



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL MULTIFÁSICA DEL RÍO GUADALQUIVIR DURANTE CRECIDAS EXTREMAS EN TRAMOS TIPO CAÑÓN

Alumno: Álvaro Aranda Ochando

Tutor: Prof. D. Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Simulación tridimensional multifásica del río Guadalquivir durante crecidas extremas en tramos tipo cañón, que presenta Álvaro Aranda Ochando, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Agosto de 2016

El alumno:

Álvaro Aranda Ochando

El tutor:

Patricio Bohórquez Rodríguez de Medina

Índice

1. Introducción y motivación	4
2. Antecedentes.....	5
3. Sistema operativo usado para el proyecto y software de simulación	9
3.1. Sistema operativo: Lubuntu	9
3.2. Software CFD: OpenFOAM	11
CFD.....	11
Software.....	11
3.3. Capacidades de OpenFOAM para este tipo de problemas	12
4. Descripción de datos de entrada disponible	15
4.1. Precipitaciones y caudales.....	15
4.2. Análisis de la rugosidad del terreno	22
4.3. Análisis del modelo digital de elevaciones	22
5. Pre-procesado: Mallado.....	24
5.1. Interfaz de mallado: HELYX-OS.....	25
5.2. Creación de la malla	25
5.3. Análisis de la malla	33
6. Procesado	36
6.1. Modelo y ecuaciones.....	36
Modelos RANS	36
Ecuaciones generales para problemas multifásicos tridimensionales	39
Modelo SST k- ω : Ecuaciones de turbulencia	39
6.2. Condiciones de contorno.....	41
6.3. Esquemas numéricos y control de la discretización.....	45
7. Post-procesado:	48
7.1. Preparación previa.....	50
7.2. Análisis de resultados	54
Velocidades	55
Calado	68
Líneas de corriente	72
Presiones.....	76
8. Apéndice I: Movimiento circular del río	82
Ecuación de la dinámica del movimiento circular.....	82
Análisis desde sistema de referencia no inercial.....	83

1. Introducción y motivación

En este primer apartado, se introducirán los diferentes aspectos de los que consta el trabajo tales como objetivos, metodología y procedimientos para obtener los resultados. Además, se hablará sobre la motivación que ha llevado a realizar este tipo de trabajo y la finalidad del mismo.

En el siguiente trabajo teórico-experimental se van a considerar sofisticadas y complejas técnicas de simulación numérica tridimensional con superficie con el fin de simular el flujo de un río durante crecidas extremas. Más en concreto, se estudiarán tanto las componentes primarias (movimiento longitudinal) como las secundarias (velocidades en la sección transversal). Como caso de estudio, nos situaremos en un tramo del río Guadalquivir. El tramo elegido será el situado aguas abajo de la presa de Marmolejo, municipio de la provincia de Jaén, focalizando en el primer meandro o codo tras la presa, donde se podrán sacar resultados concluyentes sobre los fenómenos que provoca el cauce del río durante estas crecidas extremas. Tal zona resulta de especial interés puesto que el flujo del río durante crecidas producidas en el pasado ha producido importantes destrozos en la zona. Por tanto, analizando esta zona, podremos sacar conclusiones más concretas sobre los motivos de estos destrozos. Se estudiarán diferentes casos, correspondientes a las diferentes inundaciones producidas en las últimas décadas. Para ello se variará el caudal, simulando así las condiciones de cada una de las crecidas.

En cuanto a los objetivos, se tiene como principal el análisis de la susceptibilidad de la aplicación de este tipo de sofisticadas técnicas de simulación numérica a problemas de gran escala, ya que tradicionalmente tan sólo han sido empleados para problemas a menor escala, es decir, en escala de laboratorio.

Para ello, se tendrá que hacer frente a diferentes retos. Primeramente, el mallado de geometrías tipo cañón como lo son las de los cauces de los ríos, para posteriormente realizar la simulación del flujo durante las ya citadas crecidas del caudal.

Hasta ahora, problemas de este tipo han sido analizados solamente por medio de simulaciones bidimensionales, ya que, se considera que con este tipo de simulación se extraían unos resultados suficientemente concluyentes sin tener que dedicar un tiempo excesivo a la resolución.

De tal manera, se estudiará la viabilidad del uso de modelos tridimensionales multifásicos en la resolución de problemas de este tipo con respecto a los modelos bidimensionales promediados en altura, que han sido usados hasta ahora. Se analizará esta viabilidad en materia de exactitud de los resultados, tiempo invertido en la resolución y resultados adicionales obtenidos por medio de este modelo tridimensional.

En cuanto a la metodología a desarrollar, serán considerados los siguientes pasos:

- Primeramente, se analizará un modelo digital de elevaciones apropiado para recabar datos que permitan el mallado del cauce.
- A continuación, se generará la malla tridimensional que se usará en la posterior simulación.
- Posteriormente se simulará el problema por medio de un software de CFD (en este caso 'OpenFOAM') para diferentes caudales, como ya se indicó anteriormente, y asumiendo condiciones de presión no hidrostática.
- Los resultados de las simulaciones serán post-procesados (usando la interfaz ParaView) generando diversas gráficas, mapas de isocontornos, líneas de corriente, etc.
- Finalmente, estos resultados se compararán con datos disponibles o modelos simplificados extrayendo las conclusiones pertinentes.

2. Antecedentes

Nos situamos en la zona del río Guadalquivir a su paso por la presa del municipio de Marmolejo (Jaén). Esta zona se caracteriza por ser un lugar donde se producen numerosas inundaciones, las cuales han provocado daños materiales de relativa importancia en las últimas décadas, en especial, daños al cultivo, principalmente al olivo, cultivo predominante en la zona. Durante épocas

de lluvias abundantes, el caudal del río Guadalquivir aumenta considerablemente, provocando así, que en zonas adyacentes al cauce a lo largo de todo el río se produzcan numerosas inundaciones. Estas inundaciones son especialmente dañinas en la zona de Marmolejo (Jaén), donde la gran acumulación de sedimentos provoca cortes en caminos y daños en la vegetación, así como a edificios públicos de importancia situados en las zonas adyacentes al cauce.

A continuación, se presentan una serie de imágenes, extraídas del IGN (Instituto Geográfico Nacional) donde podremos analizar con más detalle los problemas producidos en la zona objeto de estudio. Estas imágenes corresponden a los años 2007 y 2013, respectivamente.

Si comparamos ambas imágenes, saltan rápidamente a la vista las diferencias entre una y otra. Fijándonos en la fotografía del año 2007, se aprecia que existe una gran cantidad de vegetación en las márgenes del río. Sin embargo, si pasamos ahora a la fotografía del año 2013, vemos que la imagen cambia completamente. La densa vegetación existente en años anteriores en las inmediaciones del cauce ha desaparecido casi al completo, y en su lugar vemos una cantidad inmensa de sedimentos que han enterrado gran parte de esta vegetación. Como resulta obvio, la primera imagen fue tomada en un periodo de tiempo donde no se registraron inundaciones en la zona, cosa que no ocurre en la segunda imagen, donde la gran cantidad de sedimentos dan a entender el aumento de caudal producido ese año a causa de las intensas precipitaciones, y su consecuente inundación, que llegó a ocupar toda la parte donde ahora vemos los sedimentos.



Imagen 2.1. Vista aérea de la zona año 2007. [1]



Imagen 2.2. Vista aérea de la zona año 2013. [1]

En estas dos fotografías se puede comparar con mayor detalle, gracias a un plano más ampliado, los daños provocados por las inundaciones en el año 2013 en comparación al 2007 cuando no se produjo inundación alguna. Destacar que, debido a estas continuas crecidas de caudal e inundaciones, se ha producido la desaparición de las primeras líneas de olivos en uno de los márgenes del río debido a que han sido enterrados también por la gran cantidad de sedimentos arrastrados en las inundaciones.

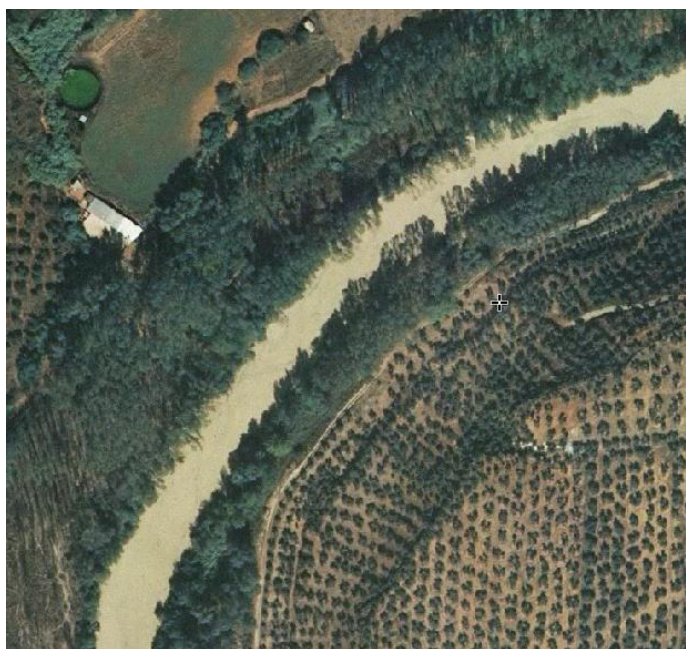


Imagen 2.3. Detalle imagen 2.1. [1]

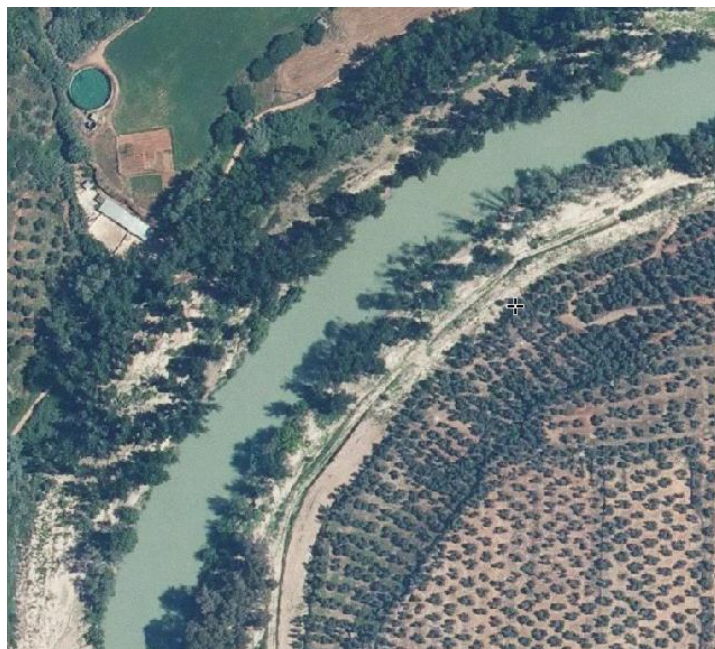


Imagen 2.4. Detalle imagen 2.2. [1]

Visto esto y puesto ahora en antecedentes, queda claro el objeto de este trabajo, en el cual se simulará el cauce del río cuando se producen los aumentos de caudal. Así podremos ver a que son debidos los daños es las mismas a partir de analizar el flujo del río (velocidades y calado).

3. Sistema operativo usado para el proyecto y software de simulación

Antes de nada, comenzaremos introduciendo los recursos utilizados para la resolución del problema propuesto. Entre ellos podemos incluir sistema operativo, software, etc. A continuación, se realizará una descripción de los mismos, incluyendo las competencias de cada uno, así como su metodología de trabajo.

3.1. Sistema operativo: Lubuntu

El problema de simulación que vamos a abordar requiere de un sistema operativo que sea compatible con un software CFD (Computational Fluid Dynamics) adecuado para el problema. El sistema Lubuntu ofrecido por Linux, constituye una opción ideal para abordar nuestro problema.



Lubuntu es una distribución oficial del proyecto Ubuntu, que es un sistema operativo basado en GNU/Linux y que se distribuye como software libre (licencia libre o de código abierto). Su objetivo es crear un sistema operativo que minimice los recursos necesarios para su funcionamiento en un equipo informático. Por ello no es de extrañar que su propio lema sea: "ligero, rápido, más fácil".

Lubuntu se puede usar perfectamente en equipos donde se quiera mejorar el rendimiento a costa de simplificar el entorno gráfico, lo cual es otro punto a favor a la hora de escogerlo en detrimento de Windows. [2]

OpenFOAM (Software CFD utilizado para la simulación), pone a disposición una versión de Ubuntu especial para trabajos CFD, que viene incorporada con OpenFOAM, además de diferentes interfaces gráficas (HELYX-OS, ParaView, etc.) que facilitan las tareas de pre, pro y post-procesado del todo el proceso de simulación. Aunque este software está disponible tanto para Microsoft Windows como para Linux, existe una gran apreciación que hace que nos decantemos claramente por la versión de Linux. Esta es que para Windows este software tiene una serie de restricciones a la hora de realizar las simulaciones, ya que se limitan el número de celdillas que puede tener la malla. Sin embargo, en la versión para Linux no existe tal restricción.

Como acabamos de decir, la versión instalada de Ubuntu para realizar el trabajo contiene interfaces gráficas que facilitan la tarea. No obstante, todas estas tareas pueden ser realizadas también desde la línea de comandos, que además permite la utilización de un mayor rango de funciones no presentes en las interfaces. Por tanto, a lo largo del trabajo, tendremos que hacer numerosas veces uso de esta pantalla de comandos regida por un tipo de lenguaje denominado Python.

Python



Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible.

Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma.

Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License, que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores. [3]

3.2. Software CFD: OpenFOAM

Para la resolución del problema usaremos un software que nos permitirá llevar a cabo todos los procesos del mismo. Este software estará basado naturalmente en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

CFD

Definimos Dinámica de fluidos computacional como una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. El método consiste en discretizar una región del espacio creando lo que se conoce por una malla espacial, dividiendo una región del espacio en pequeños volúmenes de control. Después se resuelve en cada uno de ellos las ecuaciones de conservación discretizadas, de forma que en realidad se resuelve una matriz algebraica en cada celda de forma iterativa hasta que el residuo es suficientemente pequeño.[4]

Software

En cuanto al software usado para todo el proceso de la simulación, tanto para mallado como para el posterior cálculo y post-procesado, será OpenFOAM, ya que es un software de garantías, además de gratuito.



OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) es una biblioteca C++ para personalizar y extender resolvers numéricos de problemas de Mecánica de medios continuos, incluyendo Mecánica de fluidos computacional (CFD). Sin embargo, incluye también una gran cantidad de resolvers aplicables a otros muchos tipos de problemas. [5]

3.3. Capacidades de OpenFOAM para este tipo de problemas

El flujo sobre estructuras hidráulicas de ríos naturales es un problema que está caracterizado por altas turbulencias y flujos tridimensionales que lo hacen difícil de estudiar. Para este tipo de flujos, resulta difícil calcular perfiles en la superficie del agua, estructuras turbulentas, así como corrientes secundarias. Así, simular los continuamente variantes campos de flujos es aún un importante componente y área activa de investigación. Por tanto, el desarrollo de modelos numéricos para simulaciones específicas de flujos turbulentos tridimensionales en canales naturales o ríos sobre diferentes estructuras construidas por el hombre como, aliviaderos, presas, etc. están aún en pleno desarrollo y se están investigando sus posibilidades y sus métodos por diferentes autores.

Aunque en nuestro caso no se está analizando el flujo sobre ninguna estructura hidráulica construida por el hombre, puede ser de gran utilidad estudiar nuestro problema del flujo sobre el codo desde un mismo punto de vista, analizando los fenómenos turbulentos y la tridimensionalidad del problema.

Para ello, nos basaremos en un artículo publicado por ELSEVIER donde se analiza las competencias de este tipo de plataformas en la resolución de problemas de este tipo. En concreto se analiza para un salto hidráulico a bajos números de Reynolds.

Así, vamos a sacar conclusiones sobre las capacidades que una plataforma de datos para problemas CFD, como es OpenFOAM, podría ofrecernos en la resolución de problemas tridimensionales con flujos altamente turbulentos.

Numerosos autores a lo largo de las últimas décadas han focalizado sus investigaciones en la resolución de este tipo de problemas llegando a conseguir resultados precisos. Entre los métodos y fuentes usados se encuentran diferentes plataformas, de las cuales OpenFOAM se sitúa en la vanguardia. Algunos autores prefieren modelos unidimensionales y bidimensionales en problemas para estudiar el comportamiento de ríos y sus fenómenos de sedimentación. Sin embargo, la estructura de estos problemas, como hemos comentado, tiende a ser altamente tridimensional, por lo que modelos tridimensionales en muchos casos son necesarios.

Uno de los aspectos clave de los modelos CFD es la manera en que la turbulencia es tratada. Las variaciones de presión y velocidad pueden ser numéricamente resueltas en sus más bajas escalas (DNS o Direct Numerical Simulation), siempre y cuando la malla sea lo suficientemente fina. Sin embargo, esta aproximación es todavía inabordable en términos de coste computacional para cualquier aplicación ingenieril. Los métodos LES (Large Eddy Simulation) ofrecen precisión para flujos multifásicos a un bajo coste computacional, aunque sigue siendo inabordable para la mayoría de aplicaciones en la ingeniería. Por tanto, el método más ampliamente usado en ingeniería es el RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). Los modelos de este tipo están basados en promediar las ecuaciones de flujo generando así las ecuaciones promediadas RANS. Para estos modelos se necesitan hipótesis adicionales, que son comúnmente logradas añadiendo las ecuaciones de transporte para reproducir el comportamiento del flujo turbulento y luego vincular las escalas de turbulencia a la viscosidad turbulenta, que es introducida en las ecuaciones del flujo con la intención de explicar los esfuerzos de Reynolds.

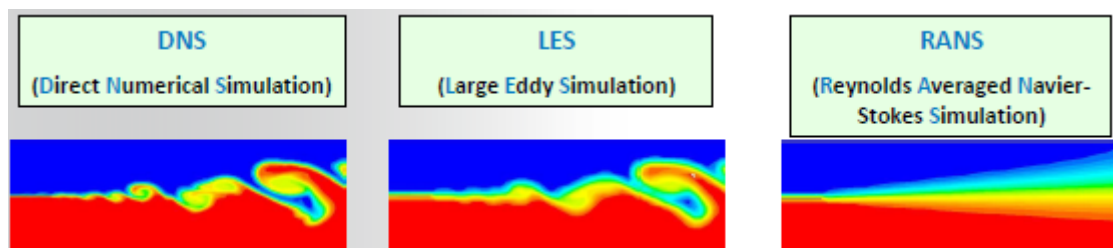


Imagen 3.3.1. Resultados de una simulación realizada usando los tres tipos de modelos turbulentos disponibles en CFD.

Concretamente, modelos RANS en plataformas de CFD como son OpenFOAM y Flow-3D son muy adecuados para la resolución de estos problemas.

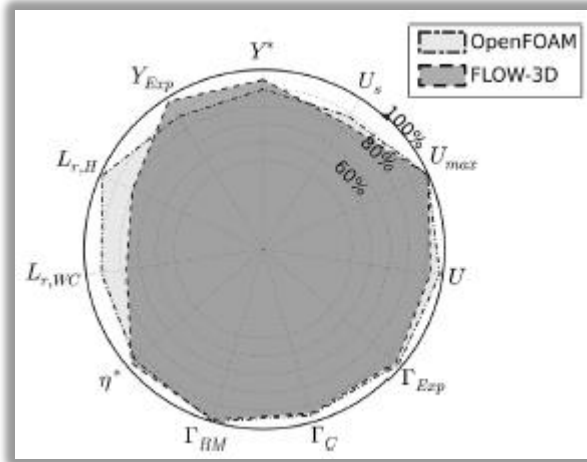


Imagen 3.3.2. Rendimientos CFD.

En la imagen de la izquierda observamos una imagen donde se reflejan los rendimientos de las diferentes magnitudes para el problema del salto hidráulico realizado en ambos softwares. Como se puede observar, los modelos RANS en ambos casos presentan bastante exactitud en sus resultados finales. Según indica el

estudio descrito en el artículo, en el que se comparan las plataformas OpenFOAM y Flow-3D, ambas arrojan buenos resultados, aunque OpenFOAM parece estar ganando puntos durante estos últimos años en detrimento de Flow-3D.

En definitiva, existen diferentes métodos a la hora de analizar el flujo del cauce de un río que han sido usados y desarrollados a lo largo de los últimos años. Sin embargo, las plataformas CFD constituyen ahora mismo una alternativa más fiable y precisa dado el carácter tridimensional y turbulento de estos problemas.

Elegir el modelo CFD más adecuado entre la gran variedad de opciones disponibles es crucial, pero puede ser también una tarea complicada dado la fuerte dependencia de los criterios para cada caso. Originalmente, Flow-3D ha sido el más usado para la resolución de problemas de este tipo, aunque en los últimos años está ganando bastante fuerza la plataforma de código abierto OpenFOAM. Como se puede ver en la imagen, el problema en ambas alternativas llega en la longitud de la ola, zona donde se dan principalmente los flujos con mayor turbulencia, poseyendo más precisión la plataforma OpenFOAM.

4. Descripción de datos de entrada disponible

Antes de empezar con cualquier trabajo teórico-experimental resulta esencial recabar una serie de datos que van a suponer el punto de partida de nuestro proceso de simulación. Estos datos tienen que ver con las circunstancias específicas a las que se encuentra la zona de estudio, entre las que podemos encontrar orografía y naturaleza del terreno, datos climatológicos, etc.

A continuación, se analizarán uno por uno los datos de partida del presente trabajo.

4.1. Precipitaciones y caudales

Uno de los datos claves para la realización del trabajo son sin duda la cantidad de precipitaciones caídas a lo largo de estas últimas décadas. De ellas y de su concentración en determinados periodos del año depende en gran medida la cantidad de caudal que circula por el río y por tanto las inundaciones acaecidas.

Por tanto, se hace necesario un análisis de las mismas, así como una búsqueda de datos de los caudales a lo largo de la historia.

Primeramente, y para ponernos en antecedentes tenemos que situar la fecha de las principales inundaciones en los últimos años. Éstas corresponden sobre todo a los años 2010 y 2013. En esos años, el municipio de Marmolejo acusado por las fuertes lluvias tuvo que ver como el río Guadalquivir llegaba a rebosarse provocando inundaciones en la zona posterior a la presa y unos daños a las zonas agrícolas adyacentes al río de gran magnitud.

Una vez puestos en situación nos dispondremos a analizar las precipitaciones y el aumento de caudal del río que provocaron estos desastres.

Podemos analizar solamente la última década, puesto que los datos climatológicos disponibles en la web no suelen ir más allá del año 2001 en muchas cosas y resultaría complicado buscarlos.

Para empezar, se han extraído datos históricos de las precipitaciones caídas a lo largo de esta última década (Tabla 4.1.1). Como hemos dicho anteriormente, las mayores inundaciones durante la última década tuvieron lugar principalmente durante los meses de lluvia de los años hidrometeorológicos o

agrícolas 2009/10 y 2012/13. Analizando los datos de la tabla podemos comprobar, como resulta obvio, que los años de las inundaciones coinciden con los años donde se produjeron más precipitaciones. Vemos que durante estos periodos hubo una cantidad desorbitada de precipitaciones, superando en ambos casos los 900 mm anuales (l/m² año).

	06/07	07/08	08/09	09/10	10/11	11/12	12/13	13/14	14/15	15/16
Precipitaciones (mm)	524.2	490.6	547.8	949.7 *	733.5 *	265.2	901.0	516.8	449.3	478.0

Tabla 4.1.1. Datos de precipitaciones según año agrícola en Marmolejo durante la última década. [6]

En el gráfico 4.1.2 se observa de manera más representativa la evolución de las precipitaciones en el municipio de Marmolejo a lo largo de la última década. Éstas, corresponden a la media de precipitaciones caídas mensualmente. Junto con la tendencia de las precipitaciones, viene también representado la evolución del caudal del río a su paso por la presa de Marmolejo, situada tan sólo unos cuantos metros aguas arriba de la zona de estudio. Estos caudales representados, lo mismo que ocurre con los datos de las precipitaciones, corresponden a la media de caudal mensual de agua desembalsada por la presa.

A partir de esta gráfica se puede extraer conclusiones muy claras. Se ve como los picos de mayor precipitación coinciden con los de mayor caudal y por tanto con el desencadenamiento de las inundaciones.

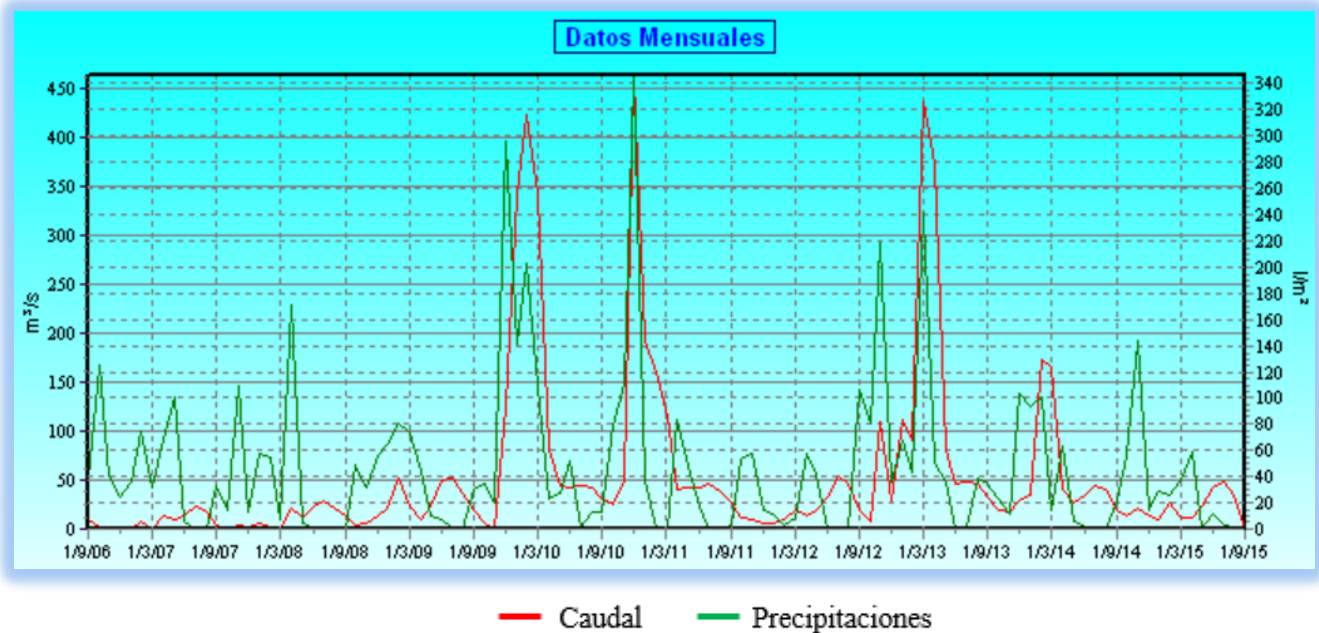


Gráfico 4.1.2. Evolución en datos medios mensuales de precipitaciones y caudal en la presa de marmolejo durante la última década. [7]

En las dos siguientes curvas se analizarán dos de los periodos donde se produjeron las inundaciones. Estos son los años agrícolas 2009/10 y 2012/13.

Ahora, no vienen representados los datos medios mensuales, sino que son los datos medios diarios de ambos parámetros.

Analizando la primera inundación (febrero de 2010, gráfico 4.1.3), se ve que hay un momento, en torno a finales del mes de diciembre, donde existe un aumento considerable de las precipitaciones. Este pico, que llega a alcanzar en un día puntual más de 40 mm es el primer desencadenante del aumento progresivo del caudal del río. A esto, se le une que en días posteriores el agua siguió haciendo acto de presencia con varios picos en determinados días con precipitaciones superiores a los 20 mm. Todas estas lluvias de los meses de diciembre y enero provocaron un aumento progresivo de caudal, llegando a alcanzar el caudal desembalsado por la presa cifras superiores a los 800 m³/s a mediados de enero, aunque afortunadamente no se produjo la inundación. Posteriormente, las lluvias dieron un respiro provocando un descenso en el caudal. Sin embargo, más tarde, hubo otro episodio de lluvias torrenciales que tuvieron lugar durante el mes de febrero. Aunque estas lluvias no fueron tan intensas como las anteriores, fueron el culmen que provocaron la tan temida

inundación. El motivo de que estas últimas lluvias, considerablemente más débiles que las anteriores, provocaran la inundación es debido a los efectos de las primeras lluvias. Éstas provocaron que los terrenos quedaran saturados de agua, no admitiendo más agua durante las lluvias de febrero y, por tanto, provocando que llegara mucha más agua al río por parte de los diferentes afluentes y arroyos que lo abastecen. En resumen, aunque el caudal del río disminuyó tras las intensas lluvias de diciembre y enero, estas últimas lluvias provocaron un acusado aumento del mismo, que llegó a superar los 1800 m³/s a finales de febrero provocando finalmente el desborde del río, con sus nefastas consecuencias para la agricultura de la zona.

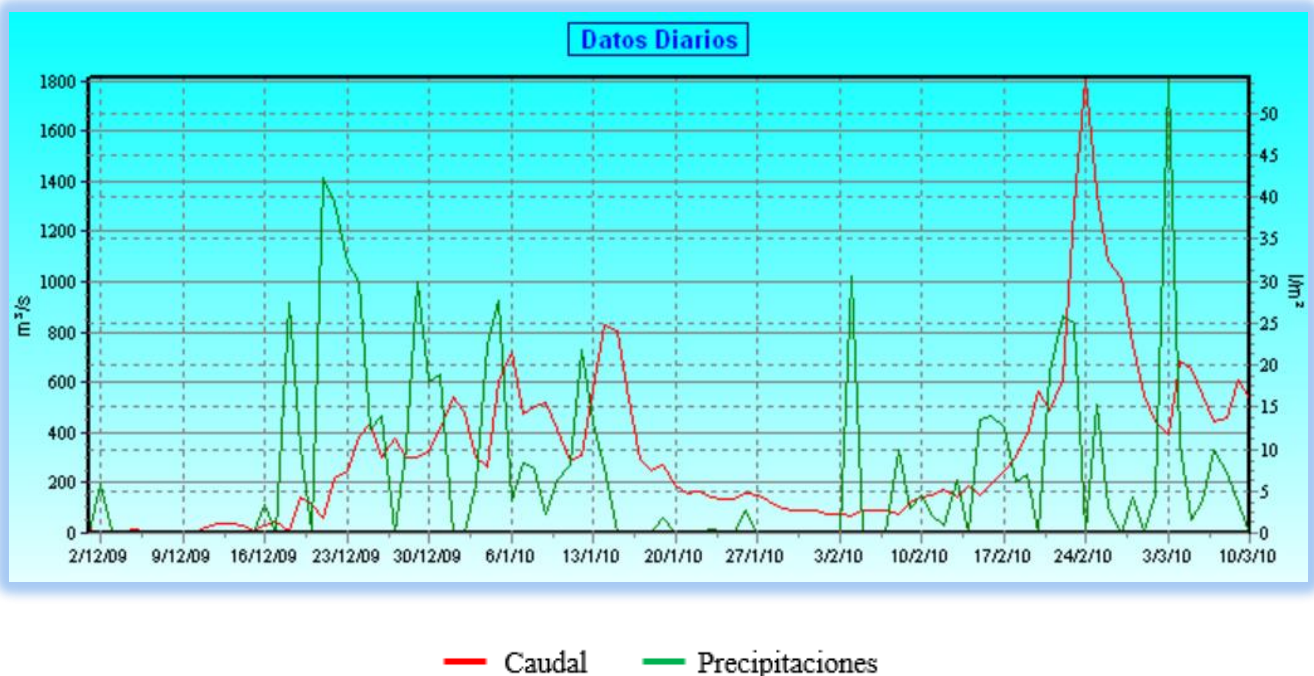


Gráfico 4.1.3. Evolución en datos medios diarios de precipitaciones y caudal en la presa de marmolejo durante la inundación de febrero de 2010. [7]

Ahora pasaremos a analizar la gráfica 4.1.4, correspondiente a la inundación producida más recientemente. La tabla analiza las curvas de precipitación y de caudal entre las fechas 1 de marzo de 2013 y 30 de abril del mismo año. Como pudimos ver anteriormente, la cantidad de precipitaciones está muy estrechamente ligada a la cantidad de caudal que circula por el río. En esta gráfica se observa mejor que en la anterior una clara relación entre las lluvias producidas en determinadas épocas y los posteriores aumentos de caudal

en los días siguientes, viendo así en las gráficas dos picos seguidos correspondientes a las gráficas de precipitaciones y de caudal. Así, podemos ver como ocurre algo similar al caso anterior, cuando unas primeras lluvias a principios de marzo, que llegaron a superar los 35 mm en un día, provocaron unos caudales superiores a 1000, pero sin embargo es en los siguientes picos de lluvias (donde se acumulan dos grandes picos de al menos 30 mm diarios en menos de 10 días) cuando se desencadenan los mayores caudales y la consecuente inundación, que en este caso fue más grave que la producida en el año 2010, llegando a alcanzarse caudales en el río superiores a 1300 m³/s.

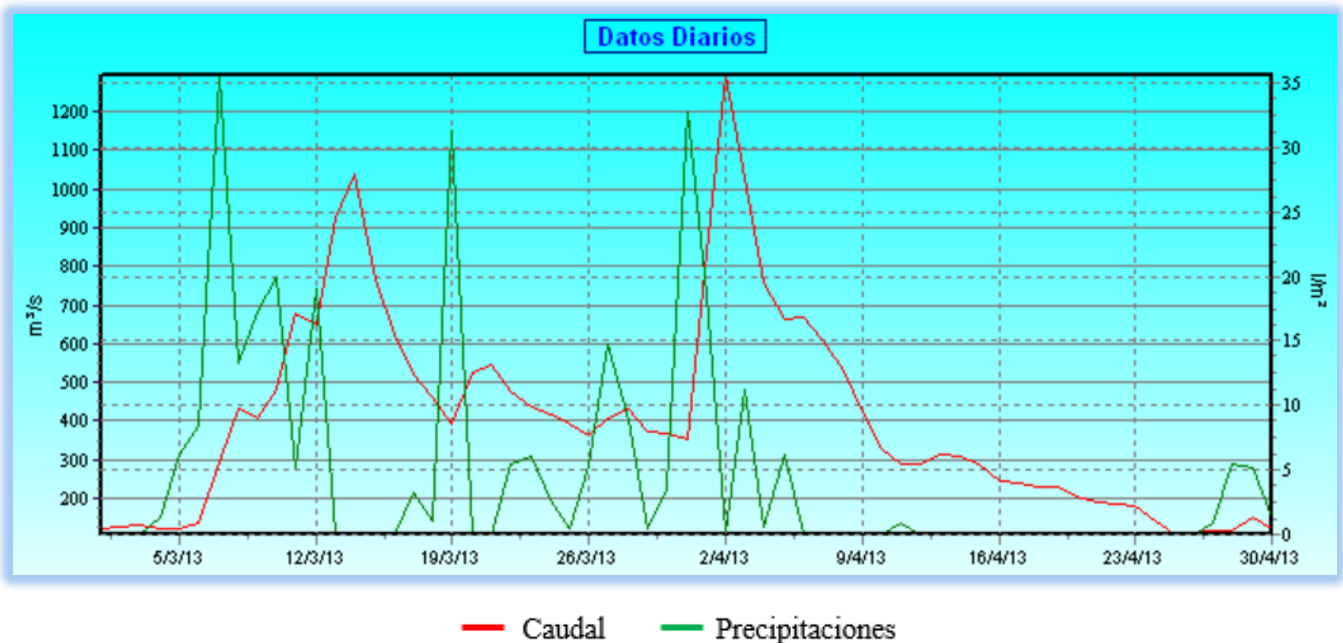


Gráfico 4.1.4. Evolución en datos medios diarios de precipitaciones y caudal en la presa de marmolejo durante la inundación de abril de 2013. [7]

Una vez analizados estos periodos de inundaciones surgidos en los años recientes, se va a analizar los días exactos en los que se produjeron estas inundaciones, de manera que obtengamos unos datos más claros de la magnitud de las mismas.

Primeramente, nos situaremos en los días que van desde el 23 de febrero de 2010 hasta el día 25 del mismo mes, fecha en la que se produjo la primera de las inundaciones examinada anteriormente (Gráfico 4.1.5). Ahora lo que estamos

analizando es el caudal medio desembalsado cada hora, lo que nos permitirá obtener unos datos más específicos y exactos de los máximos caudales que se alcanzaron durante la inundación.

Observando la gráfica, focalizada en este corto periodo de tiempo, se aprecia que se alcanza un pico de caudal en un determinado día. Sin embargo, este no es un pico en sí, sino que existe una especie de meseta que indica que una vez alcanzado el máximo caudal, éste se mantiene más o menos constante durante un periodo de tiempo, que es de aproximadamente un tercio del día, es decir, 8 horas. Este análisis es esencial de cara a poder afirmar que el problema puede ser analizado como estacionario, puesto que su caudal apenas varía en un largo periodo de tiempo.

Como veremos posteriormente, la velocidad de las partículas del río es de aproximadamente 1,5 m/s. Como tenemos una zona de estudio cuya longitud máxima es de unos 2,5 km, realizando cálculos tenemos que una partícula de agua tardaría aproximadamente 30 minutos en realizar todo ese trayecto. De esta manera, vemos que este tiempo es muy inferior al tiempo durante el cual se mantiene constante el caudal durante la inundación. Por tanto, por medio de este análisis detallado se justifica el carácter estacionario que tiene el problema que se va a estudiar.

Finalmente, se puede extraer que el máximo caudal alcanzado durante la inundación fue de en torno 1900 m³/s.

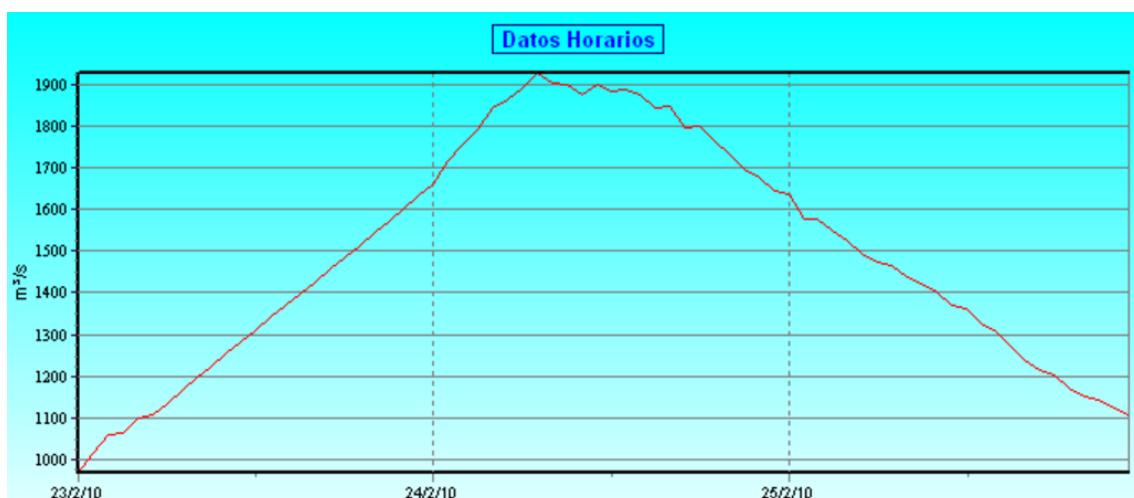


Gráfico 4.1.5. Evolución en datos horarios de caudal en la presa de marmolejo durante la inundación de febrero de 2010. [7]

Pasando ahora al gráfico 4.1.6 (Inundación de abril de 2013), se observa igualmente lo descrito anteriormente. No llega a alcanzarse un pico donde el caudal tenga un punto de inflexión en el cual el caudal deje de aumentar y empiece a disminuir. Existe la anteriormente mencionada meseta que indica que el caudal es más o menos constante durante un periodo de tiempo, que en este caso se extiende hasta unas 16 horas aproximadamente en el día 2 de abril de 2013. En esta ocasión la magnitud de la inundación fue algo inferior, llegando a alcanzar los 1400 m³/s de caudal.

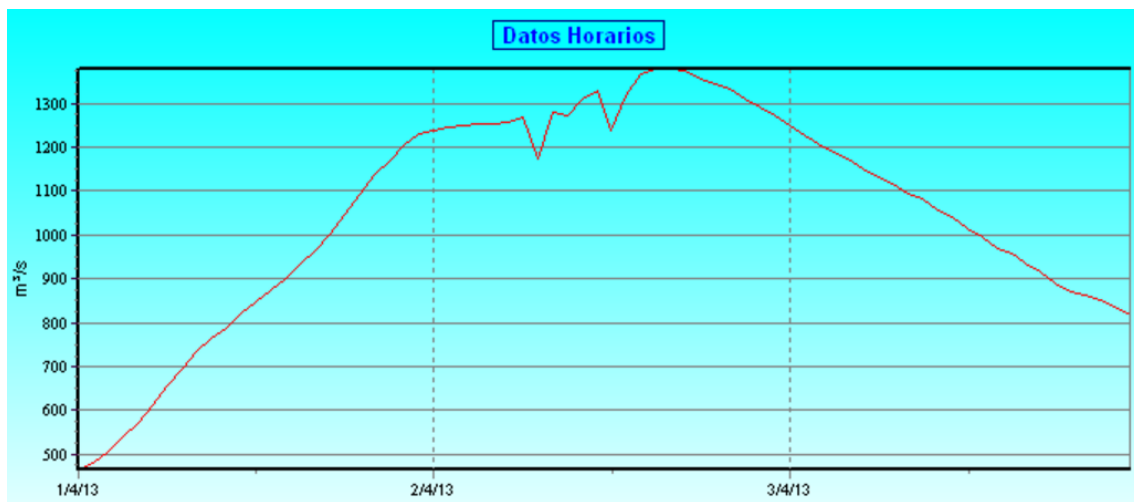


Gráfico 4.1.6. Evolución en datos horarios de caudal en la presa de marmolejo durante la inundación de abril de 2013. [7]

Conociendo que esta inundación más reciente causó ya bastantes daños y destrozos, podemos hacernos a la idea de cómo fue de grave y la magnitud que alcanzó la primera inundación analizada, teniendo un caudal un 50 % superior respecto de la más débil.

Una vez conocido todo esto, además de justificar el carácter estacionario de la simulación, como se mencionó anteriormente, podemos justificar la elección de los caudales con los que partiremos como condición inicial en las dos simulaciones realizadas. Estos caudales serán, basándonos en los resultados de los análisis anteriores, de 1400 y 2000 m³/s. De esta manera, podremos comparar dos inundaciones de diferentes magnitudes, extrayendo conclusiones en cuanto a sus efectos y focalizando también en las principales diferencias que existen entre una y otra en cuanto a calado, velocidades del flujo, presiones, etc.

4.2. Análisis de la rugosidad del terreno

Otro punto a tener en cuenta y del que es necesario la extracción de datos es el terreno. Es de vital importancia el estudio del suelo y su naturaleza de manera que podamos conocer su rugosidad que es esencial como parámetro de entrada a la hora de realizar cualquier simulación de un flujo que desliza sobre una superficie como es nuestro caso.

Por tanto, con el fin de extraer estos datos habrá que analizar la naturaleza del terreno del cauce, así como todos los objetos o sustancias que pueden estar incrustados en él. Dentro de todo esto se encuentran englobados la vegetación, incluyendo tanto matorrales como árboles y arbustos, así como piedras y rocas y cualquier otro obstáculo que se encuentre en la zona del cauce del río en el momento de los aumentos de caudal. Analizando todos estos parámetros y determinando sus alturas principalmente, se determinará la rugosidad del terreno que se impondrá en la superficie por donde desliza el fluido (agua del río) a la hora de realizar la simulación.

Así, tras el análisis pertinente, se ha estimado una rugosidad de 0,5 metros, que fijada como condición en las simulaciones.

4.3. Análisis del modelo digital de elevaciones

En la recogida de datos iniciales existe un punto que es el más esencial de todos en este tipo de trabajos. Este es aunar los datos geográficos del terreno por donde circula el cauce y que va a ser objeto de estudio.

Para ello se hará uso de un modelo digital de terreno (MDT), más concretamente un tipo de modelo incluido en el anterior denominado 'modelo digital de elevaciones' (MDE).

Un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

El tipo de Modelo Digital del Terreno (MDT) más conocido es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), un caso particular de aquel, en el que la variable representada es la cota del terreno en relación a un sistema de referencia concreto. No obstante, no hay un uso normalizado en la literatura científica de

los términos Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Modelo Digital del Terreno (MDT) y Modelo Digital de Superficie (MDS). En la mayoría de los casos, el término Modelo Digital de Superficie se refiere a la superficie de la tierra e incluye todos los objetos que esta contiene. En cambio, un MDT representa la superficie de suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios.

En definitiva un MDT es pues una representación en falso 3D de la topografía (altimetría y/o batimetría) de una zona terrestre (o de un planeta telúrico) en una forma adaptada a su utilización mediante un ordenador.

Podemos encontrar diferentes tipos de MDT en función del tamaño de la zona cubierta. La mayoría de los MDT utilizan, para las pequeñas zonas, una red cuadrada regular, mientras que para las zonas grandes utilizan una red pseudocuadrada cuyos lados son meridianos y paralelos. Por tanto, los MDT se pueden dividir según el tipo de red utilizado en: [8]

- red cuadrada/rectangular
- red hexagonal
- red triangular regular
- red triangular de otro tipo

Una vez introducida la definición de MDE, procedemos a su obtención para la zona deseada de estudio.

En conclusión, en nuestro trabajo, el modelo digital de elevaciones nos proporciona el modelo del cauce. Este modelo ha sido obtenido del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) [9]. A partir de éste y triangularizando sus cuadrículas, se genera directamente el archivo STL, archivo cuyo formato es imprescindible para poder ser mallado posteriormente.

En la imagen 4.3.1 se puede visualizar el modelo digital de elevaciones en formato STL del tramo que se va a analizar a partir del software de dibujo paramétrico *AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2014*.

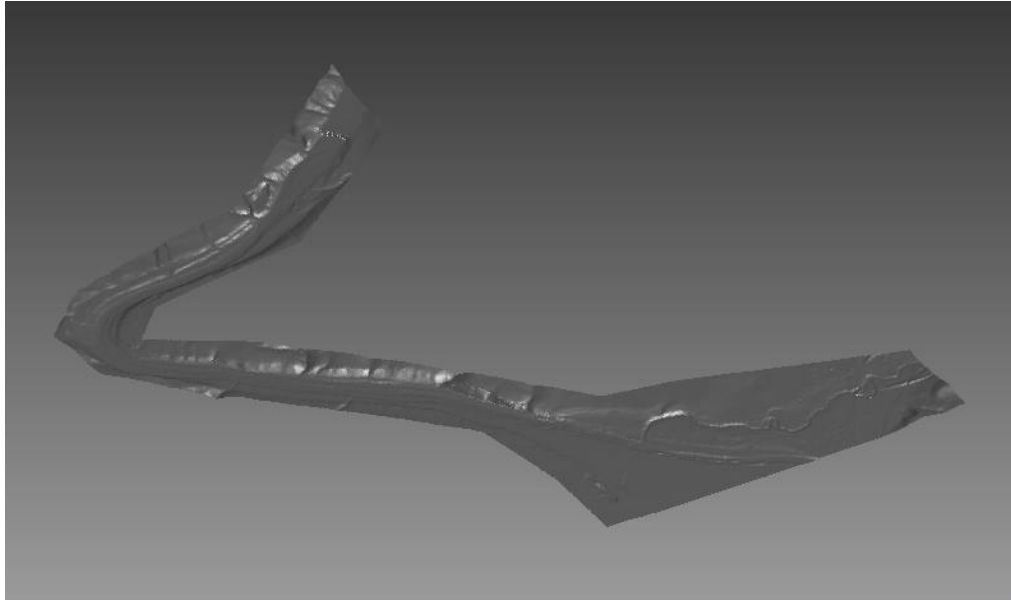


Imagen 4.3.1. Modelo digital de elevaciones.

5. Pre-procesado: Mallado

El paso del mallado es un punto clave en la realización de una simulación. En esta parte posiblemente radica una de las partes más complicadas del proceso. Se dice que, si una malla está bien conseguida, la simulación es posible. Por tanto, la calidad de la simulación está altamente influenciada por la calidad de su malla. Una malla que no está bien conseguida para el proceso que se quiere simular en ella, por ejemplo, por ser demasiado basta en algunas zonas relevantes o no ser capaz de capturar los efectos de la capa límite turbulenta en las proximidades de una superficie sobre la que circula un fluido, arrojará unos resultados finales poco fiables y precisos. De igual manera, una malla con demasiados errores en sus celdillas o caras de las celdillas, podría provocar fallos en el proceso de cálculo de la simulación e imposibilitar que ésta pueda llevarse a cabo.

Debido a todo esto, es esencial realizar este paso de forma correcta y minuciosa para que tras el proceso de cálculo obtengamos unos resultados concluyentes.

De tal manera, la malla que obtengamos tras este paso tendrá que poseer las características adecuadas para el fenómeno que se quiere simular, además de no presentar fallos ni en su estructura, ni en las celdillas que la conforman.

Puesto que el software usado para mallar (OpenFOAM) cuenta con una interfaz gráfica que nos facilita y hace más intuitiva la tarea de mallado, haremos uso de ella. Esta interfaz gráfica para OpenFOAM se denomina '*HELYX-OS*' y está disponible en la versión ejecutable desde USB de Lubuntu con la que se está realizando el trabajo.

5.1. Interfaz de mallado: HELYX-OS



HELYX-OS es una interfaz gráfica de usuario (GUI) de Código Abierto diseñada para trabajar con la librería OpenFOAM para simulaciones CFD. La interfaz es desarrollada por ENGYS utilizando Java+VTK y liberada al público bajo la licencia GNU GPL.

HELYX-OS ha sido creada para facilitar el uso de la librería OpenFOAM, removiendo la complejidad asociada a la definición de modelos utilizando archivos de texto en favor de una interfaz gráfica intuitiva y fácil de utilizar. La interfaz gráfica está enfocada en tareas de preprocesamiento CFD, incluyendo mallado, creación de modelos y ejecución de *solvers*. [10]

Por tanto, en este paso haremos uso del mallador automático que incorpora esta interfaz gráfica con el fin de crear la malla definitiva que simularemos una vez esté creada correctamente.

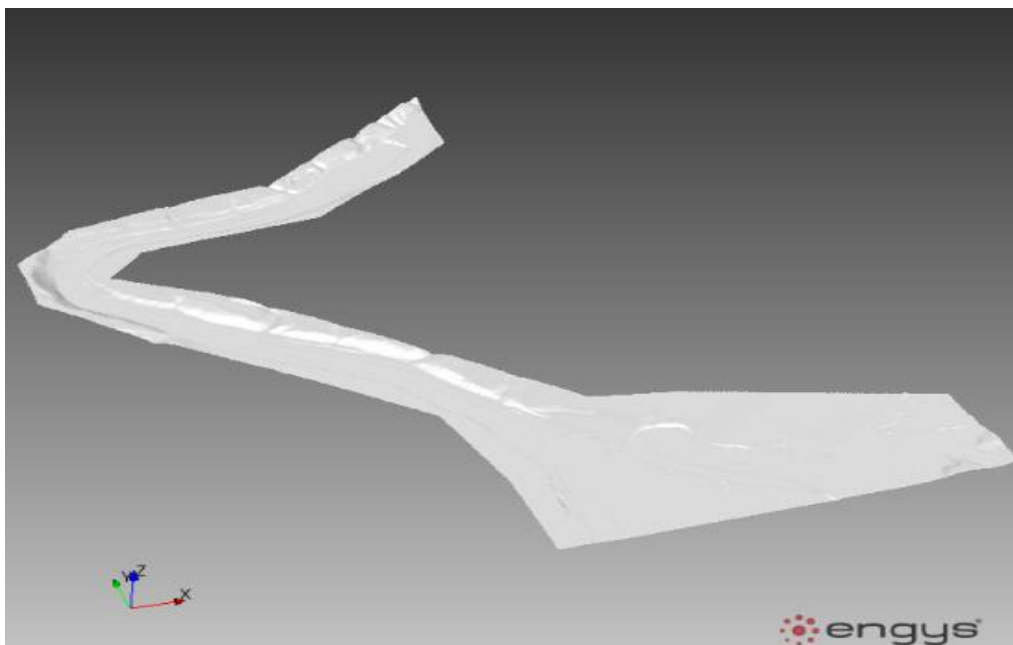
5.2. Creación de la malla

El primer paso será la creación de la geometría, es decir, la de un archivo tridimensional de la orografía del terreno. Para algunos problemas de geometrías más sencillas, esta puede ser creada directamente en la interfaz anteriormente

nombrada. La interfaz dispone de una serie de herramientas que facilitan esta tarea, pudiendo añadir diferentes tipos de geometrías de diferentes tamaños. Sin embargo, en nuestro caso no se creará la geometría en sí desde la interfaz puesto que tenemos una geometría muy compleja que hace imposible esa tarea. En su lugar, como se mencionó anteriormente, la geometría será obtenida del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en formato STL, formato que soporta el mallador y que servirá de modelo para la creación de la malla.

Un archivo STL (siglas provenientes del inglés 'Stereo Lithography') es un formato de archivo informático de diseño asistido por computadora (CAD) que define la geometría de objetos tridimensionales, excluyendo información como color, texturas o propiedades físicas que sí incluyen otros formatos CAD. Se usa para prototipado rápido y fabricación asistida por ordenador. [11]

Una vez tenemos el archivo STL de la orografía del terreno de nuestra zona de estudio, ejecutamos la interfaz *Helyx-os* para comenzar la configuración del mallado. Primeramente, debemos añadir la geometría. Para ello, en la pestaña 'Mesh' se seleccionará 'Geometry', para posteriormente seleccionar la ubicación del archivo STL descargado. Esta geometría nos va a definir la superficie de contorno inferior de la malla que será tipo 'Wall', y que se explicará más adelante. Una vez añadido, se mostrará en pantalla tal y como se puede ver en la siguiente captura de pantalla.



Captura de pantalla 5.2.1.

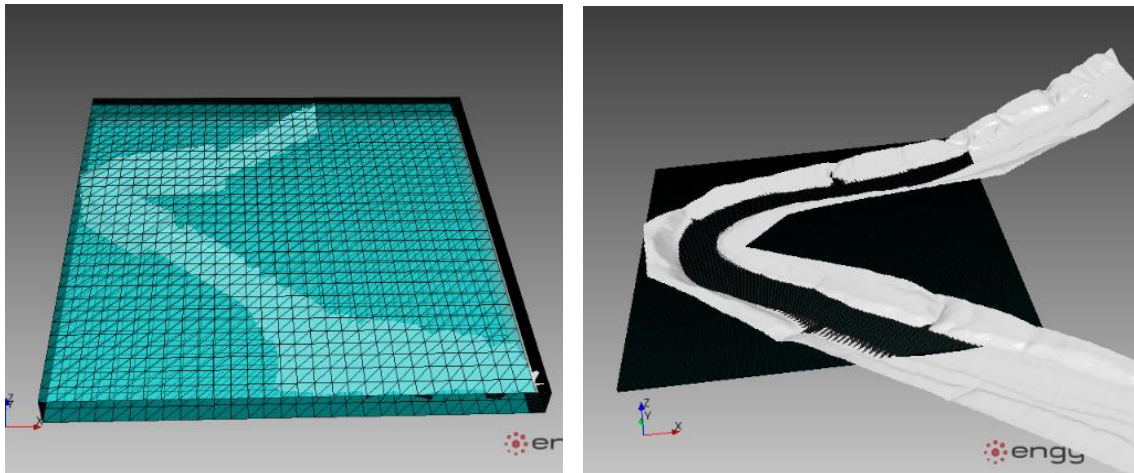
Una vez añadido este archivo, se deberá agregar una caja que formará la malla base. Esta caja fijará los límites de la malla y por tanto deberá extenderse por todo el volumen objeto de estudio. En este caso, como ya dijimos anteriormente, nos centraremos en el primer codo existente tras la presa donde resulta de mayor interés estudiar los fenómenos que provoca el agua a su paso. Para añadir la caja, en la pestaña 'Base Mesh Type' se seleccionará 'User Defined'. Una vez aquí, se podrán asignar los valores a las dimensiones (X, Y y Z) manualmente. No obstante, con el fin de agilizar el proceso de ajuste de la caja a la parte objeto de estudio, se hará clic en el icono 'Fit Bounding Box', que nos permitirá crear una caja automáticamente que cubra justo el espacio que ocupa el archivo STL. A partir de aquí, simplemente disminuirémos el tamaño de la caja modificando los valores en X, Y, y Z asignados automáticamente hasta que la caja se adapte al tamaño del codo. En cuanto a la coordenada Z, no es necesario que su altura alcance la altura del archivo STL. Una altura máxima de 205 metros basta para abordar nuestro problema, puesto que en ningún caso el agua del río tras una inundación llegaría hasta niveles tan altos y por tanto esta altura es más que suficiente para incluir las dos fases (agua y aire) en el proceso de simulación.

Una vez ajustada la caja al codo objeto de estudio, será necesario ajustar el tamaño de las celdas de esta malla base. Puesto que el archivo STL descargado tiene una precisión en X e Y de 10 metros, sería absurdo tener una malla más fina en estas direcciones ya que estaríamos agotando recursos del ordenador e invertiríamos más tiempo en el mallado, sin posteriormente obtener unos resultados más precisos en el proceso de cálculo. Por tanto, se le asignarán 320 elementos en X y 360 en Y, de manera que el tamaño final de las celdas será de 5,219 y 5,0 metros, respectivamente.

En todos los problemas donde existe capa límite turbulenta resulta esencial realizar un refinamiento en la zona de la malla sobre la que circula el fluido. Sin embargo, en este problema es irrelevante este refinamiento puesto que debido a los obstáculos que encuentra el flujo a su paso (árboles, rocas, arbustos, matorros, etc.) existe una rugosidad muy elevada. Por tanto, un refinamiento con un tamaño de celdilla mucho menor que el de la rugosidad supondría de nuevo un gasto de recursos en la realización de la malla. Así, se

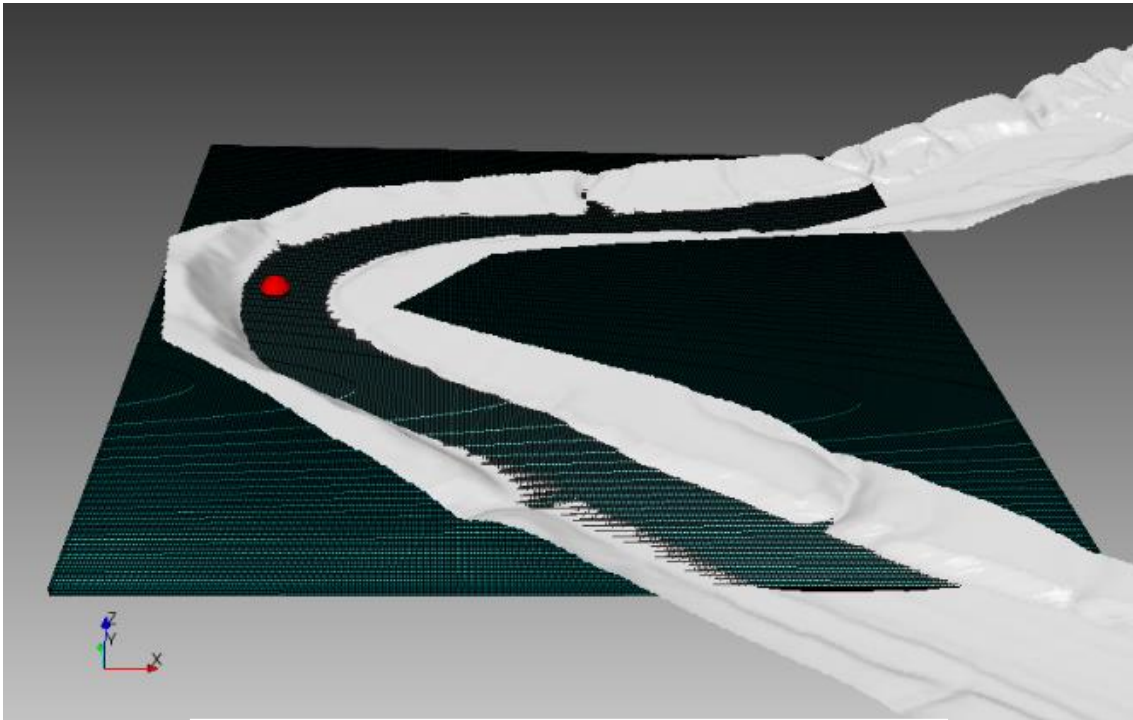
fijará un tamaño en las celdillas en la coordenada Z de 0,375 metros, asignando al número de elementos 40.

En la captura de pantalla se observan los pasos desarrollados anteriormente de la creación de la caja, desde su creación hasta el ajuste final explicado anteriormente.

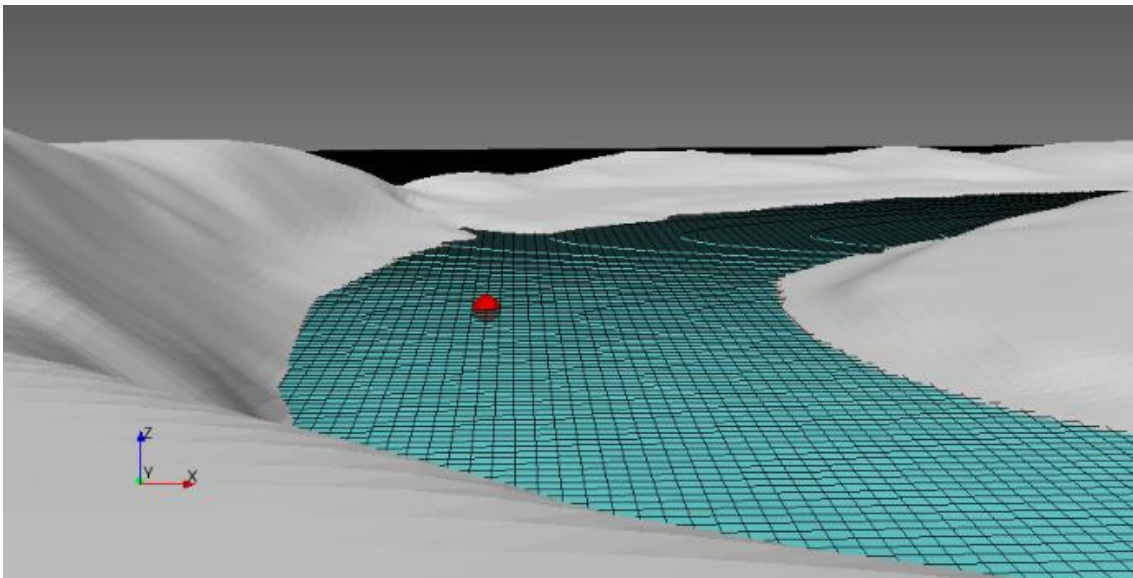


Captura de pantalla 5.2.2. Creación de la caja.

Por último, será necesario colocar el 'Material point'. Esto consiste en un punto que va indicar que trozo o parte de la caja creada se mallará, por tanto, este irá colocado siempre en el interior de la caja. En nuestro caso deberemos colocarlo en el interior del cauce. Esto hará que el mallador solamente malle el volumen que delimitan el cauce del río y la parte superior de la caja. Para que el mallado sea correcto, todos los bordes de los laterales del cauce deberán de cortar la caja completamente, formando la superficie del cauce junto con la superficie superior de la caja un volumen cerrado. De no ser así, cuando se realizase el proceso de mallado, la malla creada finalmente comprendería toda la caja y no sólo la parte del cauce como se desea.



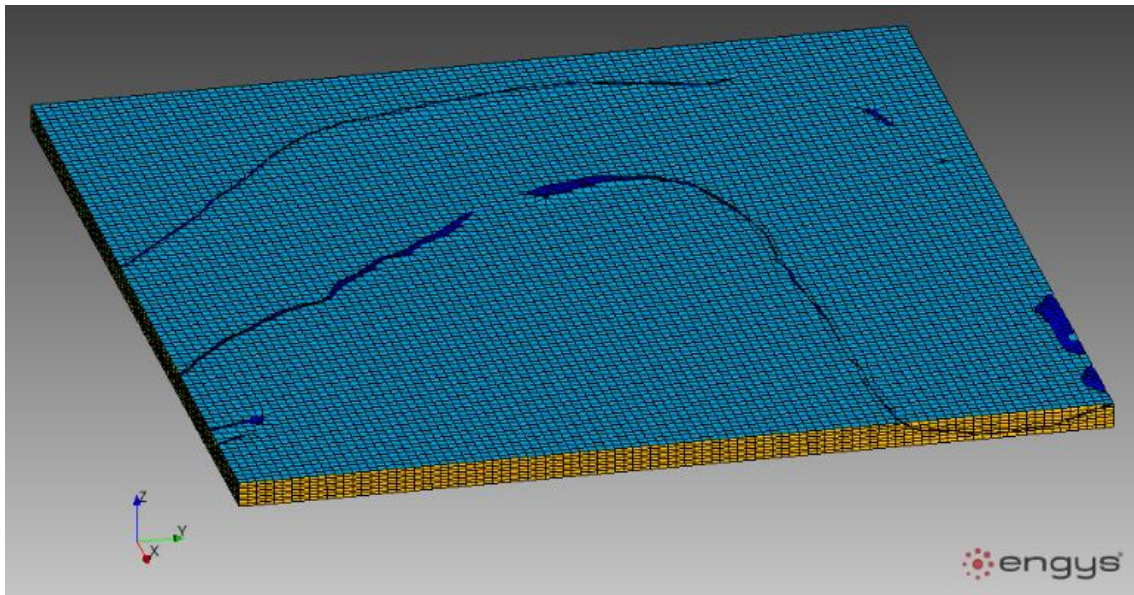
Captura de pantalla 5.2.3. Colocación del 'Material Point'



Captura de pantalla 5.2.4. Colocación del 'Material Point'

Tras realizar toda la configuración anterior, es la hora de lanzar el mallador. Para iniciarlo, bastará con clicar en el icono 'Create', situado en la esquina superior izquierda.

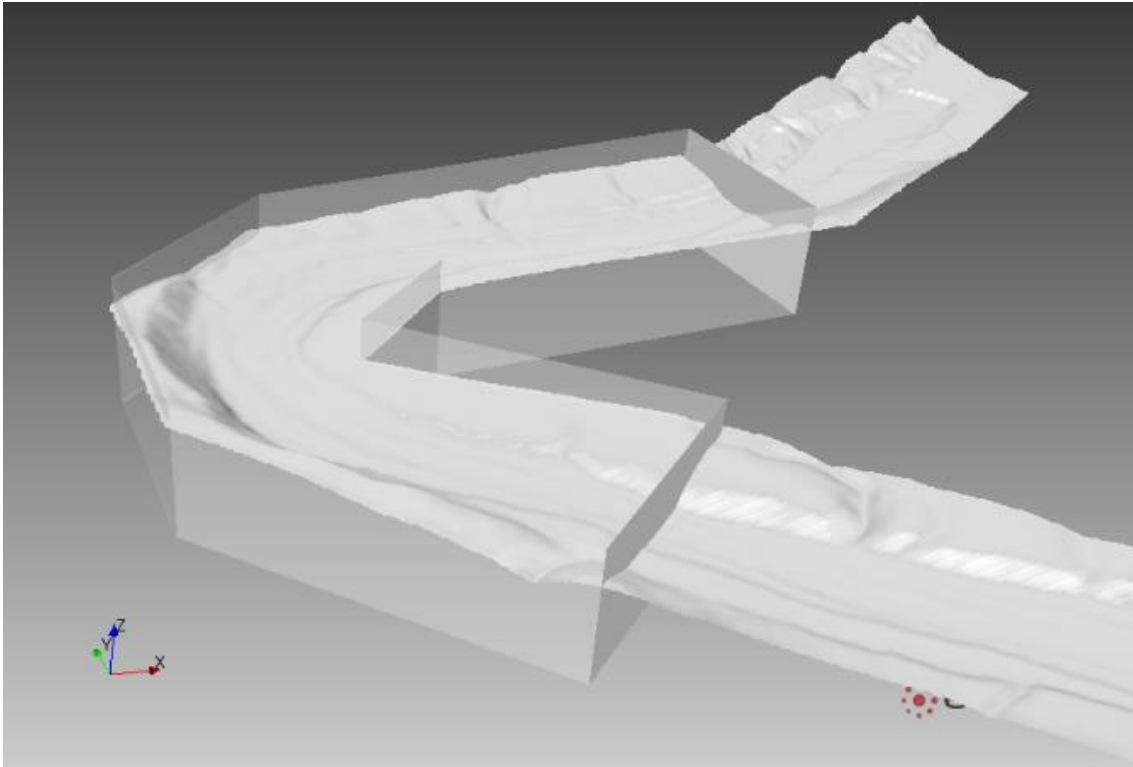
Una vez finalizado el mallado, salta a la vista que el mallado no se ha producido correctamente. Visualizando la captura 5.2.5, se aprecia que se ha mallado toda la zona de la caja y no solamente la parte que delimitaba el cauce con la superficie superior de la caja y donde se encuentra el 'Material Point'. Por lo tanto, ha ocurrido el problema anteriormente descrito. Aunque al descargar el archivo STL se tuvo la precaución de que sus límites superiores fueran suficientemente altos para que esto no ocurriera, extrañamente el error se produce. Esto será debido a que alguna zona en los bordes del modelo del cauce del río no alcanza la altura máxima de la caja, quedando un hueco que provoca que el volumen donde está encerrado el 'Material Point' no sea completamente cerrado. Por tanto, habrá que buscar una alternativa que nos permita subsanar el fallo.



Captura de pantalla 5.2.5. Malla con fallo.

Esta alternativa pasa por realizar una adición de otro archivo STL, de manera que se introduzca una especie de caja que bordé la zona de las márgenes del cauce, aumentando así su altura en todos los bordes por encima de la altura de la caja creada. De esta manera, este problema quedaría solventado. Además, con el objetivo de contar con unas superficies perfectamente descritas a la entrada y a la salida del flujo del río que posteriormente, una vez creada la malla, definirán las superficies de contorno de entrada y de salida, se añadirán los bordes laterales en diferentes archivos STL,

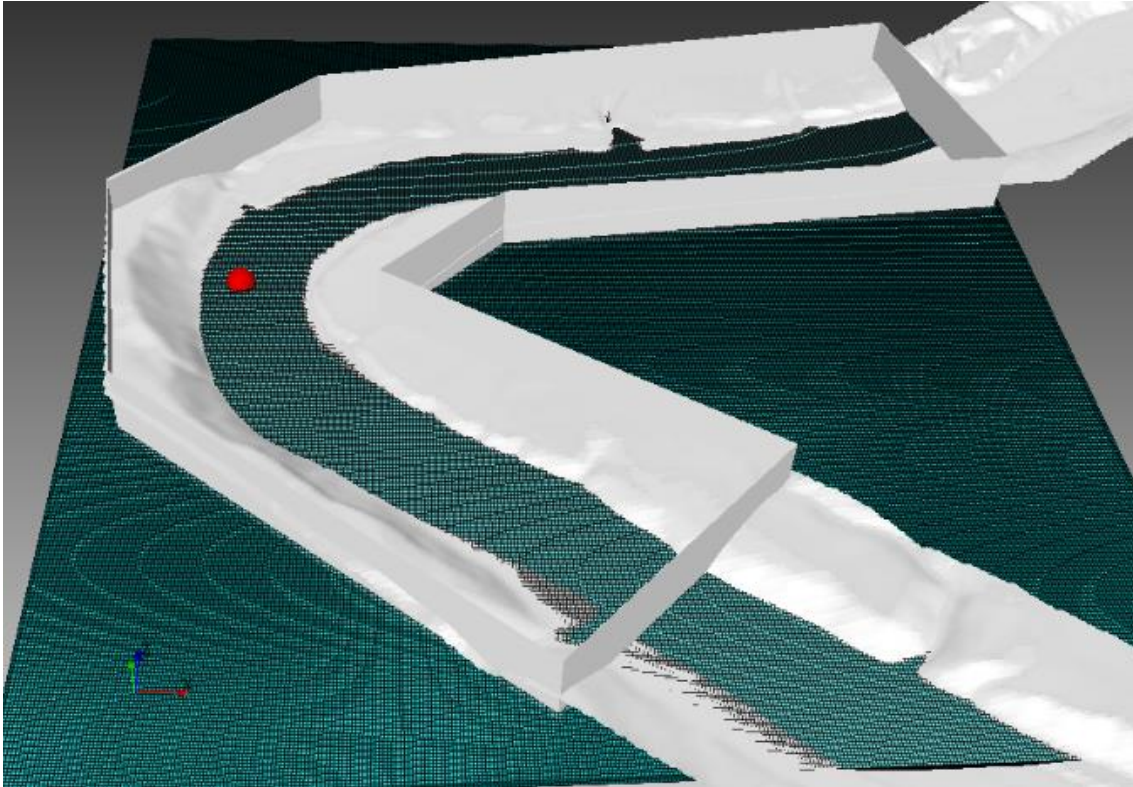
de manera que añadiremos uno para los bordes laterales, otro para el borde de la entrada y otro para el borde de la salida. Los nuevos archivos STL citados se han realizado gracias al software de dibujo paramétrico Inventor Professional, programa compatible con este tipo de archivos y que permite crear y exportar los diseños 3D a dicho formato.



Captura de pantalla 5.2.6. Adición de los bordes.

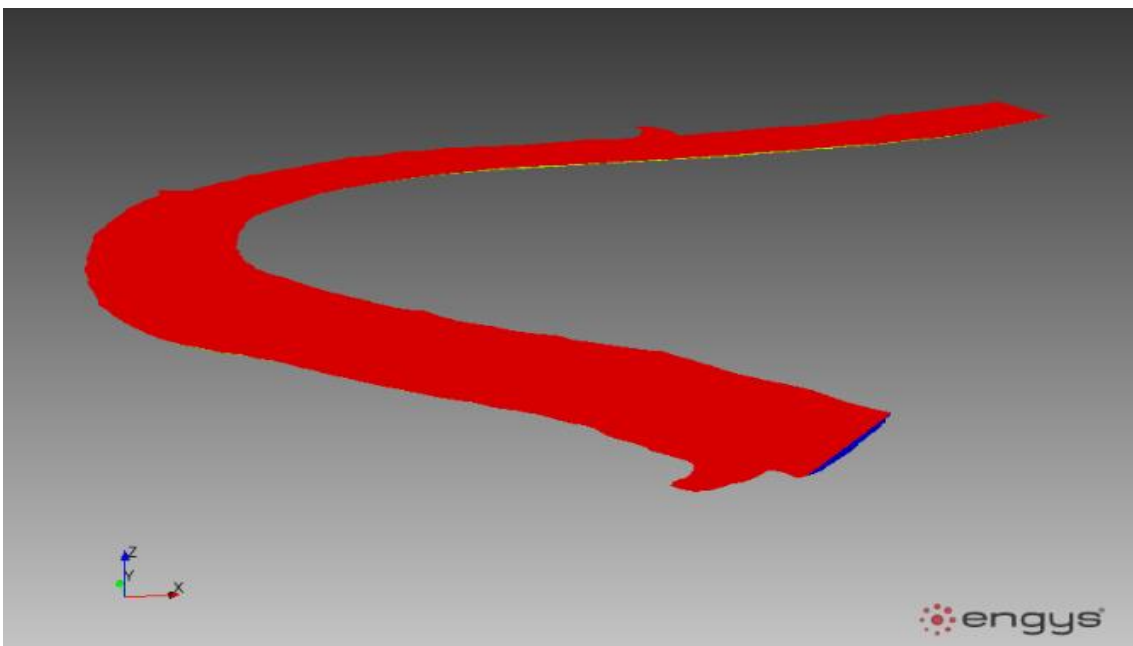
Después de esto, podemos asegurar que el problema quedará solventado. De nuevo tendremos que repetir todos los procesos anteriores añadiendo este nuevo archivo STL modificado, creando de la caja (esta última mantendrá las mismas características de antes) y colocando el 'Material Point' (se mantiene el emplazamiento).

En la captura 5.2.7 se puede observar el estado final de la configuración del mallado justo antes de iniciar el cálculo de la misma. Se aprecia el 'Material Point', además de los bordes creados a los laterales, entrada y salida del cauce para solventar el problema anteriormente descrito y la caja que conforma la malla base.

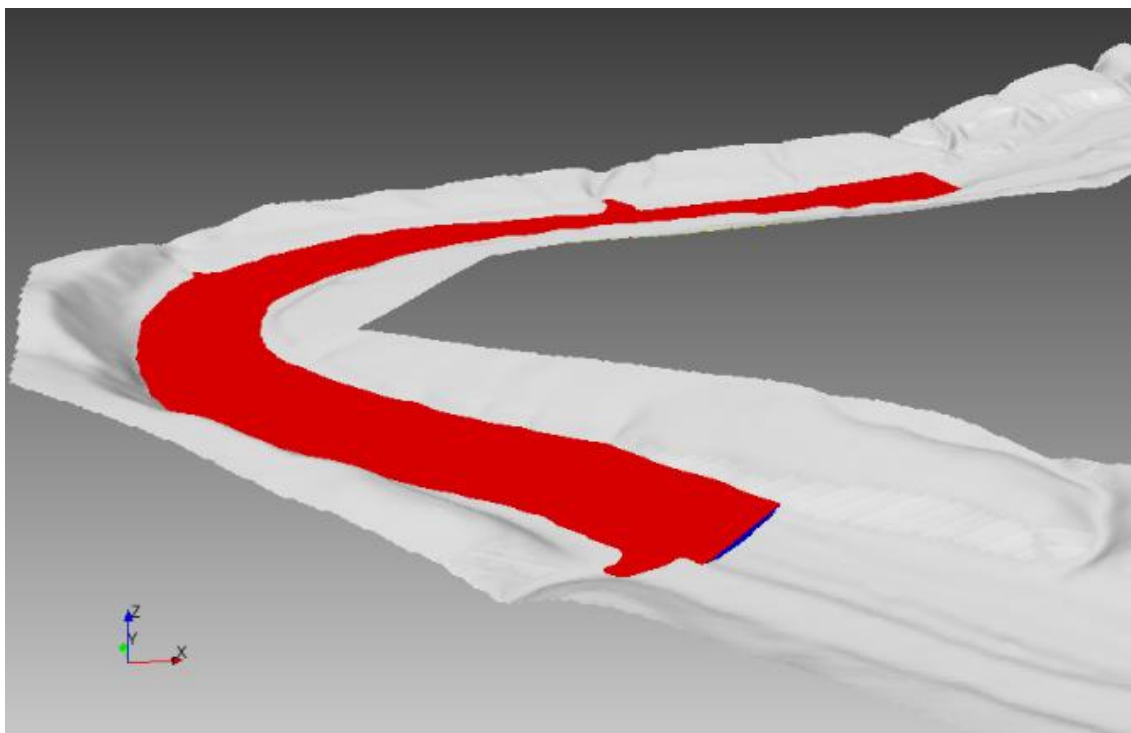


Captura de pantalla 5.2.7. Estado final mostrado en pantalla previo al inicio del mallado.

De nuevo, habrá que lanzar el proceso de cálculo de la malla haciendo clic en el icono 'Create', situado en la esquina superior izquierda. Ahora sí, como se puede ver en las capturas 5.2.8 y 5.2.9, el mallado se ha realizado de forma correcta, obteniendo la malla en la zona deseada.



Captura de pantalla 5.2.8. Malla final.



Captura de pantalla 6.2.9. Malla final más orografía del terreno.

5.3. Análisis de la malla

Antes de comenzar con el proceso de configuración de la simulación, es aconsejable examinar de manera más minuciosa la malla creada. Aunque esta se puede visualizar en la misma interfaz usada para el mallado, resulta de gran utilidad visualizarla en la interfaz 'ParaView' incluida también en la versión de Ubuntu ejecutable por USB con la que estamos trabajando. De esta manera, es posible analizar el refinamiento de la malla en las diferentes zonas, pudiendo comprobar si el resultado de ésta está acorde con nuestros intereses y si puede ser válida para la posterior simulación. El programa dispone de diferentes opciones para mostrar la malla. Entre ellos destacan diferentes modos de visualización de las superficies (superficie lisa, superficie mostrando los límites de las celdillas, superficie con puntos, etc.) o la posibilidad de realizar cortes en cualquier parte de la malla que resulte de interés y que permitan apreciar detalles en su interior en cuanto a su estructura, formación de las celdillas o refinamiento. Esta aplicación puede ser ejecutada directamente desde la interfaz *HELIX-OS* una vez realizada la malla. Para ello, basta con hacer clic en el icono que recibe ese mismo nombre en la pestaña denominada 'Solver'.

ParaView [12]

Primeramente, vamos a aprovechar para hacer una breve introducción sobre esta interfaz, que además será usada posteriormente para el post-procesado.

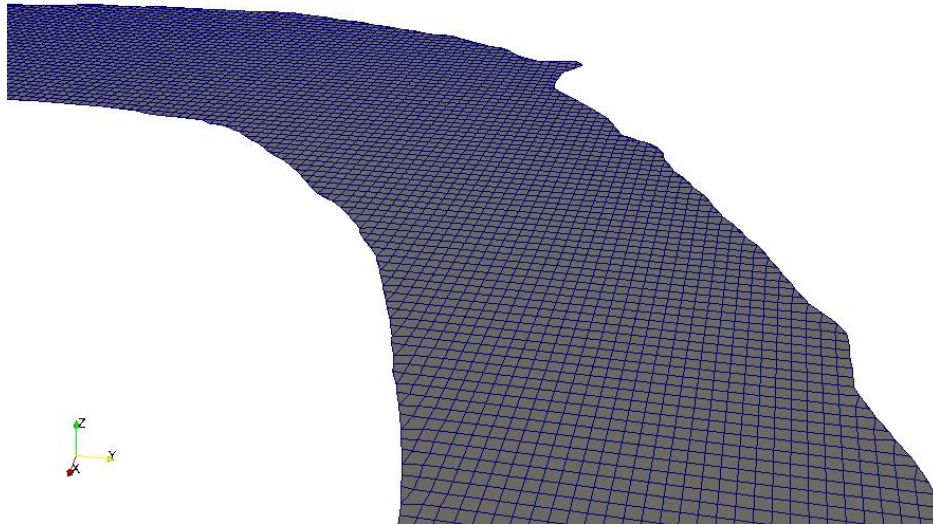


ParaView es un programa de código abierto para visualización paralela, interactiva y científica. Tiene una arquitectura cliente-servidor para facilitar la visualización remota de bases de datos y generar modelos a detallados para mantener tasas de marco interactiva para grandes conjuntos de datos. Es decir, ParaView es usado para el análisis de datos y la visualización en el que los usuarios pueden crear rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. El análisis de los datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante la programación de procesamiento por lotes de ParaView.

Imágenes del análisis de la malla en ParaView

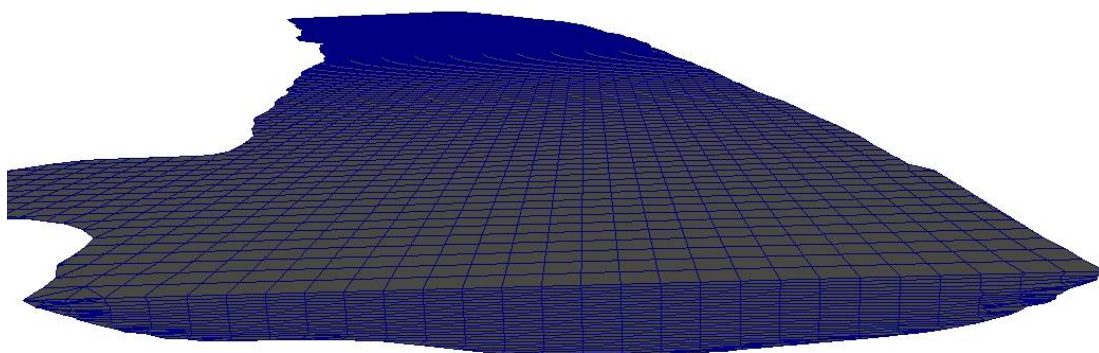
A continuación, podremos observar una serie de capturas de pantalla donde se muestra el resultado final del mallado visualizadas, como se ha mencionado anteriormente, a través de la interfaz 'ParaView'.

En la captura 5.3.1 se puede observar una vista de la superficie de la malla, mostrándose en ella los límites de las celdillas. Podemos apreciar así, lo fina que es la misma, de manera que pueda arrojar unos resultados correctos y captar los efectos turbulentos con exactitud. Además, destaca que el tamaño de las celdillas es uniforme para toda la superficie, no existiendo refinamiento alguno en esta zona.

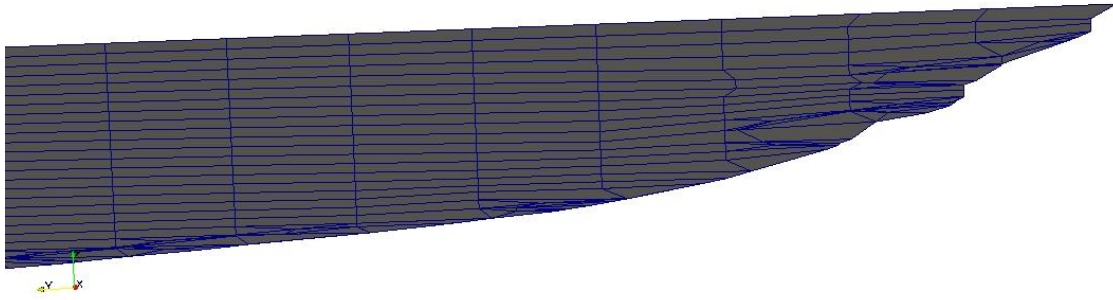


Captura de pantalla 5.3.1. Detalle de la superficie de la malla mostrando los límites de las celdillas.

A continuación, en las capturas de pantalla 5.3.2 y 5.3.3 se ha realizado un corte transversal al cauce del río, de manera que se puede apreciar el detalle de la formación de las celdillas en el interior de la malla. Por tanto, ahora es posible distinguir el refinamiento que existe en la coordenada Z, el cuál es bastante mayor que en las otras dos coordenadas puesto que es necesario para captar los efectos presentes en esta zona, ya que las dimensiones a lo largo de esta coordenada son muy reducidas. Además, en las zonas pegadas a las paredes del cauce vemos como existe un pequeño refinamiento que llega a alcanzar un nivel como indica la configuración del mallado (refinamiento entre 0 y 1), es decir, una subdivisión de la celda. Este refinamiento se realiza con el fin de poder captar mejor los efectos en las zonas de las paredes donde existe condición de no deslizamiento.

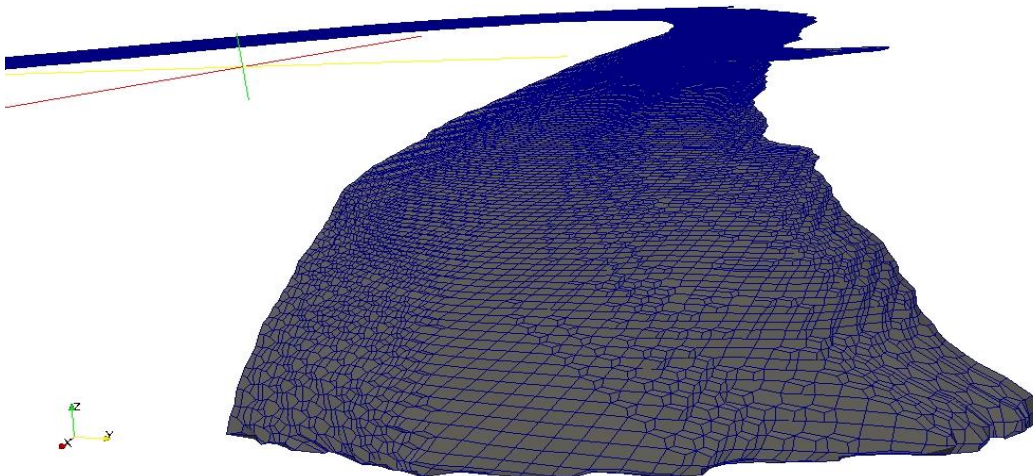


Captura de pantalla 5.3.2. Corte transversal en la malla mostrando los límites entre celdillas.



Captura de pantalla 5.3.3. Detalle de corte transversal en la malla mostrando los límites entre celdillas.

Por último, en la captura de pantalla 5.3.4 se muestra únicamente la parte inferior de la malla que pega a las paredes del fondo del cauce. Volvemos a apreciar, esta vez de manera más clara, el refinamiento existente en esta zona pegada a las paredes.



Captura de pantalla 5.3.4. Detalle de la malla en la zona inferior mostrando los límites entre celdillas.

6. Procesado

6.1. Modelo y ecuaciones

Modelos RANS

Como ya se ha comentado previamente, el modelo que nos permite realizar este tipo de simulación es el modelo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation), ya que conlleva un coste computacional asumible, a diferencia de otros modelos que hoy en día no son posibles computacionalmente hablando, por lo que es el método más ampliamente usado para cálculos de

flujos en la industria ingenieril. En este modelo son resueltas las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, que se muestran a continuación:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \quad ; \quad \text{siendo} \quad R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$$

(Tensor de esfuerzos de Reynolds)

Los esfuerzos de Reynolds son incógnitas adicionales introducidas por el proceso de promediado (6 incógnitas), por tanto, deben de ser modeladas (en relación con las cantidades de flujo medias) para cerrar el sistema de ecuaciones gobernantes.

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} -\rho \overline{u'^2} & -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{u'w'} \\ -\rho \overline{u'v'} & -\rho \overline{v'^2} & -\rho \overline{v'w'} \\ -\rho \overline{u'w'} & -\rho \overline{v'w'} & -\rho \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

En función de la manera en la que el tensor de esfuerzos de Reynolds es resuelto, los diferentes modelos dentro del modelado RANS se pueden agrupar en dos grupos: Reynolds-Stress Models (RSM) y Eddy Viscosity Models.

El primero se caracteriza porque el tensor de esfuerzos es directamente resuelto a través de las ecuaciones de transporte. Este modelo es ventajoso en flujos tridimensionales complejos con grandes líneas de corriente curvas y remolinos. Sin embargo, el modelo tiene un coste computacional alto y con dificultad para converger, por lo que es descartado para este tipo de problemas, donde además no existen efectos turbulentos complejos.

El otro grupo de modelos (Eddy Viscosity Models) se caracterizan por la hipótesis de que los esfuerzos de Reynolds son modelados usando una viscosidad turbulenta, μ_T .

$$R_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_T \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Esta hipótesis es asequible para flujos con esfuerzos turbulentos simples: capas límite, chorros circulares, flujos en canales, etc. Por tanto, estas características lo hacen adecuado para nuestro fin.

Cabe añadir que todos los modelos turbulentos contienen empirismos, ya que las ecuaciones no pueden ser derivadas a partir de principios fundamentales. De tal manera, en los modelos son incluidos datos empíricos o “suposiciones inteligentes” extraídos a partir de procesos experimentales, que permiten su resolución.

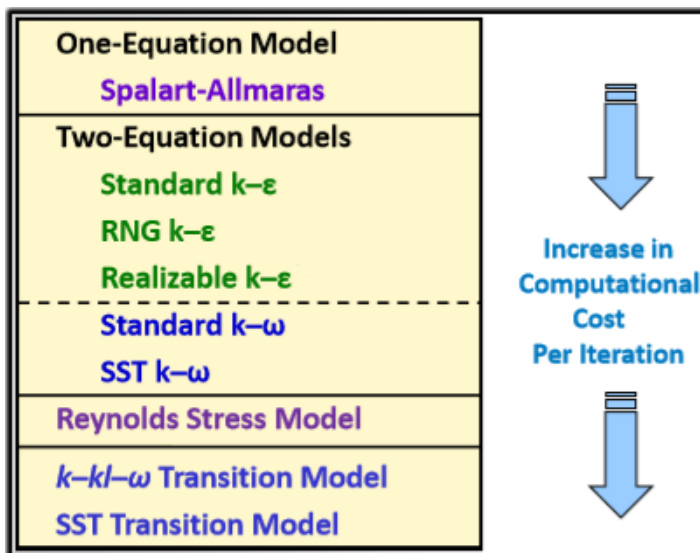


Imagen 6.1.1. Modelos RANS disponibles.

En la imagen situada a la izquierda se puede observar un esquema con los diferentes modelos RANS disponibles, ordenados de menor a mayor coste computacional. Entre estos modelos destacan los llamados modelos de dos ecuaciones (Incluidos en el grupo Eddy Viscosity Models). Estos modelos se

caracterizan, como resulta obvio, porque son modelos donde es necesario la resolución de dos ecuaciones diferentes. Es entre este tipo de modelos donde se encuentra el modelo usado para nuestra simulación, SST k-ω cuyas características y ecuaciones a resolver se expondrán a continuación.

Ecuaciones generales para problemas multifásicos tridimensionales

Las tres ecuaciones básicas usadas para resolver los problemas en volúmenes finitos son las siguientes:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Continuidad}$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) - \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) s) = -\nabla p + \rho g + \sigma K \frac{\nabla \gamma}{|\nabla \gamma|} \quad \longrightarrow \quad \text{Cantidad de movimiento}$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (u \gamma) = 0 \quad \longrightarrow \quad \text{Gamma}$$

Donde p es el campo de presión, μ_t es la viscosidad turbulenta, S es el tensor de esfuerzos definido por $S = 1/2 (\nabla u + \nabla u^T)$, σ es la tensión superficial y K es la curvatura superficial.

Para problemas de flujos multifásicos incompresibles, existen 3 condiciones posibles para el valor γ :

- $0 < \gamma < 1$: Cuando el volumen infinitesimal contiene a la interfase entre ambos fluidos.
- $\gamma = 0$: Volumen ocupado por aire.
- $\gamma = 1$: Volumen ocupado por agua.

Modelo SST k- ω : Ecuaciones de turbulencia

Este modelo, desarrollado por F. R. Menter en 1993, es una variante del modelo estándar k- ω cuya fórmula SST (Shear Stress Transport) combina las ventajas de los modelos k- ϵ y k- ω . El uso de una fórmula k- ω en las partes internas de la capa límite hacen que el modelo sea directamente utilizable en las zonas cercanas a las paredes, donde se sitúa la subcapa viscosa, por tanto, este modelo puede ser usado como un modelo de turbulencia para bajos Reynolds sin ninguna función adicional. La fórmula SST también cambia al comportamiento del modelo k- ϵ en la superficie libre, evitando así los problemas que presenta el modelo k- ω en esta zona, el cual es demasiado sensible a las propiedades de la turbulencia en la entrada de la superficie libre.

En resumen, combina el modelo original, credo por Wilcox, (que presenta un mayor rendimiento en los contornos de los muros y en flujos a bajos números de Reynolds) para el uso en las zonas cercanas a los muros y el modelo estándar k-ε (válido solamente para flujos completamente turbulentos) en zonas lejanas a los muros, usando para ello una función que combina a ambos modelos.

Esta serie de características lo sitúan como la elección recomendada para los casos estándar y, además, lo convierten en el más adecuado para afrontar nuestro problema.

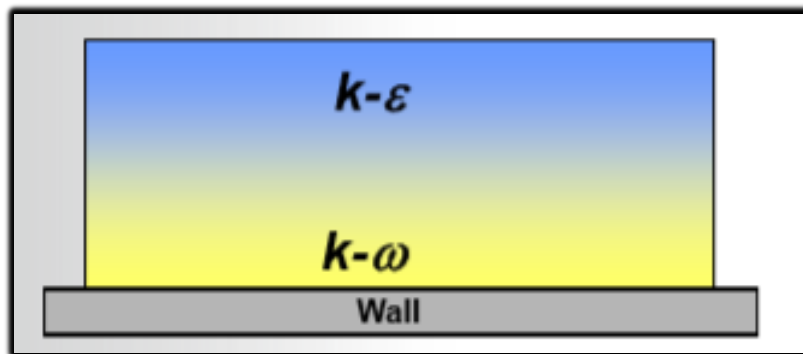


Imagen 6.1.2. Esquema modelo SST k-ω.

En este modelo se resuelven dos ecuaciones de transporte además de las indicadas en el apartado anterior, dando dos escalas diferentes para calcular μ_t . Estas funciones de turbulencia se muestran a continuación [13]:

Viscosidad turbulenta

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

1º Ecuación de transporte: Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

2º Ecuación de transporte: Índice de disipación específica

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

Coefficientes y relaciones auxiliares

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^*k\omega \right)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2} \right] \right\}^4 \right\}$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

$$\alpha_1 = \frac{5}{9}, \alpha_2 = 0.44$$

$$\beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828$$

$$\beta^* = \frac{9}{100}$$

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0.5, \sigma_{\omega 2} = 0.856$$

6.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno en un problema CFD detallan los valores de cada una de las variables en los diferentes contornos existentes.

Para ello, primeramente, es necesario definir estas superficies de contorno, que vienen indicadas en la siguiente tabla junto con una descripción del tipo de condición seleccionada.

Contorno	Condición	Significado
Inlet	Patch	Se usa para indicar que no hay geometría o información topológica sobre la malla
Outlet		
Atmosfera		
mallaPaperCanon5mdt2011	Wall	Función de pared

Tabla 6.2.1. Superficies de contorno.

Aunque en nuestro problema disponemos de otra superficie de contorno cuyo nombre es ‘lateral’, no la analizaremos, puesto que posee el mismo origen que el otro elemento ‘Wall’. Así que de aquí en adelante el término ‘Wall’ englobará a ambas superficies.

Todas estas condiciones quedan reflejadas en el archivo **'blockMeshDict'** de la simulación.

Seguidamente, ya se pueden definir las condiciones. Estas podrán ser impuestas en función del tipo de contorno seleccionado anteriormente, existiendo condiciones específicas para cada categoría de contornos.

A continuación, en las tablas 6.2.2 y 6.2.3 quedan reflejadas todas las condiciones (para el caso de caudal de 2000 m³) para todas las propiedades existentes para nuestro modelo de problema (U, p, k, épsilon y omega). En ellas, se indica la condición de contorno junto con los valores que se debe de imponer a ciertos parámetros requeridos por el tipo de condición elegida. Estas condiciones de contorno para cada propiedad se encuentran en sus respectivos ficheros situados en la carpeta del estado final, en el que se alcanza el estado estacionario.

	U	p
Variable (unidad)	Velocidad (m/s)	Presión atmosférica (N/mm ²)
Tipo	Vector	Escalar
Condiciones de contorno		
Atmósfera	Type pressureInletOutletVelocity	Type totalPressure Value uniform 0
Wall	Type fixedValue Value uniform (0 0 0)	Type fixedFluxPressure Value Gradient uniform 0
Entrada	Type variableHeightFlowRateInletVelocity flowrate 2000 alpha alpha.water	Type fixedFluxPressure Value Gradient uniform 0
Salida	Type variableHeightFlowRateInletVelocity flowrate -2000 alpha alpha.water	Type fixedFluxPressure Value Gradient uniform 0

Tabla 6.2.2. Condiciones de contorno para U y p.

	K	Omega	nut
Variable (unidad)	Presión dinámica turbulenta (m ² /s ²)	Disipación turbulenta específica (s ⁻¹)	Viscosidad dinámica (m ² /s)
Tipo	Escalar		
Condiciones de contorno			
Atmósfera	Type inletOutlet Inlet Value uniform 0.1	Type inletOutlet Inlet Value uniform 0.1	Type zeroGradient
Wall	Type kqRWallFunction	Type omegaWallFunction Cmu 0.09 Kappa 0.41 E 9.8 Beta1 0.075	Type nutkRoughWallFunction Cmu 0.09 kappa 0.41 E 9.8 Cs uniform 0.5 Ks uniform 0.5
Entrada	Type fixedValue Value uniform 0.1	Type fixedValue Value uniform 0.1	Type zeroGradient
Salida	Type inletOutlet Inlet Value uniform 0.01	Type inletOutlet Inlet Value uniform 0.1	Type zeroGradient

Tabla 6.2.3. Condiciones de contorno para k, ω y nut.

Seguidamente, se muestra la descripción y principales características de las condiciones de contorno asignadas anteriormente [14].

Pressure Inlet Outlet Velocity

Es aplicada a contornos de presión donde existe una presión específica. Para el flujo de salida se aplica la condición Zero-Gradient, mientras que para el flujo de entrada la velocidad es obtenida de la componente normal a la cara del valor interno de la celdilla.

Total pressure

Proporciona una condición de presión total.

Fixed Flux pressure

Fija un valor al gradiente de presión de manera que el flujo en el contorno venga especificado por la condición de contorno de la velocidad.

Fixed Value

Impone un valor fijo.

Variable Height Flow Rate Inlet Velocity

Esta condición impone una condición de contorno para la velocidad para flujos multifásicos basados en un caudal especificado por el usuario de una de las dos fases.

Inlet Outlet

Proporciona una condición genérica para el flujo de salida, con un flujo de entrada específico para el caso de flujos con retorno.

kqR Wall Function

Esta condición de contorno aporta una adecuada condición para la turbulencia en los campos k , q y R , para el caso de altos números de Reynolds.

Omega Wall Function

Esta condición aporta una restricción de la función de pared en la disipación específica turbulenta (ω).

NutkRought Wall Function

Esta condición de contorno aporta una condición para la viscosidad cinemática turbulenta cuando usamos funciones de pared para paredes rugosas, basándose en la energía cinética turbulenta. La condición manipula el parámetro E para representar los efectos de la rugosidad.

Zero Gradient

Significa que el gradiente de esa propiedad es cero y por tanto que el valor actual es constante (Condición de contorno tipo Neumann).

Constantes para las funciones de pared

C_{μ} : Coeficiente del modelo

κ : Constante de Von Karman

E: Constante del modelo

Beta1: Constante del modelo

Cs: Constante de rugosidad

Ks: Altura de la rugosidad de los granos de arena

Como se comentó anteriormente, no es necesario generar una capa límite puesto que existe una rugosidad elevada. En su lugar, son impuestas unas condiciones de contorno específicas para k , ω y ν_t (Wall Function, explicadas arriba), condiciones de contorno sólo impuestas para casos con rugosidad excesiva como es el nuestro.

6.3. Esquemas numéricos y control de la discretización

Como ya sabemos, el método de volúmenes finitos consiste en discretizar una región del espacio creando una malla espacial y dividiéndola en pequeños volúmenes de control, en los cuales se deben de resolver las ecuaciones de conservación discretizadas.

De esta manera, con el fin de resolver los diferentes términos que aparecen en estas ecuaciones, necesitamos establecer diferentes esquemas numéricos de discretización para su resolución. Estos esquemas son seleccionados individualmente para cada término en función del tipo de operador diferencial al que pertenezcan (derivadas, gradientes, divergencias, etc.) y requieren de una determinada configuración que realice el control de las mismas (control de iteraciones y discretización).

Así, en la tabla 6.3.1 podemos encontrar la información referente al control de las iteraciones y discretización que están presentes en la resolución del problema. Esto se encuentra en el archivo '**controlDirect**' que está situado en la carpeta '*system*' de la simulación pertinente.

Parámetro	Valor	Significado
Application	PimpleFoam	Aplicación a usar
StartFrom	latestTime	Instante inicial a partir del cual inicia la simulación
startTime	0	Tiempo inicial específico
stopAt	endTime	Instante final en el que la simulación termina
endTime	0.0	Tiempo final específico
deltaT	0.000001	Paso de tiempo o iteración
writeControl	adjustableRunTime	Controla el tiempo de escritura de salida en el archivo
writeInterval	30.0	Intervalo de almacenamiento de datos
purgeWrite	60	Entero que representa un límite en el número de los directorios temporales que se almacenan de forma cíclica
writeFormat	ascii	Formato de salida de los resultados
writePrecision	10	Precisión de escritura
writeCompression	compressed	Compresión o no de los datos
timeFormat	general	Formato para el directorio temporal
timePrecision	6	Precisión temporal

Tabla 6.3.1. Control de las iteraciones y discretización.

En la tabla 6.3.2, encontramos información referente al control de las ecuaciones, tolerancias y algoritmos usados en la resolución del problema, es decir, todo lo relativo a los solvers y preconditionadores. Esta puede ser encontrada en el archivo *'fvSolution'* de la misma carpeta mencionada anteriormente.

Solvers			
Variables	Solver	Precondicionador	Tolerancia
P	GAMG	None	1e-10
U, k, ε, R, ω	smoothSolver	None	1e-6
PIMPLE			
Número de correctores no ortogonales	0	Control de residuales (Todas las variables)	1e-5
Relaxation Factors			
Para variables		Para ecuaciones	
1		1	

Tabla 6.3.2. Control de las resoluciones de las ecuaciones, tolerancia y los algoritmos usados.

A continuación, se abordará el tema de los esquemas numéricos. Primeramente, se procederá con el desglose de los esquemas numéricos utilizados para cada término. Como acabamos de mencionar, existen términos en las ecuaciones de distinta naturaleza. Por tanto, según la naturaleza del término, estos pueden ser clasificados en: [14]

- **Time scheme:** Esquema de discretización numérico.
- **Interpolation scheme:** Interpolación de valores desde el centro de las celdillas al centro de las caras.
- **Surface normal gradient scheme:** Esquema de discretización para los términos gradientes normales a la superficie. Es evaluado en la cara de la celda que conecta a dos celdillas.
- **Gradiente scheme:** Esquema de discretización para los términos gradientes.
- **Divergence scheme:** Esquema de discretización para las divergencias.
- **Laplacian scheme:** Esquema numérico para los términos laplacianos.

Una vez introducidos cada uno de los términos, se procede con el desglose de los esquemas utilizados, que se muestran detallados en la tabla 6.3.3. Esta configuración queda reflejada en el archivo '**fvSchemes**', dentro de la misma carpeta nombrada anteriormente.

Término	Configuración	Significado
Time Scheme ($\partial/\partial t$)	Euler	Primer orden implícito
Gradient Scheme (∇)	Cell Limited Gauss linear	Integración Gausiniana de segundo orden con interpolación lineal. Versión limitada para celdillas.
Divergence Scheme ($\nabla \cdot$)	Gauss van Leer	Discretización Gausiniana
Laplacian Scheme (∇^2)	Gauss linear limited 0.333	Interpolación Gausiniana con interpolación lineal. Limited: mezcla de los esquemas corrected y uncorrected.
Interpolation Scheme	linear	Esquema centrado de interpolación lineal
Surface normal gradient scheme	Limited 0.333	Corrección no ortogonal limitada

Tabla 6.3.3. Esquemas numéricos. [15]

Cada uno de los esquemas asignados anteriormente, se refieren a todos los términos de esa naturaleza que se incluyan en el problema, sin importar el parámetro del operador o término.

7. Post-procesado:

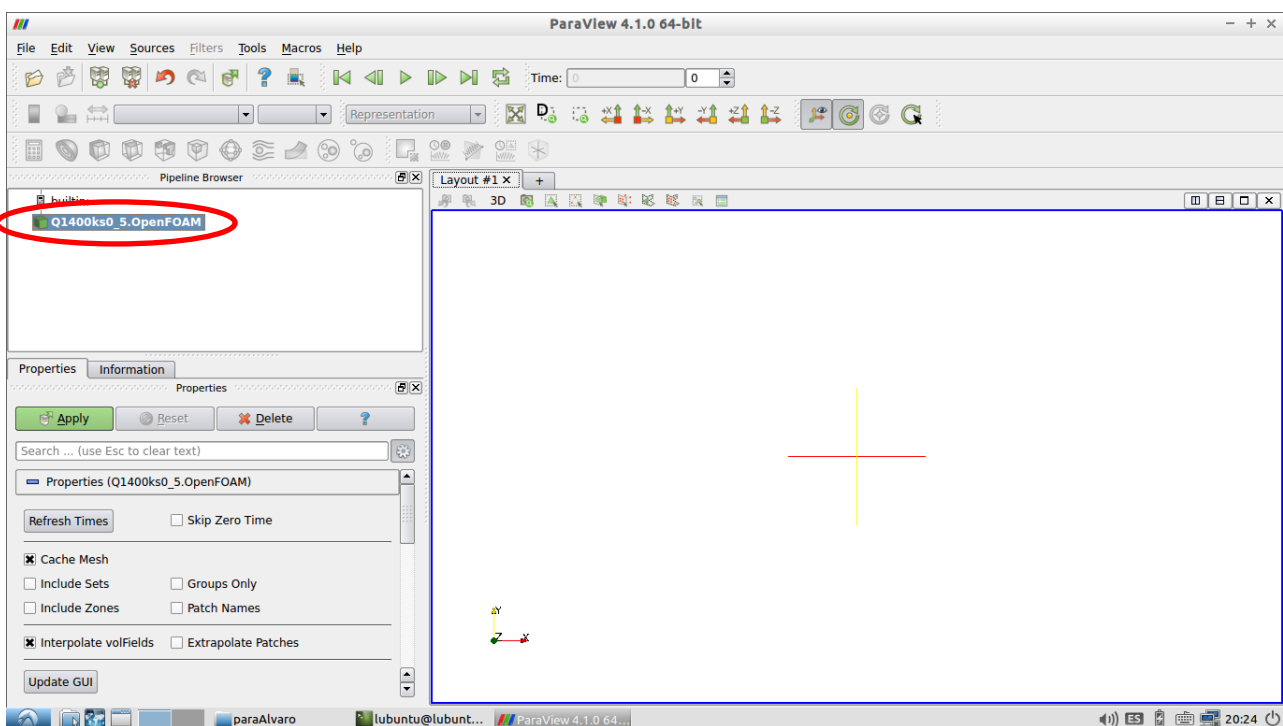
Una vez realizadas todas las simulaciones con diferentes condiciones iniciales, es hora de extraer sus resultados. Este proceso es lo que llamamos post-procesado. Para tal fin, haremos uso de la interfaz gráfica, incorporada en el software OpenFOAM denominada 'ParaView' que fue la misma que fue usada previamente para la visualización de la malla tras la finalización del proceso de mallado.

Esta interfaz permite un sinfín de posibilidades a la hora de extraer resultados. Podremos estudiar las variaciones de los diferentes parámetros (velocidades, presiones, líneas de corriente, etc.) por todo el volumen del problema de estudio, centrándonos en las dos fases que conforman el problema (agua y aire). Estos resultados finales serán extraídos generando mapas de isocontornos, que son imágenes del volumen fluido donde las variaciones de

colores junto con una escala nos permiten apreciar los valores que toman cualquier parámetro en las diferentes zonas, o bien, también tenemos la posibilidad de extraer gráficas en diferentes zonas de interés a lo largo del volumen fluido de un determinado parámetro. Esto facilita la visualización de unos resultados más exactos en caso de que se quiera entrar en más detalle para su análisis. También tenemos la opción de realizar un análisis de las líneas de corriente, herramienta muy útil para analizar las trayectorias que toman las partículas.

Por tanto, tras haber terminado el proceso de simulación, se deberá de lanzar la interfaz. Como no existe un icono en el escritorio, deberemos abrir el programa desde la pantalla de comandos. Para ello, una vez abierta la pantalla de comandos, nos situaremos en la carpeta creada en la simulación, y una vez ahí, se lanzará el programa OpenFOAM escribiendo 'of24' y pulsando 'enter'. Posteriormente, lanzaremos la interfaz gráfica ParaView escribiendo en pantalla 'paraFoam'.

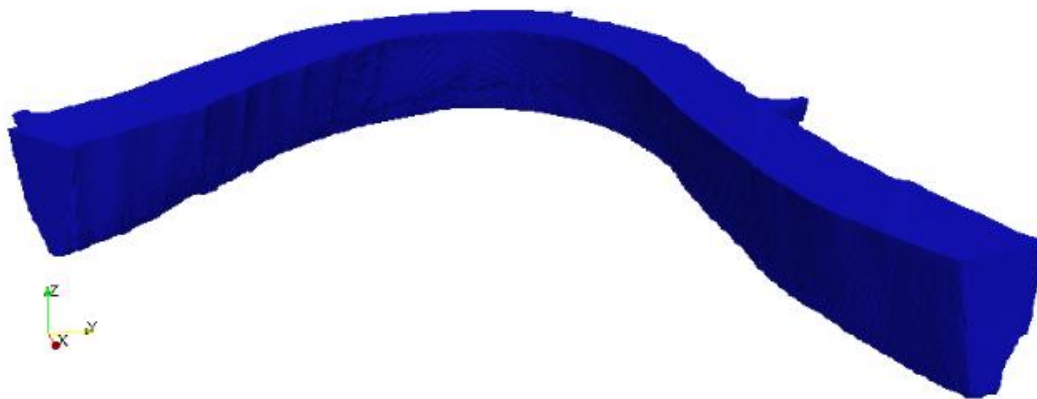
Entonces, se nos abrirá la interfaz con nuestra resolución del problema ya cargado como se muestra en la captura de pantalla 7.1, y nos dispondremos a extraer los resultados de los parámetros que estemos interesados y en las zonas que sean de interés.



Captura de pantalla 7.1. Pantalla inicial paraView.

7.1. Preparación previa

Lo primero que visualizaremos en pantalla será la malla sin color alguno, ya que no se ha seleccionado ningún parámetro para representar. Puesto que la dimensión Z de la malla es muy reducida en comparación con las otras dos dimensiones, con el fin de conseguir una mejor visualización de esta y de los posteriores resultados, se redimensionará, dándole a la dimensión Z un factor de escala de 20, de manera que la profundidad del cauce se alargará. Para realizar este paso, nos dirigiremos a las opciones de 'Display' de la pantalla de propiedades, y una vez ahí, en las opciones de 'Transforming', se modificará el tercer recuadro correspondiente a 'Scale'. De no realizar este paso, la visualización gráfica de los resultados resultaría poco clara y atractiva debido al pequeño tamaño de la misma. A causa de este redimensionamiento de la malla principal, todas las superficies, líneas de corriente, etc. que se crearán con posterioridad deberán de ser igualmente redimensionadas para que tengan las mismas proporciones que la imagen base de la malla y los resultados puedan ser mostrados correctamente. El resultado del redimensionamiento de la malla se muestra en la siguiente captura de pantalla.



Captura de pantalla 7.1.1. Malla redimensionada.

La malla ha sido dotada de un cierto grado de transparencia con el único fin de servirnos de referencia y que se pueda visualizar a través de ella las diferentes capas creadas para el análisis de los resultados. Para ello, en la pantalla '*Pipeline browser*', donde aparece nuestra solución cargada, seleccionaremos la capa correspondiente y en la ventana inferior, en las

opciones de 'Display' se modificará la opacidad hasta un valor de 0.14, produciéndose un esclarecimiento de la malla tras pulsar el icono 'Apply'.

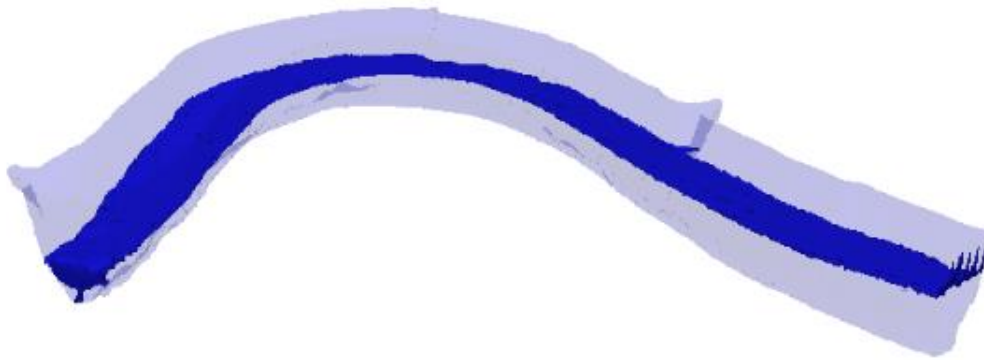


Captura de pantalla 7.1.2. Malla redimensionada con cierto grado de transparencia.

A continuación, comenzaremos con la creación de ciertas capas, es decir, de líneas y superficies en zonas concretas del volumen que van a servir como herramientas para el posterior análisis de los parámetros en estas zonas de interés del volumen fluido. A partir de su creación, se podrán representar en ellas diferentes parámetros, además de poder extraer gráficas.

Empezaremos con la representación de la superficie que hace de interfase entre el agua del río y el aire. Para ello, usaremos la función '**Contour**'. En problemas como el nuestro, donde coexisten más de una fase, como señalamos anteriormente, hay un parámetro, α (antes llamado γ), el cual indica la fase que se presenta en cada una de las celdillas. Un valor de 1 indicará que todo el volumen de la celdilla está ocupado solamente por aire. Por el contrario, un valor de 0 indicará que el volumen de la celdilla está ocupado únicamente por la fase acuosa. Un valor intermedio de 0.5, significará que la celdilla está ocupada por ambas fases y en cantidades idénticas, es decir, mitad agua y mitad aire. Por tanto, si queremos crear una superficie de la interfase, una vez seleccionada la función nombrada anteriormente, deberemos elegir en la ventana de propiedades, dentro de las opciones de display, '**Contour by Alpha Water**', dando un valor de 0.5 a la isosuperficie. De esta manera, crearemos una superficie formada por las celdillas cuyo valor α es 0.5, es decir, una superficie justamente donde se encuentra la interfase entre el agua y el aire. Gracias a esta

creación, podremos analizar las velocidades del agua a lo largo de toda la superficie del río estudiada, además del calado del mismo.



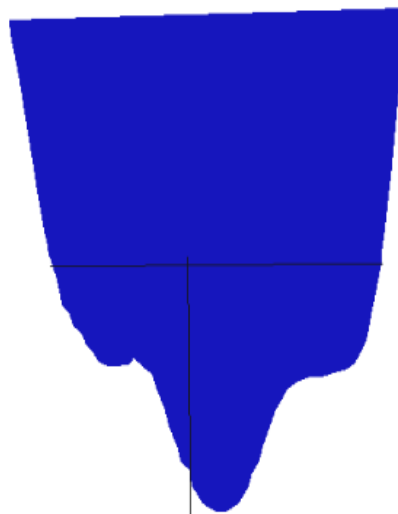
Captura de pantalla 7.1.3. Superficie de interfase.

Posteriormente, también resulta de gran interés estudiar las velocidades, tanto del aire como del agua, en diferentes planos transversales al flujo situados en el codo. Así, podremos obtener información de las velocidades no sólo en la superficie del agua, sino que tendríamos también información a lo largo del eje Z en ambas fases, es decir, desde el fondo río hasta la máxima altitud fijada en la simulación. Además, también podremos analizar la variación de presiones existente a lo largo del eje vertical, es decir, la variación de la presión con la altura. Por tanto, realizaremos tres planos en diferentes tramos de la curva (uno al principio, otro en la mitad y otro cercano a la salida) usando la función '**Slice**'. Estos deben de ser lo más transversales al flujo posible y ocupar al menos toda el área transversal de la malla. Para su creación, una vez hemos clicado en la función de crear plano, le asignaremos las coordenadas X, Y y Z para darle el emplazamiento y el tamaño deseado de manera que se cumpla lo que hemos señalado anteriormente. En la siguiente imagen se pueden visualizar los tres planos creados en el tramo del codo.



Captura de pantalla 7.1.4. Planos creados a lo largo del codo.

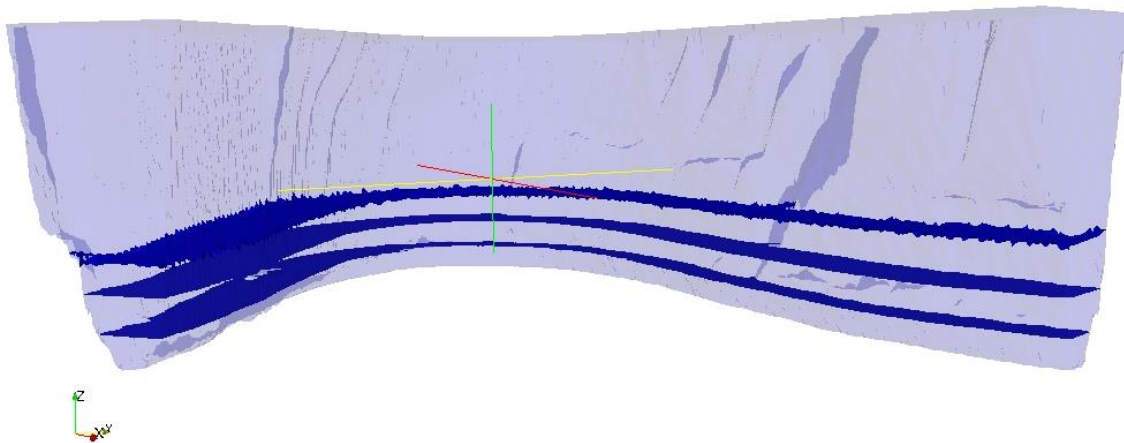
Adicionalmente, añadiremos unas líneas en el plano central del codo, una horizontal y otra vertical que pasen por el centro, de manera que posteriormente podamos analizar la variación de las velocidades a lo largo de las mismas, graficando los valores. La disposición de estas líneas puede observarse en la captura de pantalla 7.1.5, donde se muestra el plano con sus respectivas líneas.



Captura de pantalla 7.1.5. Plano central con líneas para análisis.

Otra herramienta que resulta de gran utilidad de cara al post-procesado es '**Stream Tracer**'. Ésta, nos permite representar las líneas de corriente de un flujo, de manera que podemos ver el camino o trayectoria que seguirían determinadas partículas desde su entrada hasta la salida. Por tanto, esto va a ser de gran utilidad para conocer los efectos o fenómenos que se producen en el interior del flujo del río, tales como cambios de dirección, remolinos, etc. Estas serán analizadas en el apartado siguiente.

Por último, también resulta de gran interés estudiar las velocidades del flujo de agua a diferentes alturas creando planos paralelos al flujo (Captura de pantalla 7.1.6). Para ello, se volverá a hacer uso de la función '**Slice**', y crearemos dos planos normales al eje Z por debajo de la superficie de interfase.



Captura de pantalla 7.1.6. Planos paralelos al flujo a diferentes alturas.

7.2. Análisis de resultados

Ahora, pasaremos al análisis de resultados en sí, extrayendo resultados individualmente para los dos casos estudiados (caudales 1.400 y 2.000 m³), además de realizar comparaciones entre ambos.

Velocidades

Superficie de interfase

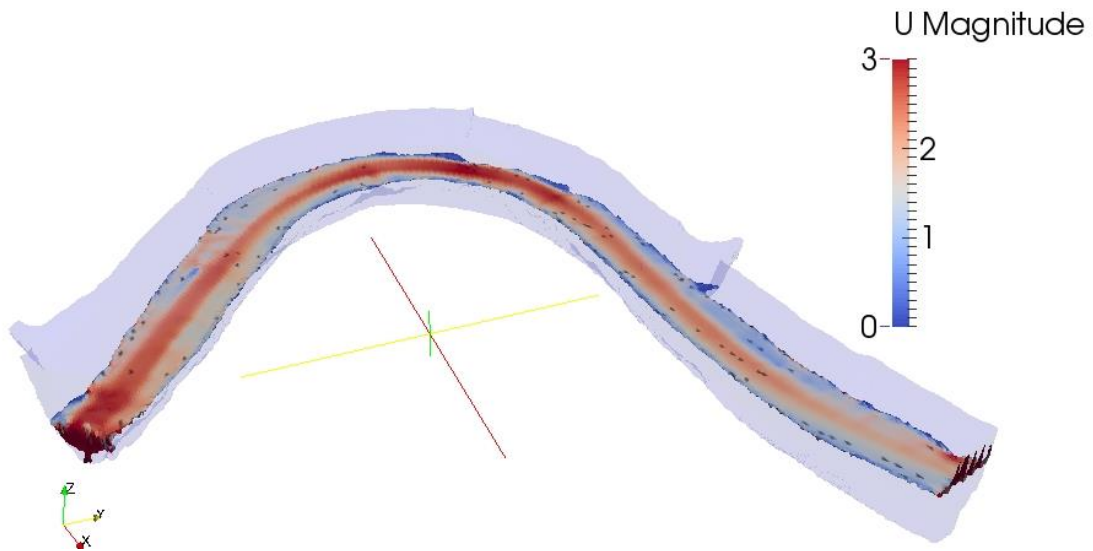
Anteriormente hemos visto cómo crear la superficie de interfase entre el agua y el aire. Ahora, una vez que tenemos esta superficie creada, es posible la realización de un exhaustivo análisis de las velocidades del flujo del río sobre esta superficie.

Para ello, bastará con situarse en la superficie creada en la pantalla *Pipeline Browser*, y una vez ahí, elegir el parámetro que queremos representar, es decir, 'U magnitud'. Posteriormente clicaremos en 'aplicar' y en pantalla aparecerá la superficie de interfase con una escala de colores en función de la velocidad. El rango de esta escala podrá ser editado con el fin de obtener una representación más clara del parámetro en cuestión sobre la superficie. Este proceso se repetirá para todos los posteriores procesos de visualización de los parámetros de interés en las superficies creadas.

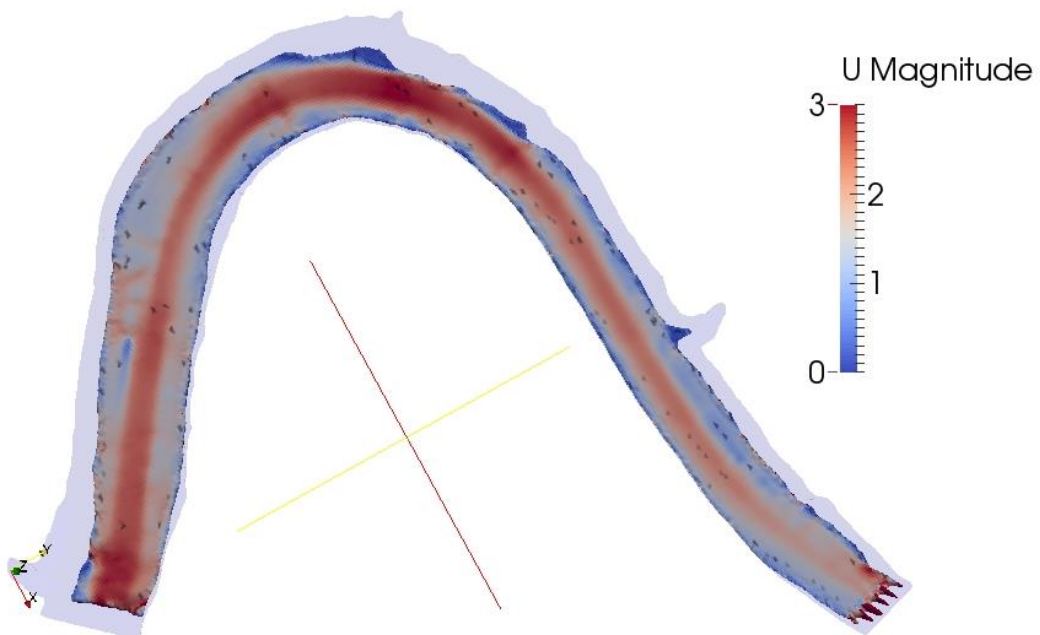
Así, obtendremos los siguientes resultados para las dos simulaciones realizadas.

En las siguientes imágenes se aprecia claramente por donde circula la corriente principal del río, es decir, la zona donde hay más caudal (Zona con color más rojizo). Se observa que la velocidad del flujo es mayor al inicio de la curva, denotado por el mayor tono rojizo en ambas figuras en esas zonas y que la corriente principal se desplaza ligeramente hacia el exterior de la curva debido a la fuerza centrífuga.

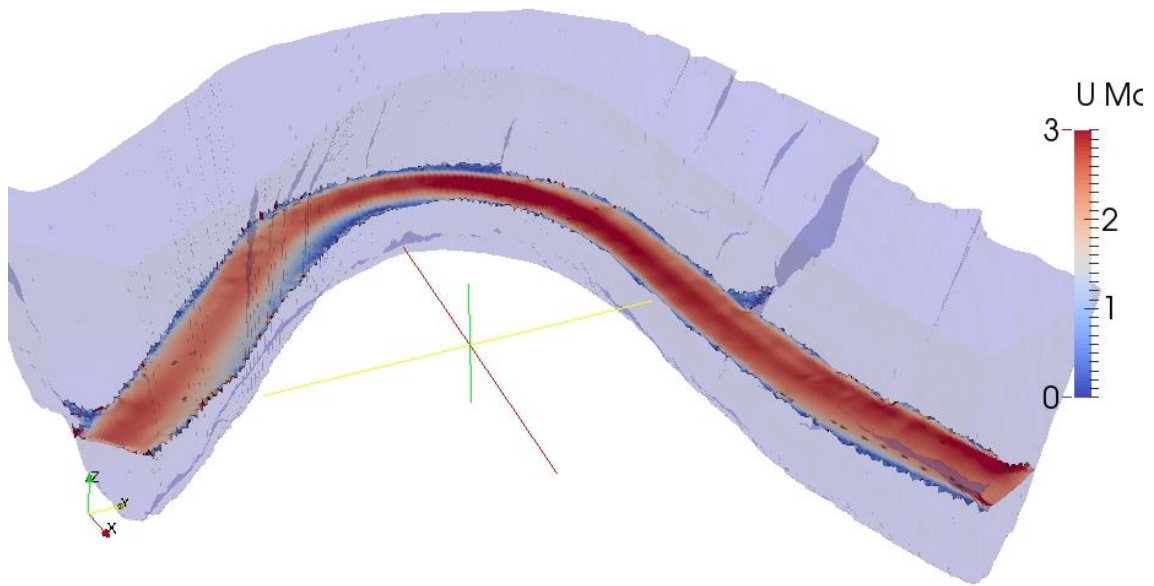
Comparando ambos casos, se distinguen pequeñas variaciones en la velocidad del flujo entre ambas. Así, en la segunda simulación, con un caudal de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ se obtienen unas velocidades ligeramente superiores denotadas por el tono más rojizo. La razón de esto es lógicamente la mayor cantidad de caudal, que hace que el agua del río se acelere.



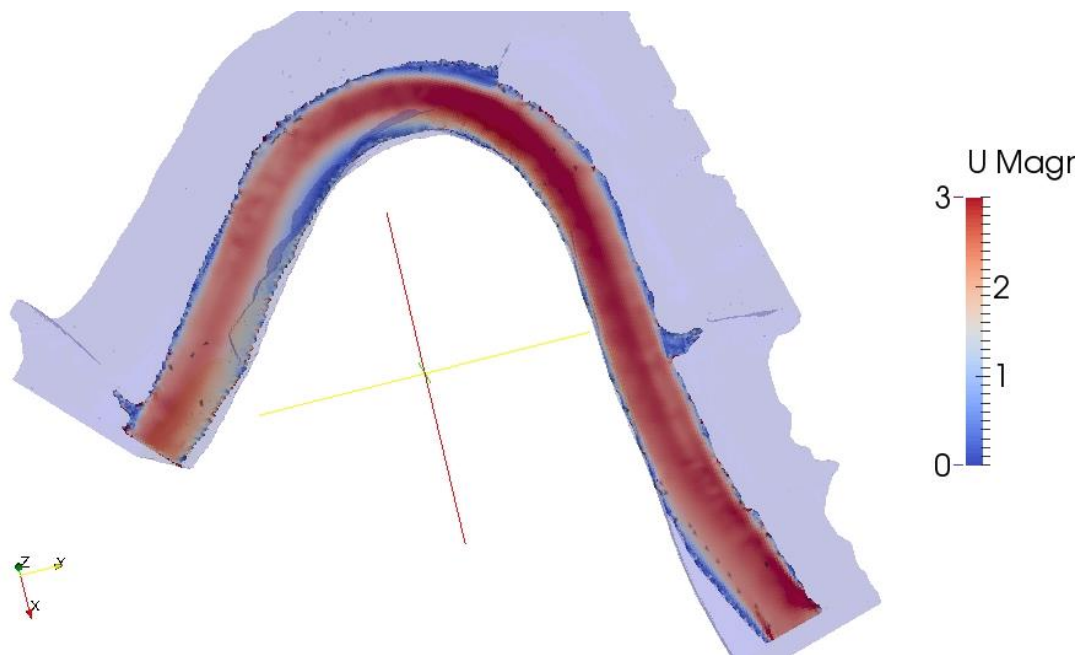
Captura de pantalla 7.2.1. Análisis de la velocidad en la interfase (Caudal de 1.400 m³).



Captura de pantalla 7.2.2. Análisis de la velocidad en la interfase (Caudal de 1.400 m³).



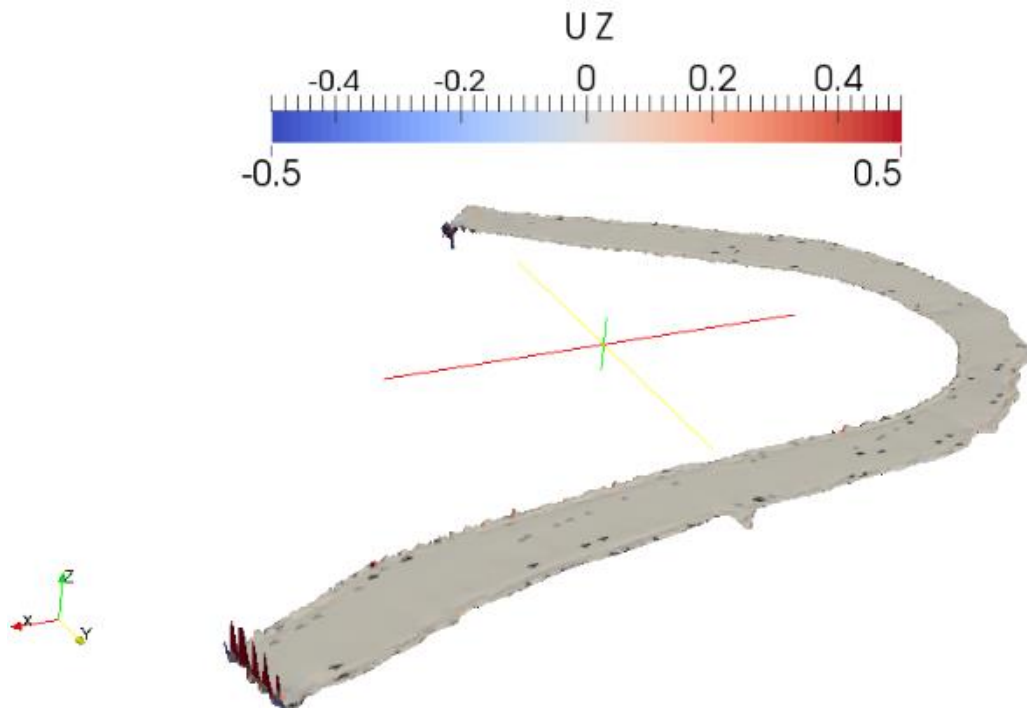
Captura de pantalla 7.2.3. Análisis de la velocidad en la interfase (Caudal de 2.000 m³).



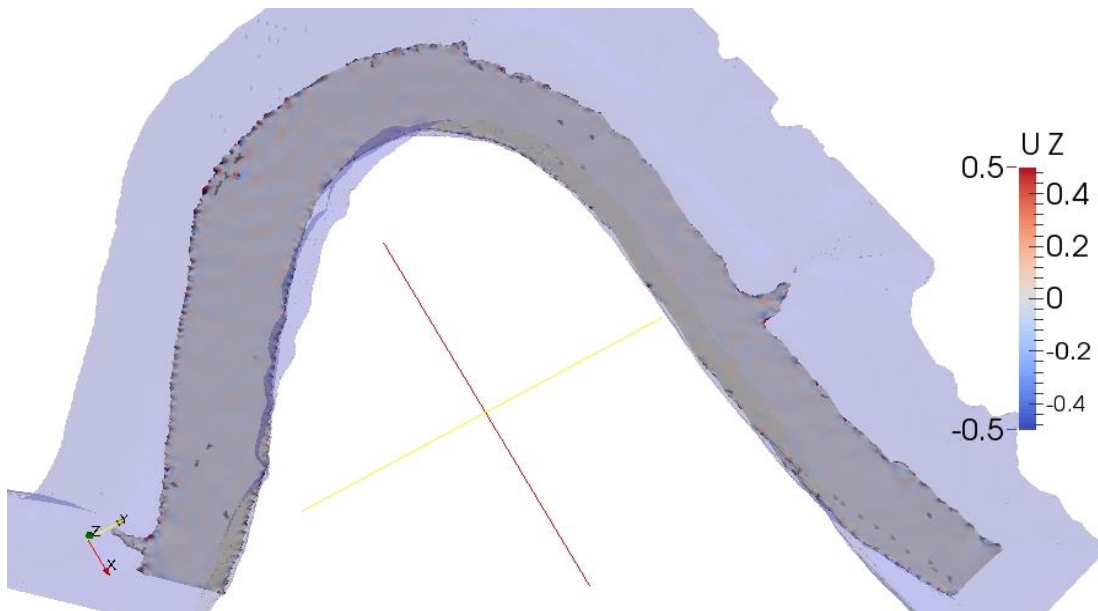
Captura de pantalla 7.2.4. Análisis de la velocidad en la interfase (Caudal de 2.000 m³).

Si representamos ahora la componente Z de la velocidad sobre esta superficie de interfase (Sólo para el caso de 2.000 m³, ya que resultaría redundante analizar ambos casos), vemos como prácticamente no existe movimiento en esta dirección, aunque pueden ser apreciadas pequeñas tonalidades azules y rojas cuando se disminuye el rango de la escala entre -0.5

y 0.5. Esto indica que existen pequeños movimientos en esta dirección, provocados principalmente por el mínimo oleaje presente en la superficie de los ríos que es producido en su movimiento.



Captura de pantalla 7.2.5. Análisis de la componente Z de la velocidad en la interfase (Caudal de 2.000 m³).

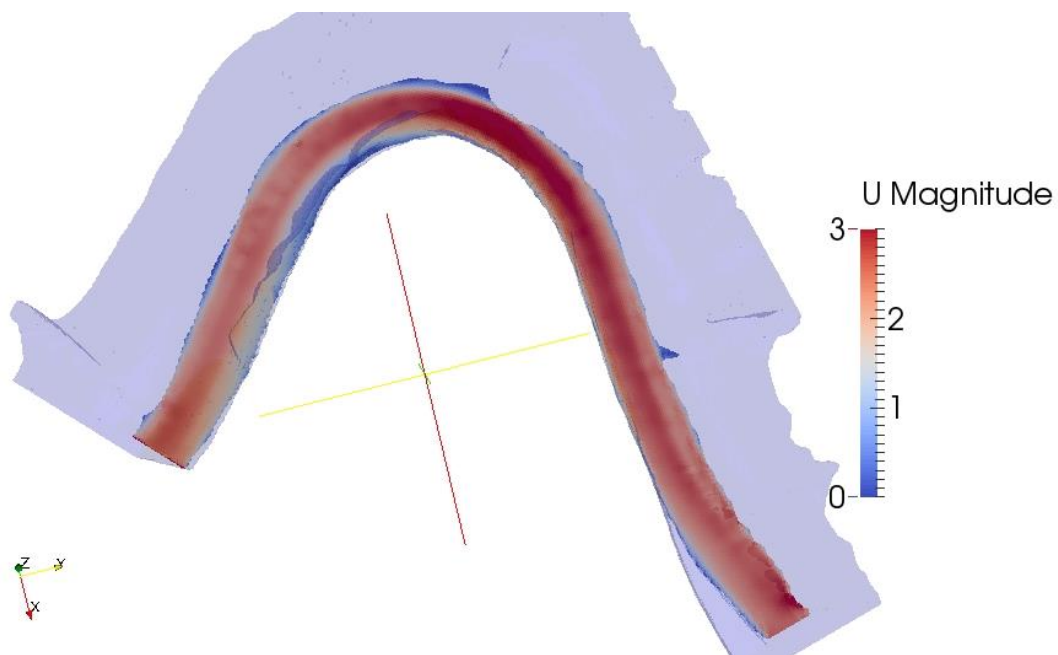


Captura de pantalla 7.2.6. Análisis de la componente Z de la velocidad en la interfase (Caudal de 2.000 m³).

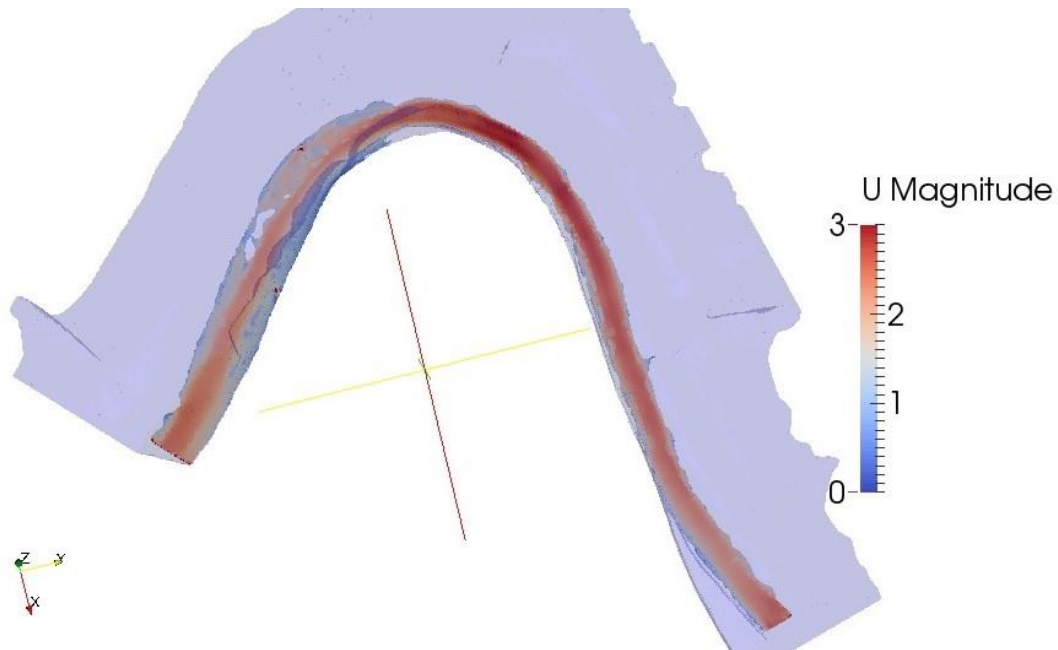
Planos paralelos intermedios

Ahora, se procede al análisis de las velocidades en los planos intermedios paralelos al flujo (Sólo para el caso de 2.000 m^3). Fijándonos en las capturas de pantalla 7.2.7 y 7.2.8, vemos que las velocidades se mantienen más o menos constantes con respecto a la superficie de interfase en el primer corte (180 metros de altura). Sin embargo, no ocurre lo mismo en el segundo corte (177 metros de altura), en donde la velocidad sí que disminuye en gran medida, como consecuencia de estar ya a una altura muy cercana al fondo del cauce donde ya están presentes los esfuerzos viscosos. Con este análisis nos podemos hacer una idea de cómo varía la velocidad del flujo en función de la altura. No obstante, esto será analizado de manera más clara e intuitiva más adelante en los posteriores análisis.

Además, también se aprecia que el área de los planos disminuye conforme nos situamos en un plano más cercano al fondo, efecto debido a la forma cóncava que presenta el cauce.



Captura de pantalla 7.2.7. Análisis de la velocidad en un plano intermedio a 180 m.



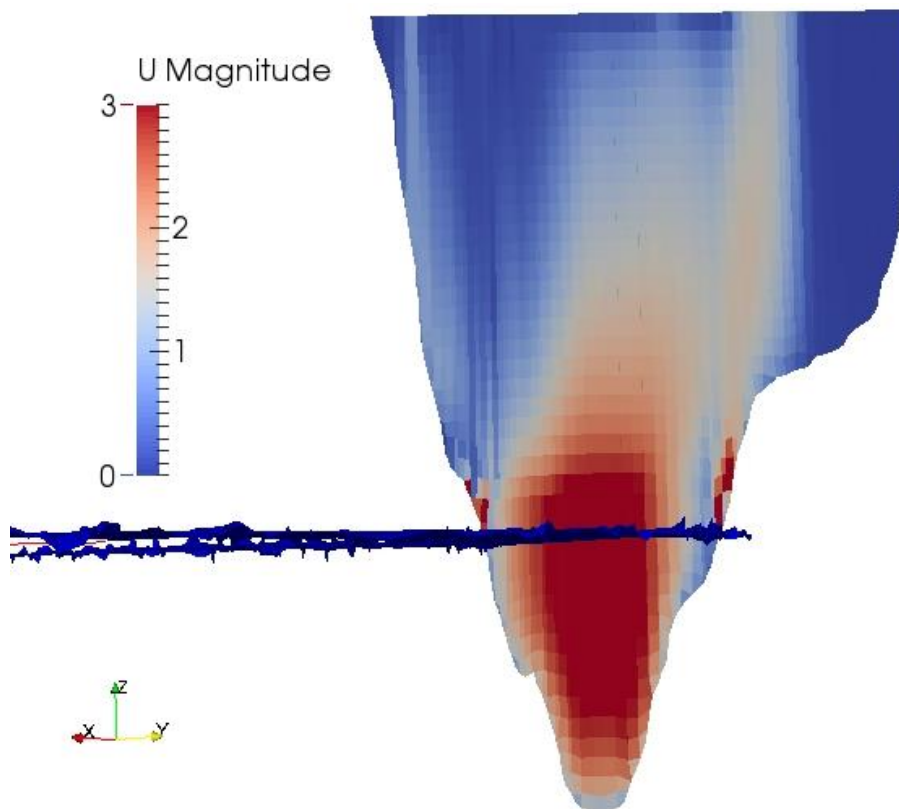
Captura de pantalla 7.2.8. Análisis de la velocidad en un plano intermedio a 177 m.

Planos transversales al flujo en el tramo curvo

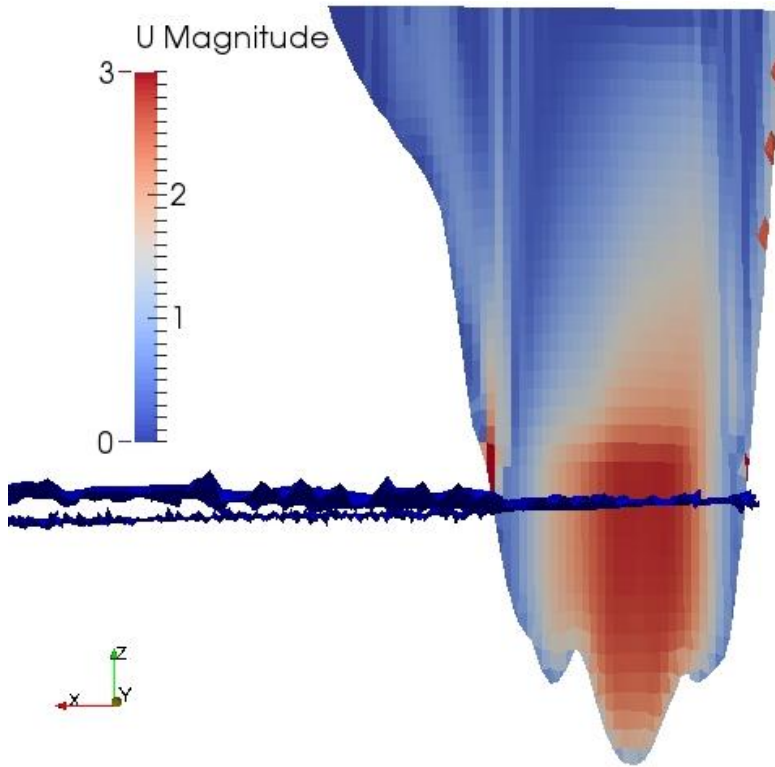
A continuación, vamos a estudiar las velocidades en los tres planos creados en el codo de la curva (Sólo para el caso de caudal 2.000 m^3). En ellos, podemos ver la interfase que separa ambos fluidos y los planos con una escala de colores que representan las velocidades. Se aprecia como el flujo del río va perdiendo velocidad a medida que se van sucediendo los planos desde el inicio del codo hasta el final. Como se señaló anteriormente, al inicio de la curva el flujo se acelera (Primer plano), y esta velocidad va disminuyendo a medida que avanzamos por el codo hasta que a la salida se estabiliza de nuevo, adquiriendo su velocidad inicial antes de entrar en la curva. Esta evolución se observa claramente analizando los tres planos siguientes. En ellos vemos como en el primer plano, al inicio de la curva, tenemos unos tonos más rojizos, tonos que van siendo más débiles progresivamente en los siguientes dos planos.

Haciendo un análisis de la geometría del cauce, destaca que posee una forma en depresión cóncava donde los picos más profundos del mismo coinciden con las zonas más rojizas, es decir, las zonas donde la corriente del río es más fuerte. Esto se debe a la erosión que provoca el flujo, de manera que, en las zonas donde las velocidades son mayores se produce una mayor erosión debido

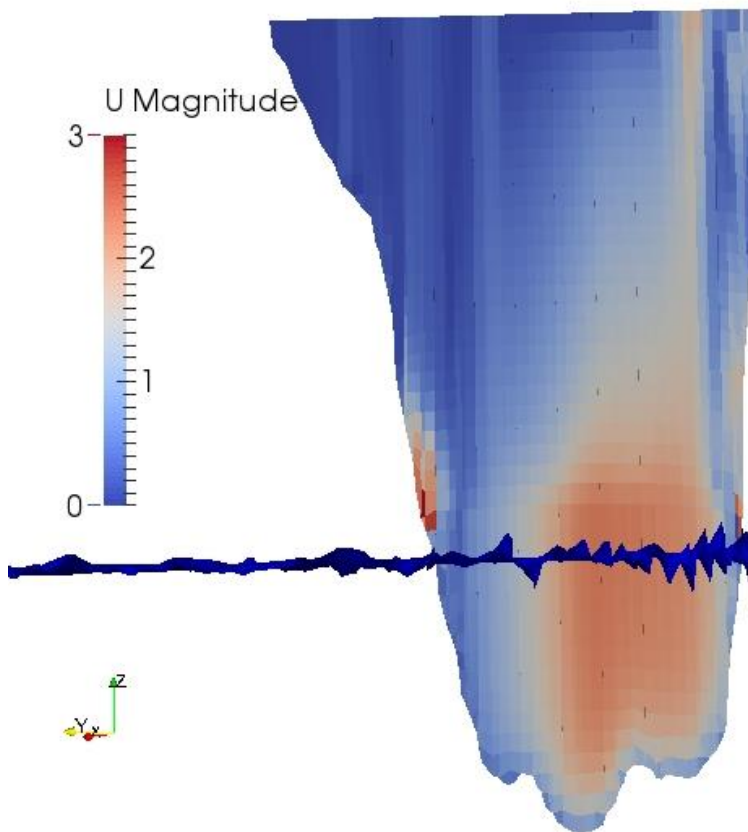
a las fuerzas del flujo sobre el fondo y las paredes del terreno. En las zonas curvas de los ríos, debido a la fuerza centrífuga, el flujo principal del río donde se producen las corrientes más fuertes tiende a desplazarse hacia el exterior de la curva. Esto provoca que la parte más profunda tienda a estar algo desplazada hacia el exterior del codo del mismo modo que la corriente. Este efecto apenas se puede apreciar en nuestro problema puesto que estamos realizando un análisis para una inundación puntual en un periodo determinado, de manera que los corrientes que producirían la erosión en nuestro problema no corresponde con la erosión real que se produce en el río durante la mayor parte del tiempo en periodos de no inundación.



Captura de pantalla 7.2.9. Plano transversal al flujo al inicio del codo.



Captura de pantalla 7.2.10. Plano transversal al flujo a mitad del codo.



Captura de pantalla 7.2.11. Plano transversal al flujo al final del codo.

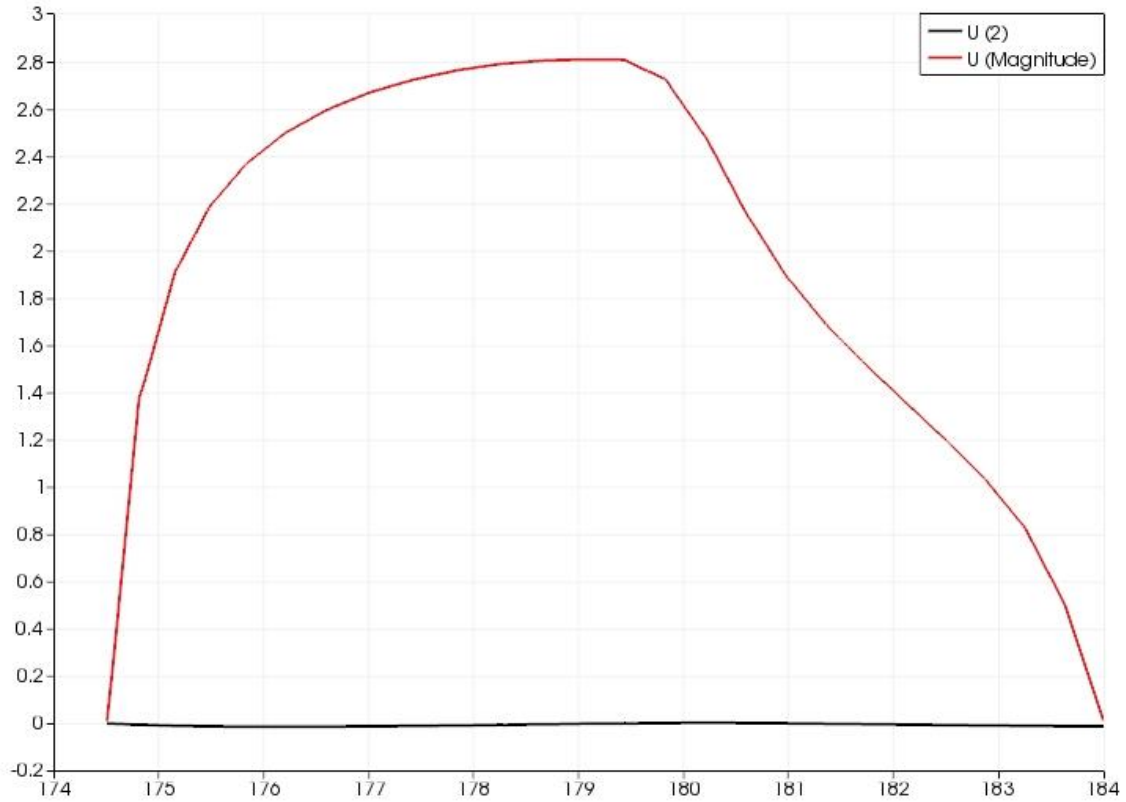
Una vez visto esto, se muestra una comparativa entre los datos de las velocidades en el plano transversal al cauce situado en la mitad del codo de los dos casos de estudio. En ellas se representan el perfil de velocidades tanto vertical (desde el fondo hasta parte superior del aire) como horizontal (superficie del río), además de un análisis de la componente Z de la velocidad a lo largo de la vertical del río en ese plano.

Primeramente, se analizará el perfil vertical de ambos problemas (Gráficas 7.2.1 y 7.2.2).

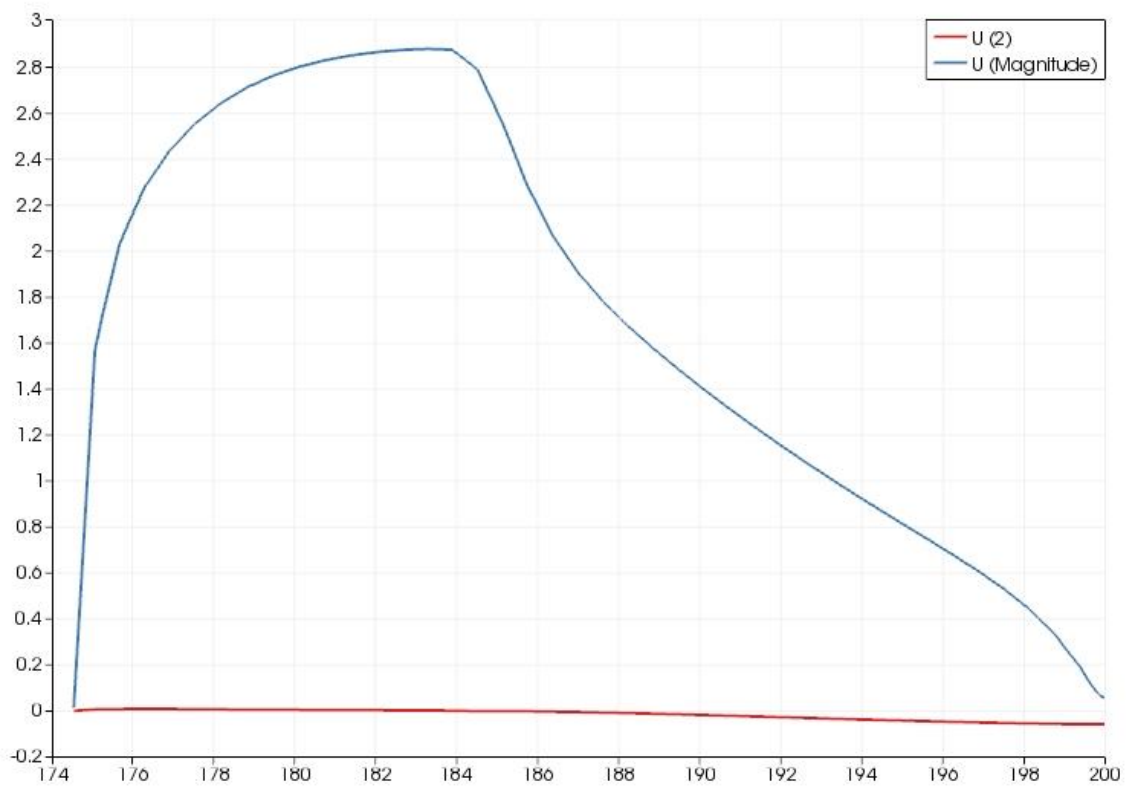
En ambos casos el perfil de velocidad presenta una forma similar, en el que la velocidad aumenta rápidamente una vez nos alejamos del fondo y una vez alcanza un valor cercano al máximo, empieza a crecer más lentamente hasta alcanzar el máximo de la velocidad en la superficie de interfase. Seguidamente, analizando la fase de aire, se aprecia que, en la superficie del agua, este aire se mueve con la misma velocidad debido a los esfuerzos viscosos. Sin embargo, esta velocidad empieza a decrecer drásticamente a medida que nos separamos de la superficie del río hasta que finalmente alcanza una velocidad nula una vez fuera de las influencias de los esfuerzos viscosos de la fase acuosa. Focalizando ahora en las discrepancias entre ambos casos, vemos que existe una diferencia aproximada de 0.1 m/s en los picos de velocidades alcanzados (2.9 y 2.8 m/s).

En cuanto respecta al análisis de la componente Z de la velocidad, se comprueba en ambas gráficas que la velocidad es prácticamente 0 no existiendo por tanto nada más que componentes en un mismo plano. La ligera inclinación hacia abajo se debe principalmente a que el río posee inclinación, no siendo el plano dibujado en el post-procesado totalmente transversal al flujo.

Aunque atendiendo a los resultados de esta gráfica podemos afirmar que no existe movimiento vertical del flujo de agua, posteriormente desmentiremos esta apreciación, ya que en la zona del codo se produce un movimiento de las partículas que circulan por el fondo hacia la superficie y viceversa. Estos movimientos de todas estas partículas hacen que las componentes verticales de velocidad negativas de unas partículas se contrarresten con las de las otras, de manera que en la gráfica aparecen velocidades 0 en la componente Z.

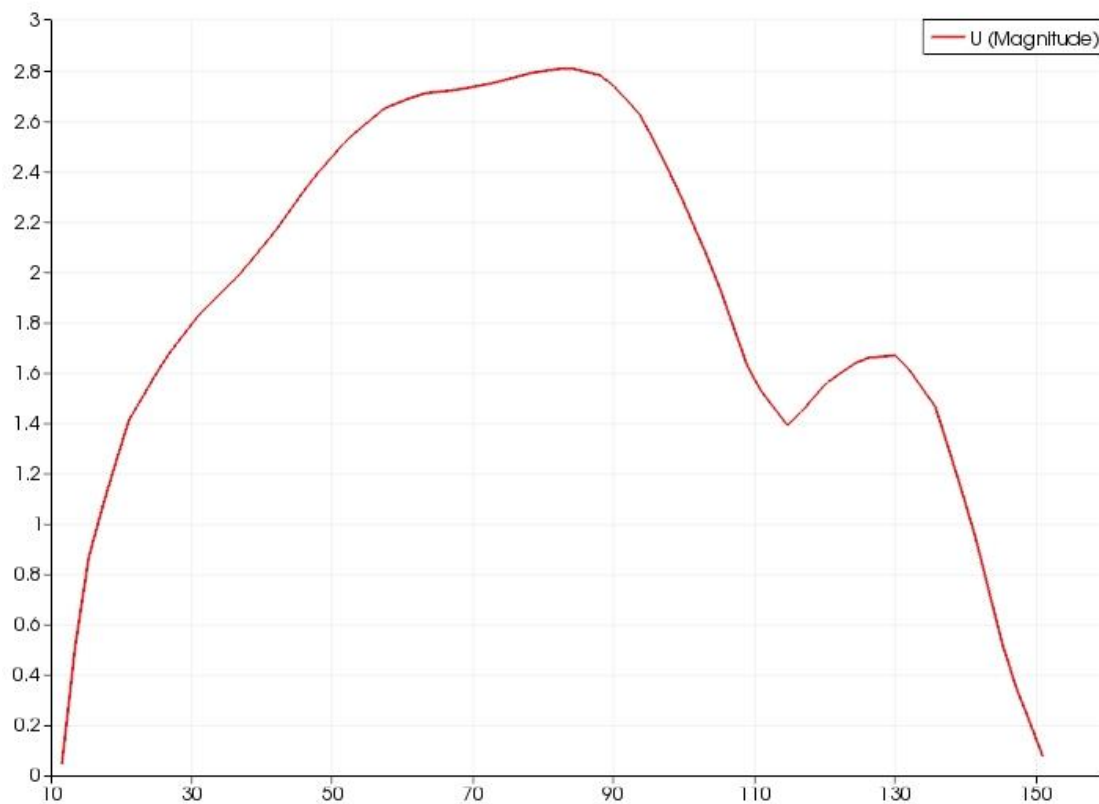


Gráfica 7.2.1. Perfil vertical de velocidad en el plano medio (Caudal 1.400 m³).

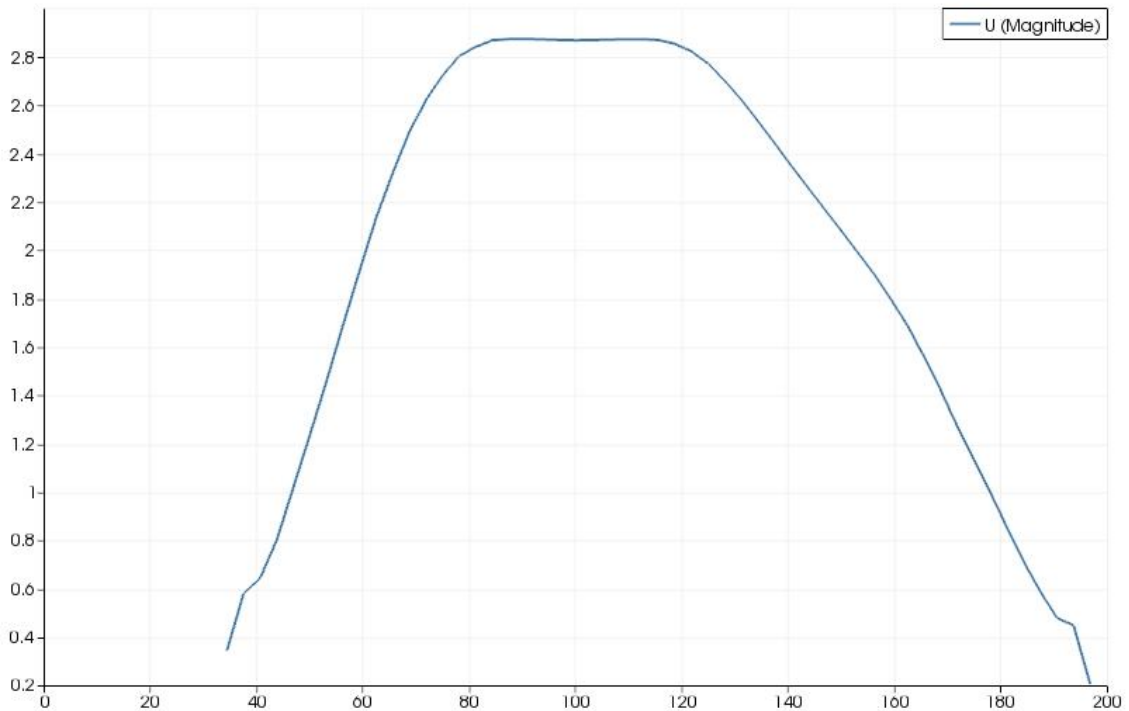


Gráfica 7.2.2. Perfil vertical de velocidad en el plano medio (Caudal 2.000 m³).

En lo que respecta a los perfiles horizontales en la superficie del agua (Gráficas 7.2.3 y 7.2.4), vemos que las máximas velocidades se consiguen aproximadamente en el centro del cauce, de manera que, si nos alejamos hacia las márgenes del río, la velocidad va disminuyendo poco a poco hasta que alcanza el valor cero en las paredes laterales del cauce debido los esfuerzos viscosos. De igual manera que antes, existe una discrepancia entre los valores de los dos casos estudiados de 0.1 m/s.



Gráfica 7.2.3. Perfil horizontal de velocidad en el plano medio (Caudal 1.400 m³).



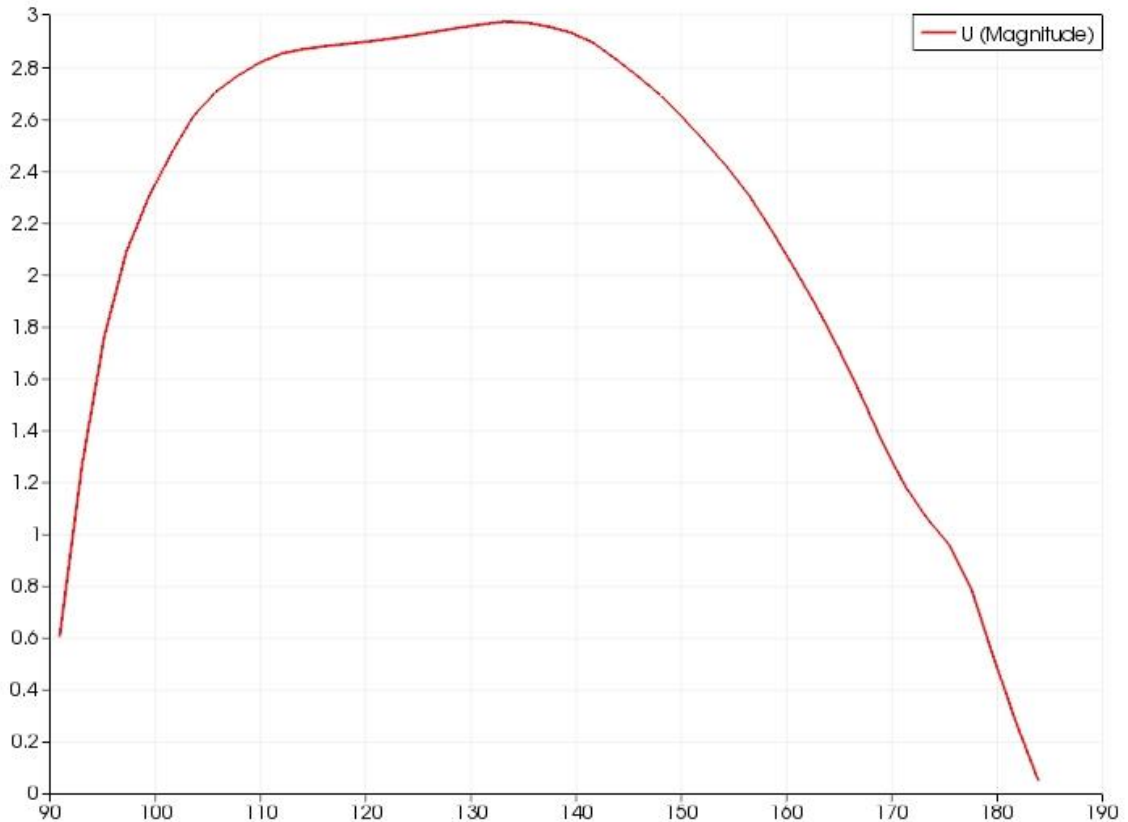
Gráfica 7.2.4. Perfil horizontal de velocidad en el plano medio (Caudal 2.000 m³).

Comparación de velocidades máximas

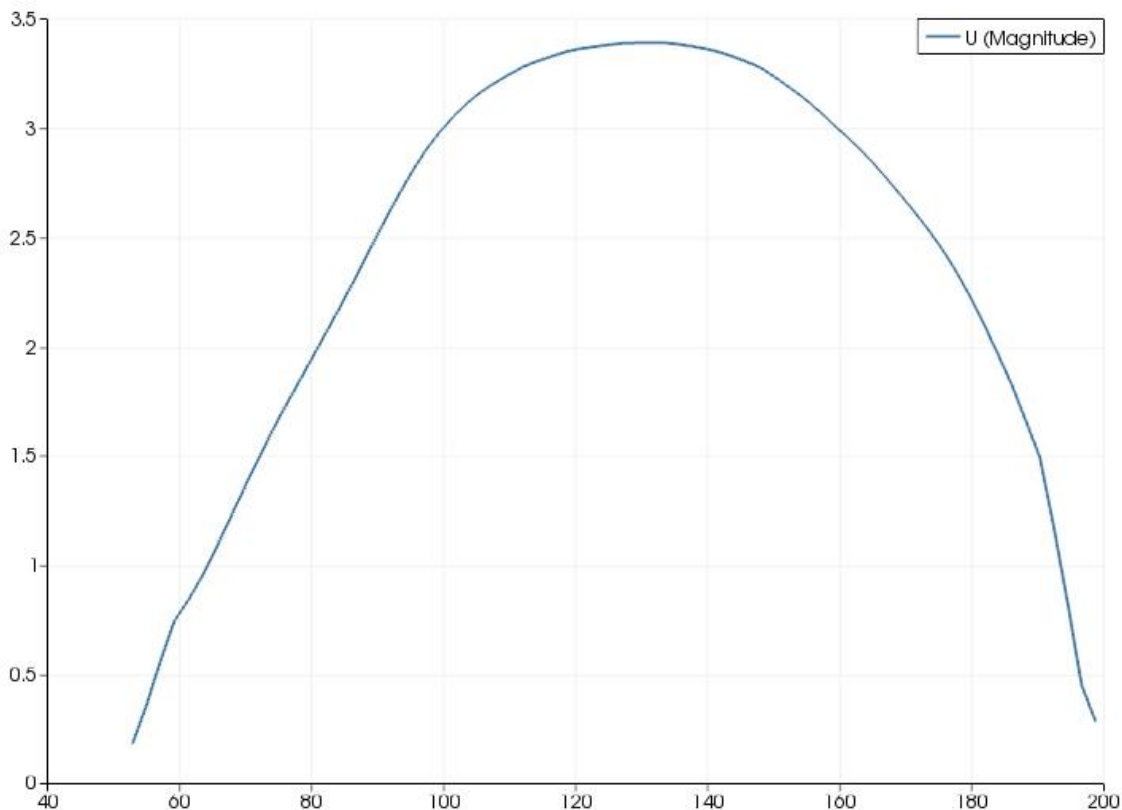
A continuación, se presenta una comparativa entre el perfil de velocidades horizontal de ambos casos en la zona del codo donde aumentan las velocidades del flujo y por tanto supone la zona con las velocidades máximas dentro de la franja de estudio.

Como el origen del problema es el mismo y solamente hemos variado el caudal, tenemos que el perfil de velocidades en ambos estudios presenta igual tendencia. La principal diferencia radica en los puntos máximos que se alcanzan. Vemos, como acabamos de señalar, que para el caso con caudal mayor se alcanza una velocidad superior, que llega a alcanzar los 3.5 m/s. Sin embargo, para el caudal de 1400 m³, las velocidades máximas alcanzadas están muy cercanas a 3 m/s, por lo que existe una diferencia de aproximadamente 0.4 m/s que es producto de este aumento de caudal.

Otro dato a recalcar es la tendencia que tiene el punto máximo en ambas gráficas hacia la derecha, que indica, como se ha señalado anteriormente, el desplazamiento del flujo principal del río a la zona exterior de la curva, como consecuencia de la aceleración centrípeta que se da en su movimiento curvilíneo.



Gráfica 7.2.5. Perfil horizontal de velocidad máxima (Caudal 1.400 m³).



Gráfica 7.2.6. Perfil horizontal de velocidad máximo (Caudal 2.000 m³).

Calado

Uno de los aspectos más importantes a analizar es lo que llamamos el calado, es decir, la profundidad que tiene el río. Un análisis del calado nos permitirá obtener datos sobre el nivel máximo de la superficie del río en las diferentes inundaciones. Además, podrá ser analizada la variación del calado a lo largo del ancho del río, información que solamente puede ser obtenida por medio de simulaciones tridimensionales y que justifica la presencia de las fuerzas centrípetas y de Coriolis en el movimiento curvilíneo que desarrolla el flujo de agua en el tramo del codo. Todos estos datos de altura máxima y calado obtenidos para diferentes caudales extremos, resultan de gran utilidad a la hora de estimar la magnitud de una posible inundación y las posibles zonas que podrían verse afectadas, así como los posibles daños que ésta provocaría.

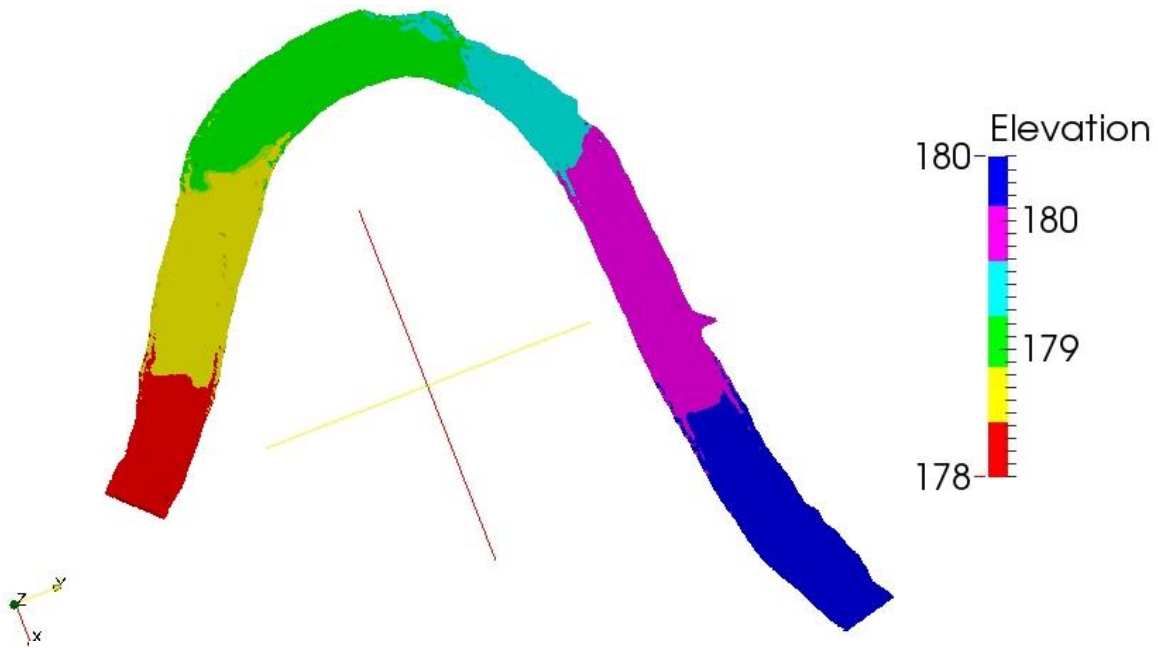
A continuación, se estudiarán las siguientes imágenes procesadas en ParaView, que representan los datos del calado para las dos simulaciones realizadas. En ellas se puede ver la superficie de interfase entre el agua del río

y el aire que fluye sobre este con una escala de colores que dan información de las alturas correspondientes a cada tramo. Esta vez las imágenes no han sido procesadas con una escala gradual donde el color varíe desde el tono azul hasta el rojo pasando por todas las demás tonalidades entre medias, sino que ahora tenemos una escala con diferentes colores, de manera que los resultados puedan visualizarse con mayor claridad, existiendo un mayor contraste entre las diferentes alturas a lo largo del trayecto del río.

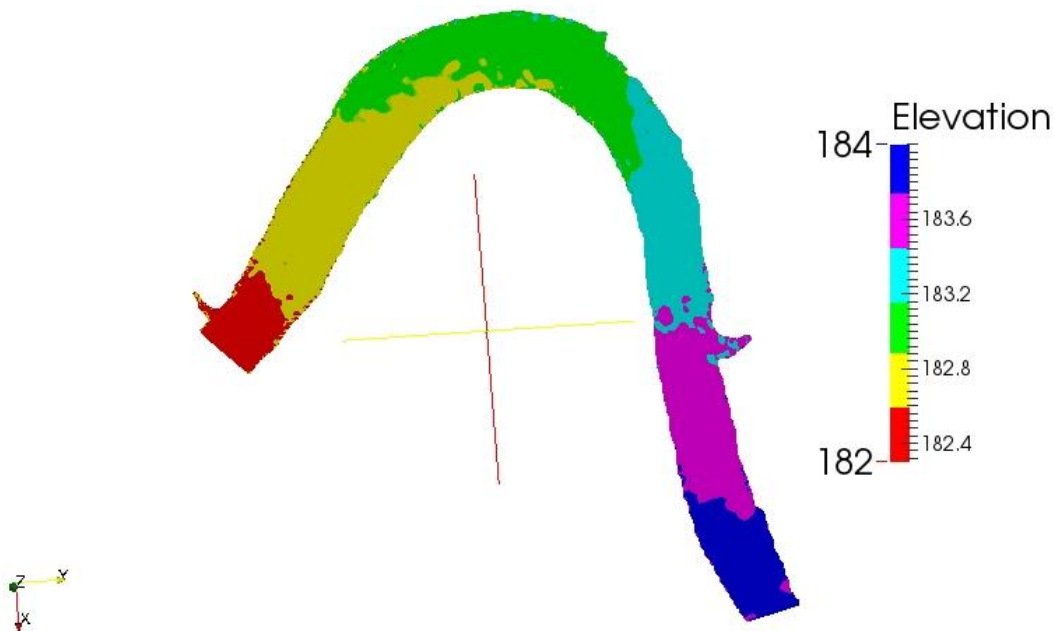
En las capturas 7.2.12 y 7.2.13 se ha estudiado la altura a lo largo de todo el tramo de estudio en ambas simulaciones, obteniendo datos generales de las mismas.

En la primera simulación, con caudal $1400 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtiene una altura en su zona más alta es de 180.4 metros. Sin embargo, analizando la imagen para caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, vemos que la altura aumenta, como es de esperar, hasta los 184 metros. Por tanto, existe una diferencia de altura considerable entre ambas inundaciones que llega a ser de 3.6 metros. Esto hace que los daños en la segunda inundación sean de bastante mayor consideración, afectando a una mayor superficie de terreno y llegando hasta alturas superiores.

Pero este aumento de caudal no solo se traduce únicamente en una ampliación de la sección transversal del flujo del agua, sino que como hemos visto anteriormente también se produce un pequeño aumento de la velocidad del flujo, de manera que un aumento de caudal no hace aumentar el nivel máximo del agua del río en su misma proporción. Este efecto es mucho más acusado en zonas cercanas a la desembocadura de los ríos donde se produce lo que llamamos como un cauce calibrado. Esto significa que la mayor cantidad de agua que transporta el río no se traduce en un aumento considerable de su nivel, sino de velocidad, ya que el nivel del agua del río no puede desviarse mucho hacia arriba, por estar casi al mismo nivel del mar.



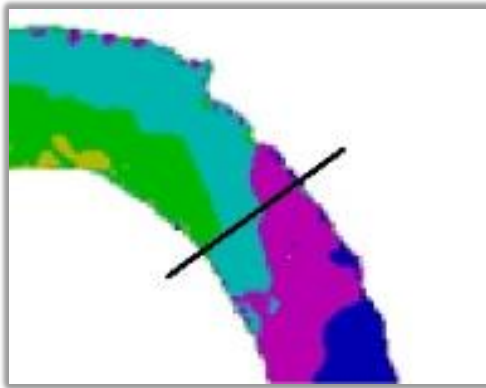
Captura de pantalla 7.2.12. Análisis del calado (Caudal 1.400 m³).



Captura de pantalla 7.2.13. Análisis del calado (Caudal 2.000 m³).

Con el fin de obtener mayor información en el tramo curvo, donde existe la aceleración centrípeta y, por tanto, donde el nivel de agua goza de cierto grado de inclinación, se ha reducido el rango de la escala en ambos ejemplos de manera que focalicemos en el tramo del codo y se puedan apreciar con más exactitud las diferencias de alturas entra la zona interna de la curva y la externa.

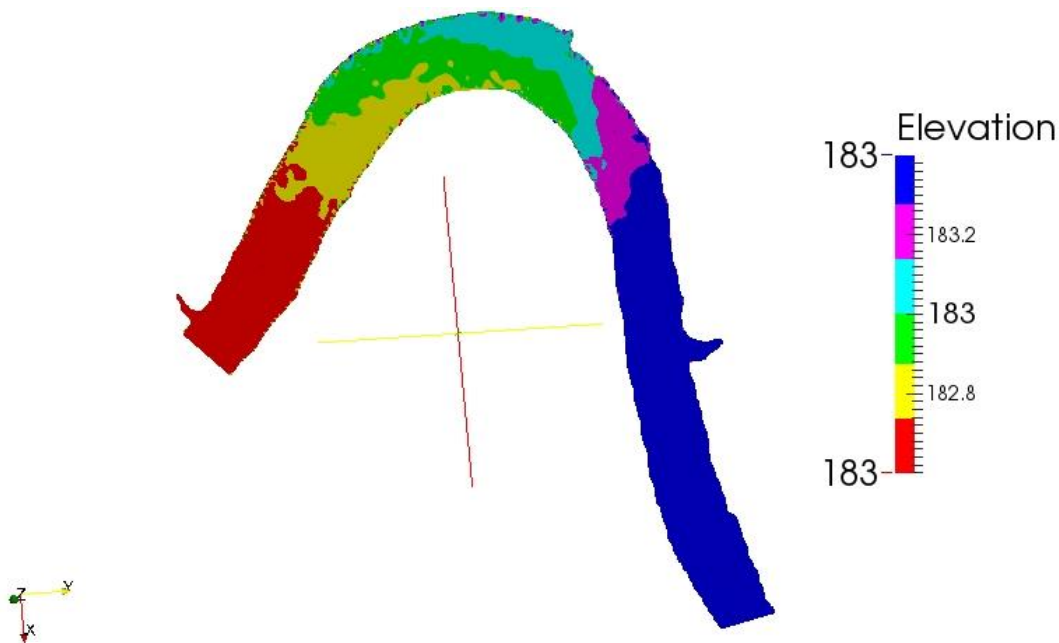
Analizando minuciosamente ambas imágenes se puede afirmar que existe una diferencia de altura entre la parte interior y exterior de unos 20 cm en ambas imágenes.



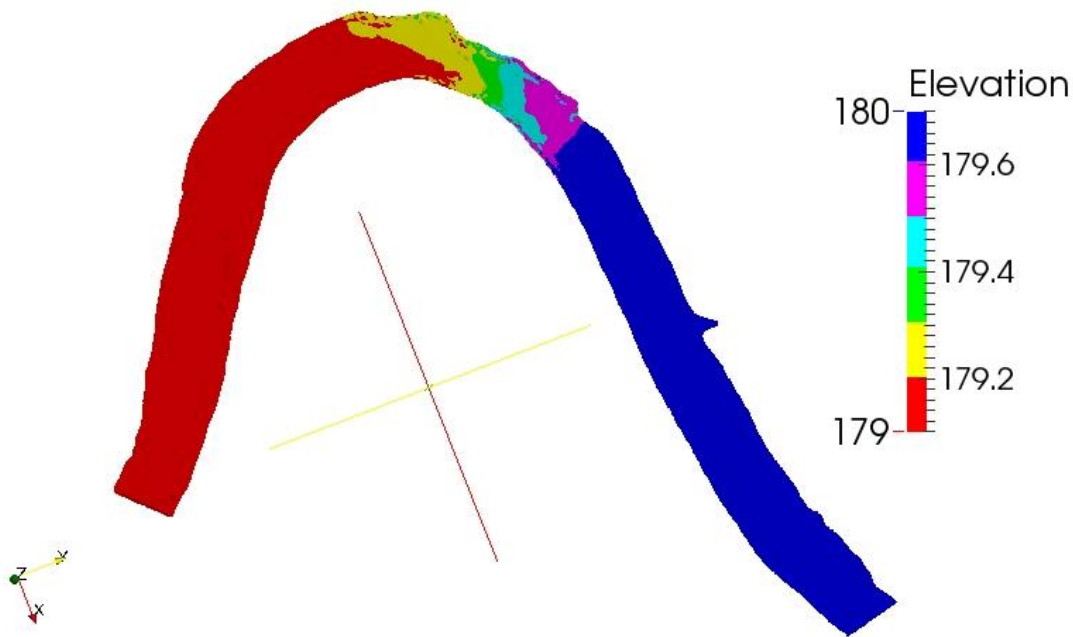
La manera de llegar a esta conclusión es simple. Se ha trazado una línea transversal al flujo en el tramo de la curva donde las velocidades son mayores (primer tramo del codo), de manera que, guiándose por la escala de colores podemos llegar a afirmar ese resultado, ya que vemos que el cambio de color o rango de alturas en la curva no se produce en cortes transversales, sino que los colores correspondientes a alturas superiores se extienden por la parte externa de la curva.

produce en cortes transversales, sino que los colores correspondientes a alturas superiores se extienden por la parte externa de la curva.

En este caso, las discrepancias en ambas simulaciones son inapreciables, puesto que las velocidades del flujo, que son las que determinan la inclinación, son muy similares en los dos casos.



Captura de pantalla 7.2.14. Análisis del calado en el codo (Caudal 1.400 m³).



Captura de pantalla 7.2.15. Análisis del calado en el codo (Caudal 2.000 m³).

Líneas de corriente

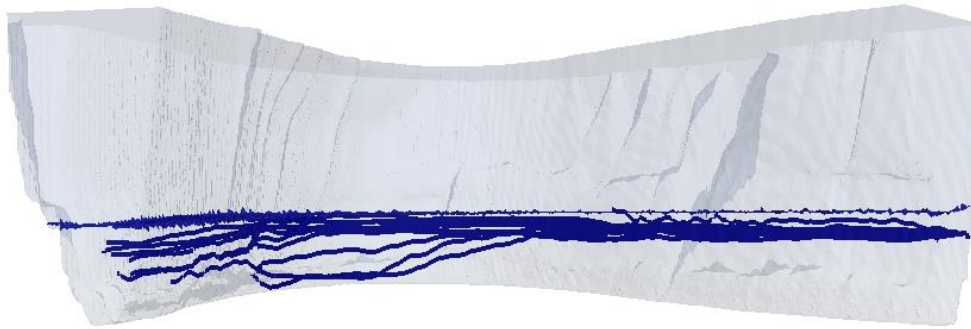
Definimos líneas de corriente como el lugar geométrico de los puntos tangentes al vector velocidad de las partículas del fluido en un instante ‘t’ determinado. Es decir, una línea de corriente nos marca el recorrido o trayectoria que toma una determinada partícula en el seno de un fluido en un tramo. [14]

Puesto que en ambas simulaciones se analiza una misma problemática y se obtienen resultados similares sin existir diferencias significativas comparables entre ambas, tan solo se analizará una de las dos simulaciones, que en este caso será la de caudal 2000 m³/s. Es decir, los resultados obtenidos son generales y se cumplen para cualquier caudal.

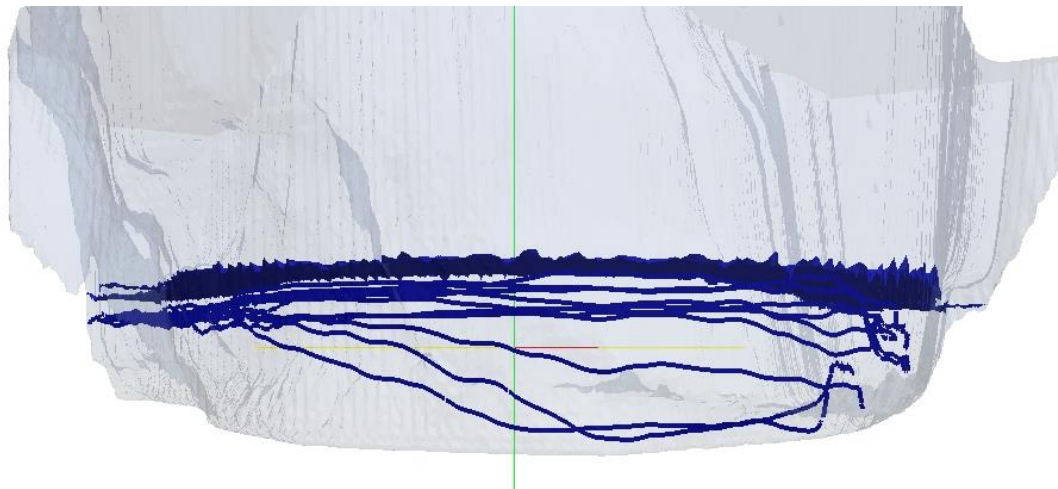
Para obtener resultados concluyentes por todo el volumen del problema, analizaremos las líneas de corriente tomadas a diferentes alturas al inicio del tramo, de manera que establezcamos un comportamiento global del flujo.

Primeramente, estudiaremos las líneas de corriente cuyo origen está a una altura de 182 metros (Capturas de pantalla 7.2.16 y 7.2.17), es decir, un origen situado cerca de la superficie del flujo. Se aprecia como las partículas del flujo que, en un principio, antes de llegar a la curva, se encontraban en la parte superior y se movían paralelamente al flujo, al alcanzar el primer tramo de la

curva, parte de ellas cambian su dirección, teniendo cierta componente vertical que hacen que estas se dirijan hacia el fondo. Este cambio de dirección se produce justamente al inicio de la curva y una vez las partículas se encuentran en la mitad del tramo curvo vuelven a recuperar su movimiento horizontal y paralelo al flujo.



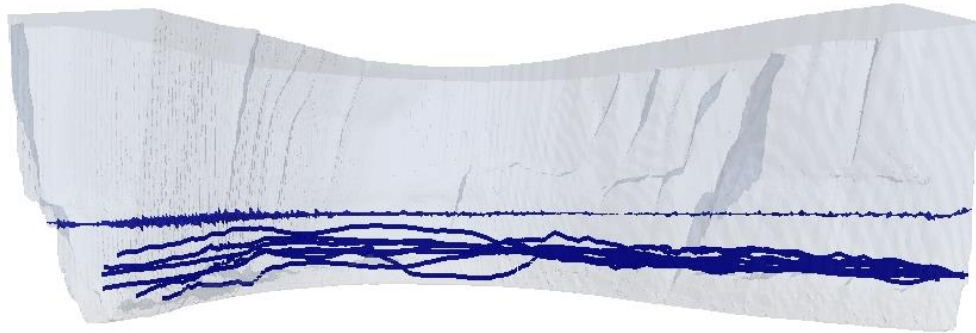
Captura de pantalla 7.2.16. Líneas de corriente con origen en parte superior (Caudal 2.000 m³).



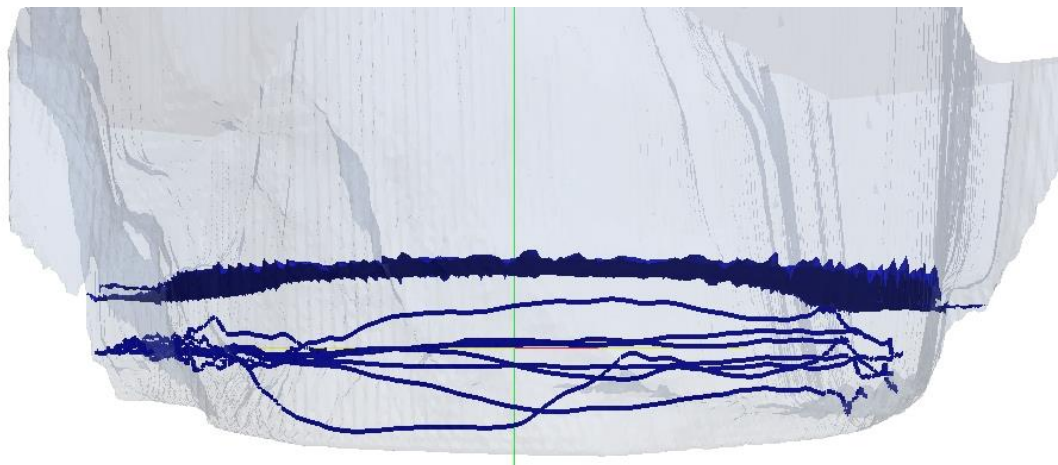
Captura de pantalla 7.2.17. Líneas de corriente con origen en parte superior (Caudal 2.000 m³).

Si ahora focalizamos en la trayectoria que siguen una serie de partículas que antes del tramo curvo se encuentran a una altura media del cauce (Capturas de pantalla 7.2.18 y 7.2.19), vemos que ocurre algo parecido. Justo al inicio del codo, parte de las partículas, que antes del codo se movían paralelas al flujo, cambian también su dirección, dirigiéndose algunas de ellas hacia la superficie

y otras hacia el fondo. Posteriormente, como ocurre en el caso anterior, las partículas mantienen su movimiento paralelo al flujo una vez se ha superado la mitad del tramo curvo.



Captura de pantalla 7.2.18. Líneas de corriente con origen en parte media (Caudal 2.000 m³).

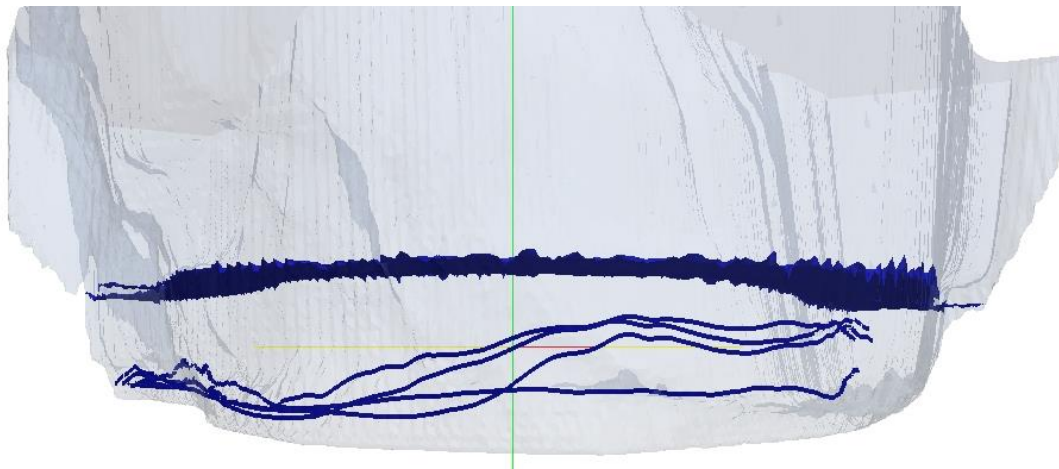


Captura de pantalla 7.2.19. Líneas de corriente con origen en parte media (Caudal 2.000 m³).

Analizando ahora una serie de líneas de corriente que parten desde la parte inferior del cauce y muy pegados al fondo de él (Capturas de pantalla 7.2.20 y 7.2.21), vemos que ocurre el mismo efecto que ocurría con las partículas que partían desde la parte superior. Estas, al llegar al codo, cambian de dirección, dirigiéndose hacia la parte superior del flujo. La única diferencia con el primer caso es que en este estudio vemos que todas las partículas se dirigen hacia arriba, al contrario que ocurría en el primer caso, donde parte de las partículas que en un principio se situaban en la parte superior, no cambiaban su dirección al alcanzar el tramo curvo.

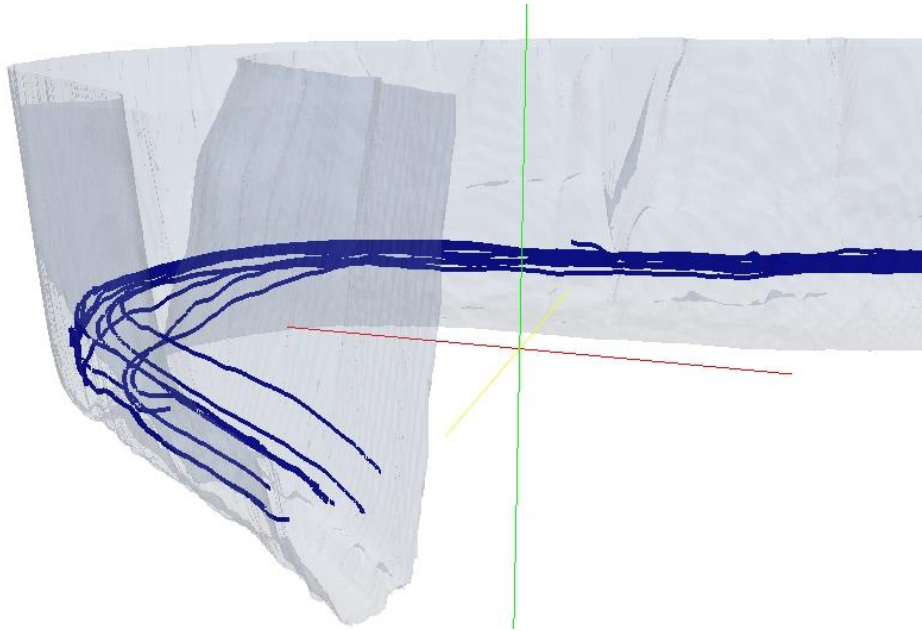


Captura de pantalla 7.2.20. Líneas de corriente con origen en la parte inferior (Caudal 2.000 m³).



Captura de pantalla 7.2.21. Líneas de corriente con origen en la parte inferior (Caudal 2.000 m³).

En la captura siguiente (7.2.22) se puede observar el detalle de las líneas de corriente a la salida del codo. Como dijimos anteriormente, una vez atravesado el tramo curvo y tras haber sufrido parte de las partículas cambios radicales de dirección, éstas mantienen su movimiento paralelo al flujo, manteniendo su altura y posición relativa con respecto a las otras partículas. Por tanto, estas partículas mantendrán su movimiento más o menos rectilíneo hasta que haya un agente que pueda modificar su trayectoria (animales, piedras, vegetación, etc.) o alcancen de nuevo otra curva, que provocaría el efecto que se acaba de explicar en los anteriores párrafos. En esta captura, vienen representadas las líneas de corriente para el caso cuyo origen de las partículas es la superficie, pero se puede afirmar que el fenómeno se da para todo el rango de partículas, sin importar su localización antes del codo.



Captura de pantalla 7.2.22. Líneas de corriente a la salida del codo (Caudal 2.000 m³).

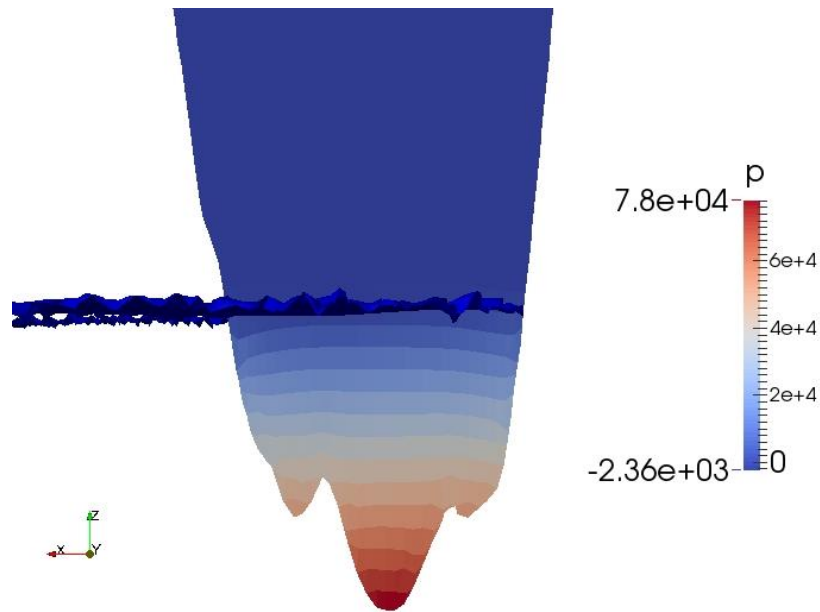
Presiones

Otra característica importante a analizar en nuestro problema son las presiones existentes en determinadas zonas de interés. En concreto, resulta interesante estudiar la distribución de presiones a lo largo de la coordenada Z, centrándonos en ambas fases, agua y aire. Así, se ha analizado la distribución de presiones en un plano transversal al flujo del río situado justamente en la mitad del codo.

Sabemos que la presión viene dada por la siguiente fórmula: $p = \rho \cdot g \cdot h$. Por tanto, teniendo en cuenta la gran diferencia existente entre las densidades de ambas fases ($\rho_{\text{AGUA}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_{\text{AIRE}} = 1,293 \text{ kg/m}^3$), nos encontramos con que las variaciones de presiones según nos situemos en una fase u otra, discrepan de manera notable en función de la altura, de manera que una escala con un rango entre el máximo de presión y el mínimo existente imposibilitará un correcto análisis de la fase de aire, donde la variación de la presión es menor. Por tanto, será necesario un ajuste del rango de la escala con el fin de estudiar con claridad la distribución de presiones en las dos fases presentes.

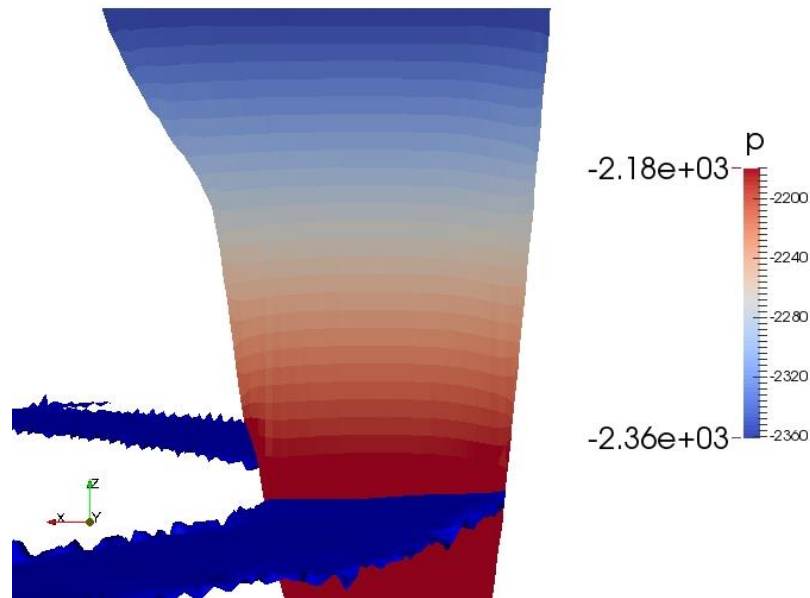
Así, comenzaremos analizando la fase acuosa (Sólo para el caso de 2.000 m³ de caudal), cuya imagen se muestra a continuación (Captura de pantalla 7.2.23). Como es natural, la máxima presión está presente en el fondo del cauce,

donde tenemos la suma de la presión atmosférica más la de columna del agua que hay hasta la superficie. Según nos aproximamos a la superficie vemos que la presión va disminuyendo hasta que tenemos la presión atmosférica en la superficie del agua o interfase.



Captura de pantalla 7.2.23. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo.

Centrándonos ahora en la fase de aire (Captura de pantalla 7.2.24), se puede ver que se produce el mismo efecto, pero esta vez con unos saltos de presión menores debido a la menor densidad del fluido, como ya se señaló anteriormente.



Captura de pantalla 7.2.24. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo.

Ahora, procederemos a comparar los valores de las presiones en los dos casos de estudio por medio de gráficas donde se analiza la distribución de presiones a lo largo de una línea vertical cuyo origen se encuentra en el punto más profundo del cauce en el plano analizado anteriormente y que llega hasta el punto de la fase de aire.

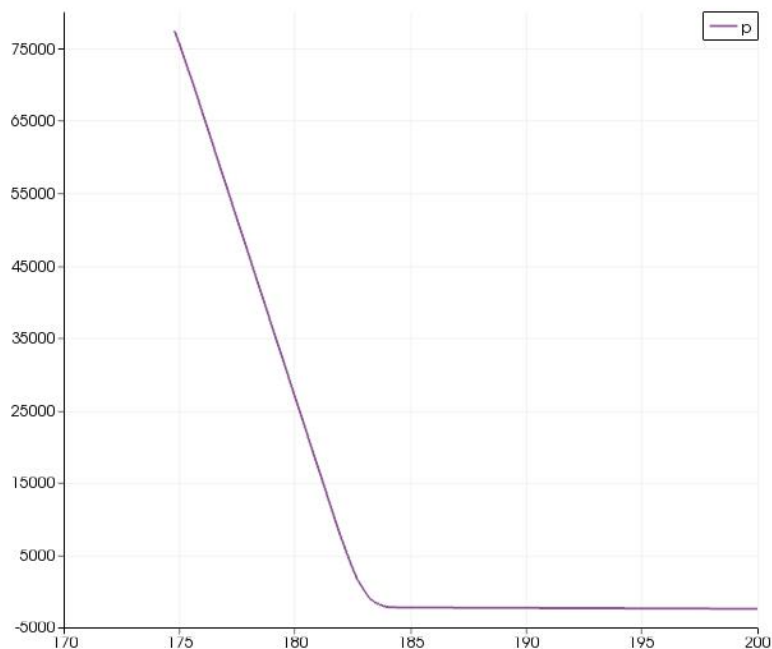
En estas dos primeras gráficas podemos ver una comparación general de esta distribución de presiones. En ellas se representa la presión relativa en función de la altura sobre el nivel del mar.

Focalizando primeramente en el problema para un caudal de 2000 m^3 (Gráfica 7.2.7), se extrae que, debido a la mayor profundidad del agua, se producen unas presiones más altas en el fondo del río. Estas llegan a alcanzar aproximadamente los 78.000 N/m^3 de presión relativa (pico máximo en el origen izquierdo de la línea) a la que le corresponde una presión absoluta de 179.800 N/m^3 aproximadamente ($78.000 + 101.800$). Sin embargo, en el caso con menor

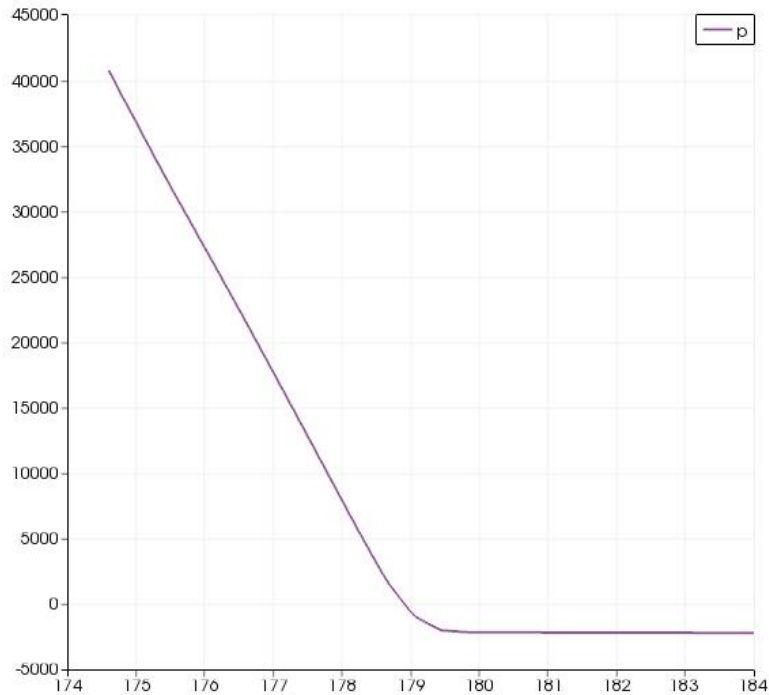
caudal (Gráfica 7.2.8), existen unas presiones menores en el fondo debido a su menor profundidad. Estas presiones alcanzan los 41.000 N/m^3 de presión relativa y unos 142.800 N/m^3 de absoluta.

Se observa que en ambos casos existe un momento en que la línea se vuelve prácticamente horizontal. Este cambio en la pendiente indica que existe un cambio de fase, y por tanto es la zona donde empieza la fase de aire. Aparentemente, la línea es horizontal, y por tanto esto significaría que la presión en esta fase no varía con la altura, pero obviamente eso no es así. Lo que sucede es que varía mucho menos en función de la altura en comparación con la fase acuosa, de manera que tenemos que focalizarnos en un rango más pequeño de presiones para observar esta variación. Estas gráficas se verán posteriormente.

Estas dos gráficas también nos permiten analizar con gran claridad la diferencia de altura en el nivel del agua en ambos casos, que estará situada en ese cambio de pendiente. Así, se puede afirmar que en esa zona de la curva el nivel para un caudal de 2000 m^3 estaría en torno a 183 metros y en el segundo caso, con caudal de 1400 m^3 , el nivel sería de aproximadamente 180 metros.

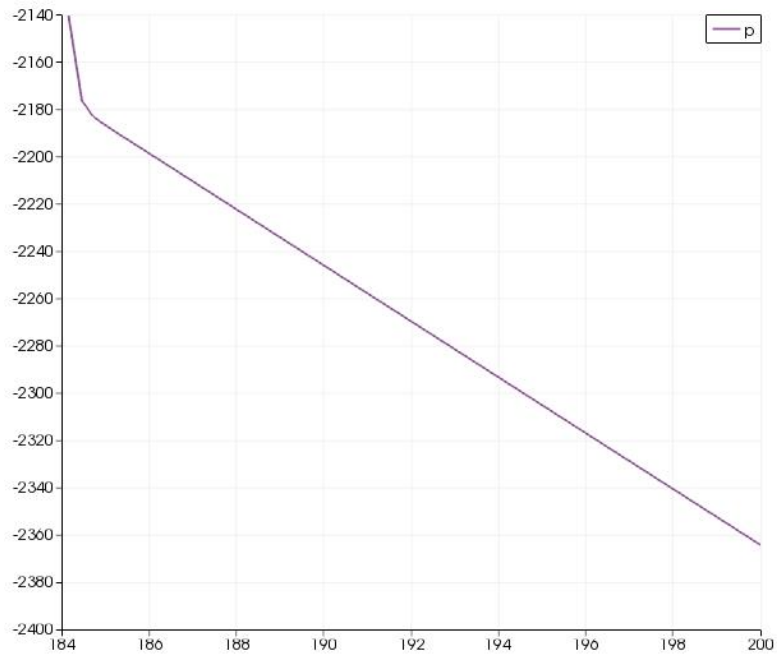


Gráfica 7.2.7. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo centrándose en la fase acuosa (Caudal de 2.000 m^3).

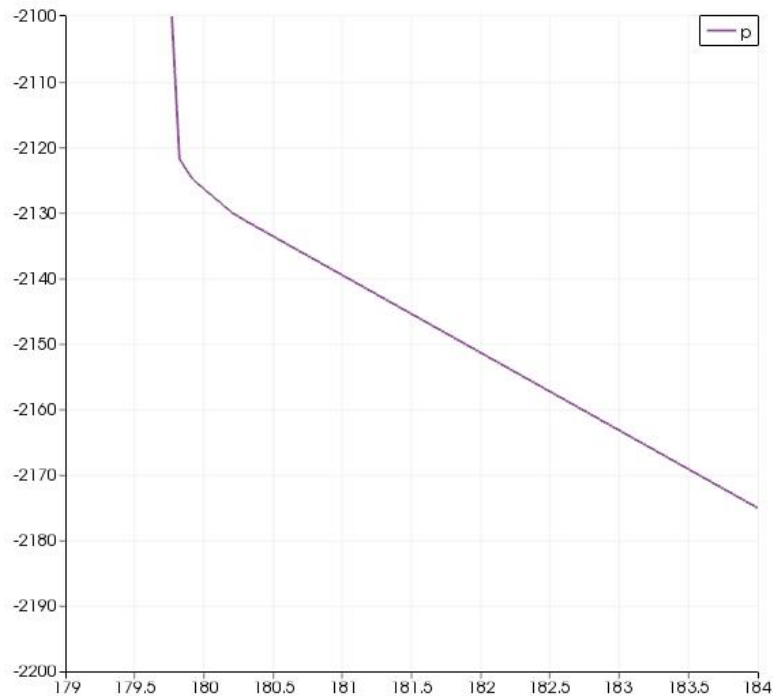


Gráfica 7.2.8. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo centrándose en la fase acuosa (Caudal de 1.400 m³).

A continuación, se pueden ver las mismas gráficas anteriores, pero con una ampliación en la zona del aire, de manera que se aprecia la distribución de presiones en esta fase. Los valores de presiones de nuevo vuelven a ser presiones relativas por lo que para obtener la presión absoluta se deberá de sumar la presión atmosférica. Así, tendríamos que para el primer caso de caudal 2.000 m³ (Gráfica 7.2.9), la presión en la superficie de interfase, que está situada a 183 metros sobre el nivel del mar, sería de aproximadamente 99.620 N/m³. En cuanto al segundo caso (Gráfica 7.2.10), tendríamos, a una altura de 180 metros, una presión absoluta en torno a 99.680. Esta diferencia de presión en la interfase se debe a que estas superficies están situadas a diferentes alturas sobre el nivel del mar, teniendo una columna de aire sobre ellas menor en el primer caso, con su consecuente decremento de la presión. Si comparamos las mismas alturas en ambos casos, veremos que las presiones coinciden.



Gráfica 7.2.9. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo centrándose en la fase aire (Caudal de 2.000 m³).



Gráfica 7.2.10. Distribución de presiones en el plano intermedio del codo centrándose en la fase aire (Caudal de 1.400 m³).

8. Apéndice I: Movimiento circular del río

Como información adicional, se incluye este apéndice con una descripción teórica del movimiento del río en el tramo curvo con el fin de dar explicación y justificar la diferencia de calado existente en el codo entre las partes externas y las internas. Por tanto, se hará un análisis desde el punto de vista de la dinámica del movimiento circular

Ecuación de la dinámica del movimiento circular

Primeramente, comenzaremos introduciendo las ecuaciones de la dinámica del movimiento curvilíneo uniforme.

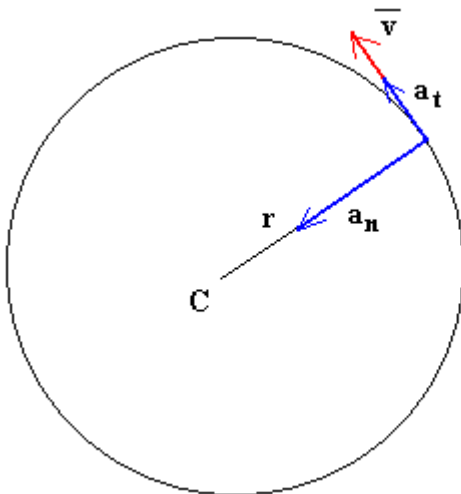


Imagen 8.1. Aceleraciones movimiento curvilíneo.

Como sabemos, todo movimiento curvilíneo se compone de dos aceleraciones. Una con dirección tangente a la trayectoria de la partícula, y otra aceleración dirigida al centro de la trayectoria. Estas aceleraciones son las que llamamos aceleración tangencial y normal, y vienen definidas por las siguientes ecuaciones:

$$a_t = \frac{dv}{dt} = r \cdot \frac{d\omega}{dt} = r \cdot \alpha$$

$$a_n = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r$$

En el estudio del movimiento circular uniforme vemos que la velocidad del móvil no cambia de módulo, pero cambia constantemente de dirección. Por tanto, en caso de movimiento curvilíneo uniforme, como consecuencia de que la partícula se mueve con velocidad constante, tenemos una aceleración tangencial nula, existiendo solamente aceleración normal.

Entonces, con el fin de mantener esta trayectoria curva y por tanto esta aceleración normal, necesitamos fuerzas dirigidas hacia el centro de la trayectoria.

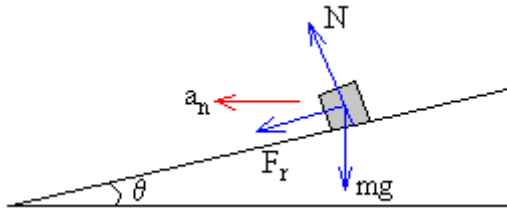


Imagen 8.2. Fuerzas movimiento curvilíneo.

Si el fluido circulara en el tramo curvo con su nivel de agua totalmente horizontal, la única fuerza existente para mantener esta aceleración normal sería la fuerza de rozamiento del agua sobre el terreno, fuerza extremadamente pequeña e insuficiente. Por tanto, a la velocidad que circula el agua del río, se hace necesario otra fuerza para mantener la trayectoria y que exista equilibrio. Este equilibrio se alcanza a una determinada inclinación de la superficie del río en la curva, provocando así que la fuerza normal que ejercen las paredes del cauce sobre el fluido tenga una componente horizontal dirigida hacia el centro de la trayectoria que permite esa aceleración normal junto con la fuerza de rozamiento.

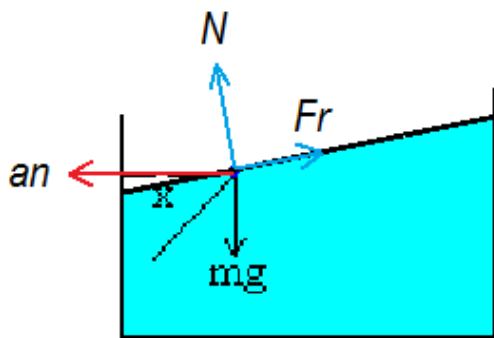


Imagen 8.3. Fuerzas movimiento curvilíneo en un fluido.

Por tanto, tenemos que, a mayor velocidad, mayor será la inclinación del nivel del agua en el tramo curvo, ya que necesitamos que la componente horizontal de la normal se haga más grande, aumentando así la fuerza hacia el centro de la trayectoria que favorece la aceleración normal. En resumen, para que se produzca el equilibrio, la superficie toma más inclinación o menos en función de la velocidad, aumentando o disminuyendo la componente horizontal de esta fuerza normal. [16]

Análisis desde sistema de referencia no inercial

Visto de otra manera más intuitiva, se puede analizar el problema, desde un sistema de referencia no inercial, es decir, desde el punto de vista de un observador que se encuentra en el sistema de referencia rotatorio, y que por

tanto se encuentra acelerado, y para ello introducimos ahora lo que llamamos fuerza centrífuga.

En la mecánica clásica o mecánica newtoniana, la fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación, o equivalentemente la fuerza aparente que percibe un observador no inercial que se encuentra en un sistema de referencia rotatorio.

El calificativo de "centrífuga" significa que "huye del centro". En efecto, un observador no inercial situado sobre una plataforma giratoria siente que existe una «fuerza» que actúa sobre él, que le impide permanecer en reposo sobre la plataforma a menos que él mismo realice otra fuerza dirigida hacia el eje de rotación. Así, aparentemente, la fuerza centrífuga tiende a alejar los objetos del eje de rotación.

Esto mismo ocurre cuando el flujo del río llega al codo. Situándonos en el seno del fluido, vemos que existe una fuerza ficticia (fuerza centrífuga) que tiende a alejar el agua de su trayectoria curva, y, por tanto, con el fin de mantener la trayectoria, el agua toma cierta inclinación de manera que la normal ejercida por las paredes del cauce sobre el fluido tenga una cierta componente horizontal que contrarreste esta fuerza centrífuga. [16]

Bibliografía

Publicaciones

- C. Biscarini, S. Di Francesco, y P. Manciola. “CFD modelling approach for dam break flow studies”. Hydrology and Earth System Sciences, 2010.
- Armau Bayon, Daniel Valero, Rafael García Bartual, Francisco José Vallés Morán, P. Amparo López Jiménez. “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump”. “Environmental Modelling & Software”. ELSEVIER, 2016.
- Van Thinh Nguyen. “3D numerical simulation of free Surface flows over hydraulic structures in natural channels and rivers”. “Applied Mathematical Modelling”. ELSEVIER, 2015.
- J.A. Mercado, P. Bohórquez. “Simulación numérica bidimensional del río Guadalquivir a su paso por la presa de Marmolejo”. Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2015.
- J.A. Plaza, P. Bohórquez. “Dinámica fluvial del río Guadalbullón a su paso por las Infantas”. Escuela Politécnica Superior de Jaén, 2015.

Referencias

[1]

<http://www.ign.es/iberpix2/visor/>

[2]

<https://es.wikipedia.org/wiki/Lubuntu>

[3]

<https://es.wikipedia.org/wiki/Python>

[4]

https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional

[5]

<https://es.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM>

[6]

http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?action=Static&url=fechas.jsp&c_provincia=23&c_estacion=14

[7]

<http://www.chguadalquivir.es/saih/DatosHistoricos.aspx>

[8]

https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_digital_del_terreno

[9]

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>

[10]

<http://engys.com/es/products/helyx-os>

[11]

[https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format))

[12]

<http://www.kitware.com/opensource/paraview.html>

[13]

http://www.cfd-online.com/Wiki/SST_k-omega_model

[14]

<http://www.openfoam.com/documentation/user-guide>

[15]

https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADnea_de_corriente

[16]

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/dinamica/circular1/circular1.htm>