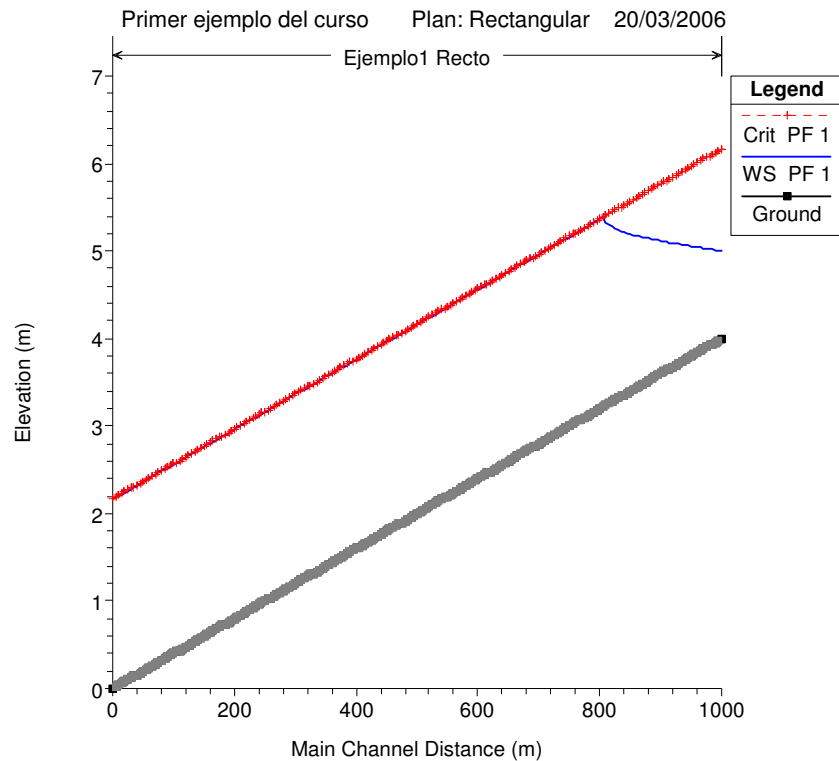


Figura 3.11. Resolución del canal tipo M en modo Supercrítico (rápido), pero con pérdidas por contracción-expansión=0.0

Se comprueba como ahora la solución es la correcta, pues en cada sección la solución converge al crítico, sin crear el falso régimen normal en régimen rápido.

Evidentemente las pérdidas por contracción expansión modifican las curvas de remanso. Por lo tanto en los casos como los colectores, canales y otros elementos de sección constante se deberían eliminar por completo en el cálculo ya que únicamente están pensadas para modelar pérdidas por ensanchamiento/contracción de la sección.