

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil

Estudio numérico sobre sedimentación en el lecho de  
ríos

Autor: Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor: Javier Dávila Martín

Dep. Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de  
Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Civil  
Intensificación en Hidrología

# **Estudio numérico sobre sedimentación en el lecho de ríos**

Autor:

Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor:

Javier Dávila Martín

Profesor titular

Dep. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Trabajo de Fin de Grado: Estudio numérico sobre sedimentación en el lecho de ríos

Autor: Francisco Javier Moreno Hidalgo

Tutor: Javier Dávila Martín

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



*A mi familia y Belén*

*A mis profesores y compañeros  
de promoción*



# Agradecimientos

---

Agradecer, en primer lugar, a mi familia y a Belén, por todo el apoyo recibido durante estos cuatro intensos años. También a mis amigos y compañeros de promoción por haber hecho más ameno el trabajo diario. Y, por supuesto, a Javier Dávila por darme la oportunidad de introducirme en este trabajo y línea de investigación, y a Alonso Fernández, por su ayuda y aporte de conocimientos en Ansys Fluent y modelos multifásicos.

*Francisco Javier Moreno Hidalgo*

*Sevilla, 2017*



Los problemas asociados a la presencia de material sólido son muy comunes en instalaciones que interactúan con sistemas fluviales. En esta idea se enfoca la línea de investigación a la que pertenece este trabajo, y en la que se pretende dar una solución a la decantación de lodos en el canal de bombeo y turbinado del río Arenoso, afluente del Guadalquivir.

En concreto, este estudio trata de simular, haciendo uso de una herramienta de Dinámica de Fluidos Computacional, el comportamiento de las partículas al utilizar aceleradores de corriente, buscando la generación de zonas de sedimentación controladas. Se han realizado distintas pruebas para obtener las características de estos elementos y su ubicación para paliar o disminuir el efecto del problema.





# Abstract

---

The problems associated to solid's material presence are rather common in the installations that interact with fluvial systems. This project belongs to a line of research which is centred in the aim of giving a solution to mud decantation in the pumping and turbine flow canal of Arenoso's river, a Guadalquivir's tributary.

In particular, this study, helped by a Computational Fluid Dynamics tool, try to simulate the particle's behaviour using submersible mixers and looking for the generation of controlled sedimentation areas. It has been made a deal of different proves in order to obtain the characteristics of these elements, including their location so as to make it effective concerning the problem.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Problemática a resolver</i>	1
1.2. <i>Antecedentes</i>	2
1.3. <i>Objetivo del estudio</i>	2
<b>2 Descripción del caso</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Localización</i>	3
2.2. <i>Río Arenoso</i>	4
2.3. <i>Embalse y presa del Arenoso</i>	5
2.4. <i>Instalación de bombeo</i>	7
2.5. <i>Instalación para el turbinado</i>	7
2.6. <i>Subestación</i>	7
2.7. <i>Canal Arenoso</i>	8
2.8. <i>Material sólido</i>	10
2.8.1. <i>Red Saica</i>	11
<b>3 Descripción de la solución a emplear</b>	<b>19</b>
3.1. <i>Métodos de extracción de sedimentos</i>	19
3.1.1. <i>Soluciones directas</i>	19
3.1.2. <i>Soluciones indirectas</i>	19
3.2. <i>Empleo de agitadores sumergibles</i>	20
3.2.1. <i>Caracterización geométrica</i>	23
3.2.2. <i>Caracterización de funcionamiento</i>	25
3.3. <i>Solución esperada</i>	28
<b>4. Teoría de sedimentos</b>	<b>29</b>
4.1. <i>Origen de las partículas</i>	29
4.2. <i>Teoría de umbral de movimiento</i>	30
4.3. <i>Dinámica de pequeñas partículas en flujos no uniformes</i>	32
<b>5. Desarrollo numérico usando técnicas cfd</b>	<b>35</b>
5.1. <i>Introducción</i>	35
5.2. <i>Geometría</i>	36
5.3. <i>Mallado</i>	39
5.4. <i>Materiales</i>	46
5.5. <i>Modelos</i>	46
5.5.1. <i>Turbulencia</i>	47

5.5.2. Flujo multifásico	50
5.6. Condiciones de contorno	61
5.7. Validación de los resultados	63
5.8. Agitadores	63
5.9. Opciones del solver	67
<b>6. Resultados obtenidos</b>	<b>68</b>
6.1. Calibración del modelo sin agitadores	68
6.1.1. Pérdida de carga teórica del canal	68
6.1.2. Comprobación de conclusiones de estudio anterior	70
6.1.3. Resultados de la simulación sin agitadores	72
6.2. Modelo con agitadores	75
6.2.1. Pruebas para encontrar ubicación óptima	76
6.2.2. Pruebas en canal completo	85
6.2.3. Simulaciones con la avenida atenuándose	87
6.3. Implementación mediante el uso de toberas	88
<b>7. Conclusiones</b>	<b>90</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>92</b>
<b>Anexo I. Modelo de curva H-Q</b>	<b>94</b>
<b>Anexo II. Modelo UDF</b>	<b>95</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Método isoyetas	5
Tabla 3-1. Resumen estudio de mercado de agitadores	23
Tabla 5-1. Características de la sección del canal	37
Tabla 5-2. Propiedades de la fase líquida	46
Tabla 5-3. Propiedades de la fase sólida	46
Tabla 5-4. Características fase sólida en modelo UDF	58
Tabla 5-5. Parámetros condición de contorno entrada	61
Tabla 5-6. Parámetros condición de contorno salida	62
Tabla 5-7. Parámetros condición de contorno lecho	62
Tabla 5-8. Agitadores empleados	66
Tabla 6-1. Valores de rugosidad	69
Tabla 6-2. Pérdida de carga	69
Tabla 6-3. Partículas consideradas en estudio previo	70
Tabla 6-4. Posiciones probadas de los agitadores	76
Tabla 6-5. Cálculo de la efectividad de los agitadores probados	81
Tabla 6-6. Rendimiento agitador con tobera	89

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Ilustración 2-1. Ubicación de la zona de estudio en Andalucía	3
Ilustración 2-2. Cuenca del río Arenoso	4
Ilustración 2-3. Ubicación de la cuenca respecto al resto de ríos de Andalucía	4
Ilustración 2-4. Mapa isoyetas de la cuenca del río Arenoso	5
Ilustración 2-5. Presa y embalse del Arenoso	6
Ilustración 2-6. Evolución del volumen embalsado en los últimos años	7
Ilustración 2-7. Vista en planta de los elementos de la zona de estudio	8
Ilustración 2-8. Sección del canal desde p.k. 0+000 a p.k. 0+340	8
Ilustración 2-9. Sección del canal desde p.k. 0+340 hasta el final.	9
Ilustración 2-10. Cotas para un caudal de 10 m <sup>3</sup> /s	9
Ilustración 2-11. Materiales de la cuenca del río Guadalquivir	10
Ilustración 2-12. Nombre de los materiales de la Ilustración 2-11	11
Ilustración 2-13. Estaciones Automáticas de Alerta	12
Ilustración 2-14. Ficha de la estación 507	13
Ilustración 2-15. Ficha de la estación 512	14
Ilustración 2-16. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 507	15
Ilustración 2-17. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 512	15
Ilustración 2-18. Medidas EAA 507 meses octubre a diciembre	16
Ilustración 2-19. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 518	17
Ilustración 2-20. Medidas EAA 518 meses julio a septiembre	17
Ilustración 2-21. Medidas EAA 518 meses octubre a diciembre	18
Ilustración 3-1. Aceleradores de corriente de distintos tamaños	20
Ilustración 3-2. Colocación de agitador	22
Ilustración 3-3. Colocación de agitadores	22
Ilustración 3-4. Alzado, planta y perfil de agitador de 900 mm de diámetro	24
Ilustración 3-5. Alzado, planta y perfil de agitador de 1200 mm de diámetro	24
Ilustración 3-6. Curva H-Q bomba de flujo axial	25
Ilustración 3-7. Curva H-Q bomba de flujo mixto	25
Ilustración 3-8. Curva H-Q bomba de flujo radial	26
Ilustración 3-9. Simplificaciones consideradas en curva H-Q	26
Ilustración 3-10. Tipo de curva H-Q empleada para caracterizar agitadores	28
Ilustración 4-1. Transporte de sedimento en un río	29
Ilustración 4-2. Ábaco de Shields	31
Ilustración 4-3. Movimiento turbulento liso	32

Ilustración 4-4. Movimiento turbulento rugoso	32
Ilustración 5-1. Volumen total discretizado en volúmenes de control	36
Ilustración 5-2. Geometría del canal	36
Ilustración 5-3. Elementos que forman la geometría en estudio	37
Ilustración 5-4. Sección transversal del canal	38
Ilustración 5-5. Nomenclatura de las caras del lecho	38
Ilustración 5-6. Nomenclatura de la entrada y la salida	39
Ilustración 5-7. Nomenclatura de la superficie libre	39
Ilustración 5-8. Tipos de celda en mallas 2D	40
Ilustración 5-9. Tipos de celda en mallas 3D	40
Ilustración 5-10. Componentes de una malla 2D y 3D	40
Ilustración 5-11. Malla estructurada cuadrilátera	41
Ilustración 5-12. Malla no estructurada cuadrilátera	41
Ilustración 5-13. Malla híbrida	42
Ilustración 5-14. Representación de los vectores que aparecen en ecuaciones 5-2 y 5-3	43
Ilustración 5-15. Forma de calcular la relación de aspect	43
Ilustración 5-16. Malla estructurada	44
Ilustración 5-17. Malla híbrida generada	44
Ilustración 5-18. Malla conforme	45
Ilustración 5-19. Malla en la zona de los agitadores	45
Ilustración 5-20. Malla en la zona central del canal	46
Ilustración 5-21. Definición de la gravedad y tipo de análisis	47
Ilustración 5-22. Subdivisiones zona cercana a la pared	49
Ilustración 5-23. Elección del modelo de turbulencia	50
Ilustración 5-24. Interpretación del código de la UDF en Ansys Fluent	54
Ilustración 5-25. Activación UDS	55
Ilustración 5-26. Activación MACRO para cálculo de tensión en el lecho	55
Ilustración 5-27. Modelos reológicos de viscosidad	56
Ilustración 5-28. Propiedades del agua	57
Ilustración 5-29. Términos fuente	57
Ilustración 5-30. Condiciones de contorno entrada y salida	58
Ilustración 5-31. Condición de contorno sobre el lecho	58
Ilustración 5-32. Caracterización de las inyecciones	59
Ilustración 5-33. Parámetros de seguimiento de la trayectoria de las partículas	60
Ilustración 5-34. Condición de contorno entrada y salida	62
Ilustración 5-35. Condición de contorno	63
Ilustración 5-36. Representación de los parámetros geométricos del agitador	64
Ilustración 5-37. Diseño de la geometría de los agitadores	64
Ilustración 5-38. Parámetros de los agitadores	65

Ilustración 5-39. Nomenclatura de las caras del agitador	66
Ilustración 5-40. Curva H-Q para agitador de 0.9 m de diámetro	66
Ilustración 6-1. Diagrama de Moody	69
Ilustración 6-2. Trayectoria de partículas tipo 1	70
Ilustración 6-3. Trayectoria partículas tipo 2	71
Ilustración 6-4. Trayectoria partículas tipo 3	71
Ilustración 6-5. Trayectoria partículas tipo 4	71
Ilustración 6-6. Trayectoria partículas tipo 1	72
Ilustración 6-7. Trayectoria partículas tipo 2	72
Ilustración 6-8. Residuos escalados	73
Ilustración 6-9. Presión en la entrada del canal	73
Ilustración 6-10. Valor de la presión en la entrada	73
Ilustración 6-11. Velocidad en la salida	74
Ilustración 6-12. Caudal en la salida	74
Ilustración 6-13. Balance de caudales	74
Ilustración 6-14. Valores de $y^+$	75
Ilustración 6-15. Concentración de sedimento en el canal sin agitadores	75
Ilustración 6-16. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 1, agitador $\phi=0.9$ m	77
Ilustración 6-17. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 1, agitador $\phi=1.2$ m	77
Ilustración 6-18. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 2, agitador $\phi=1.2$ m	78
Ilustración 6-19. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 3, agitador $\phi=1.2$ m	78
Ilustración 6-20. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 4, agitador $\phi=1.2$ m	78
Ilustración 6-21. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 5, agitador $\phi=1.2$ m	79
Ilustración 6-22. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 6, agitador $\phi=1.2$ m	79
Ilustración 6-23. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 7, agitador $\phi=1.2$ m	80
Ilustración 6-24. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 8, agitador $\phi=1.2$ m	80
Ilustración 6-25. Rendimiento en función de la separación longitudinal	81
Ilustración 6-26. Rendimiento en función de la separación respecto al lecho	82
Ilustración 6-27. Rendimiento en función de la separación transversal	82
Ilustración 6-28. Contorno de velocidades en plano $y = 0.1$ metros	83
Ilustración 6-29. Contorno de velocidades en plano $y = 0.5$ metros	83
Ilustración 6-30. Contorno de velocidades en plano $y = 1.2$ metros	84
Ilustración 6-31. Contorno de velocidades en el plano $y = 0.5$ metros	84
Ilustración 6-32. Trayectoria partículas en canal completo	85
Ilustración 6-33. Velocidad generada por agitadores	85
Ilustración 6-34. Velocidad según eje $y$ en plano $z = 0$	86
Ilustración 6-35. Concentración de sólidos en canal completo con agitadores	86
Ilustración 6-36. Concentración de sólidos en canal completo con agitadores (distinta escala)	87
Ilustración 6-37. Trayectoria de las partículas para $Q=6$ m <sup>3</sup> /s	87

Ilustración 6-38. Simulación mediante UDF para $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$	88
Ilustración 6-39. Trayectoria de las partículas para $Q=3 \text{ m}^3/\text{s}$	88
Ilustración 6-40. Geometría de las toberas	89
Ilustración 6-41. Trayectoria partículas 1 y 2 con uso de toberas	89



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La presencia de material sólido en los ríos es un fenómeno importante, el cual debería suponer un gran interés en el estudio previo a cualquier actuación sobre éstos. Este material genera deterioro y supone un problema para las instalaciones que se encuentra a su paso, por ello un estudio detallado de este fenómeno en el lugar de actuación puede suponer ventajas en el mantenimiento de la instalación durante su vida útil.

Son abundantes los casos en la actualidad que se ven afectados por este problema, sirviendo de ejemplo el caso de muchos embalses en el mundo, los cuales se están viendo colmatados al no haber considerado la posibilidad de presencia de material sólido o cómo disminuir su efecto.

En el presente estudio, el sedimento desempeña un efecto similar a lo ocurrido en los embalses, perteneciendo éste a una línea de investigación iniciada en 2016 por Esperanza Navarro en su Trabajo de Fin de Máster para la Universidad de Sevilla [1], realizado en el mismo departamento y bajo la misma tutela.

El objetivo de la línea de investigación iniciada por el trabajo mencionado es buscar una solución al problema que dificulta el correcto funcionamiento del canal de bombeo de la presa del río Arenoso, situado en el municipio de Montoro, Córdoba. El origen de estos estudios es resolver la adversidad que genera la decantación de lodos en las instalaciones de bombeo y turbinado del canal mencionado.

El procedimiento empleado para la elaboración de este estudio ha sido, en primer lugar, comprobar las conclusiones establecidas en el trabajo que inicia la línea a seguir para, a continuación, incluir algunas mejoras y profundizar principalmente en una de las soluciones propuestas al problema inicial, la cual se trata del uso de agitadores sumergibles, también conocidos como aceleradores de corriente, para generar zonas controladas de depósito de sedimentos. En esta última idea se refleja el objetivo principal de este estudio concreto, optimizar el uso de agitadores para resolver el problema que se plantea. Mientras que el trabajo inicial tenía como objetivo la descripción de la problemática, de la cual se incluirán aquí las nociones básicas para establecer la situación a estudiar, y comprobar si el uso de agitadores como solución podía considerarse efectivo, en este caso se busca profundizar en este aspecto, ya que se concluyó que sí eran efectivos para disminuir el problema sin considerar cómo se podría optimizar la solución variando distintos parámetros que caracterizan a estos elementos.

Para llevar a cabo el estudio, es necesario apoyarse de un software comercial de cálculo de dinámica computacional (CFD, en inglés *Computational Fluid Dynamics*), Ansys Fluent 16. El grueso del trabajo se encuentra en las simulaciones realizadas mediante este programa del comportamiento de las partículas en el canal de estudio.

## 1.1. Problemática a resolver

La línea de investigación a la que pertenece el trabajo pretende resolver el problema de la decantación de lodos en el canal del Arenoso, el cual se emplea como elemento de trasvase de agua entre la presa del río Arenoso y el río Guadalquivir.

Para describir la problemática es necesario incluir brevemente cuál es el funcionamiento del canal de estudio, ya que posteriormente se describirá con mayor detalle. El embalse del río Arenoso, además de ser un elemento de regulación, pretende paliar la necesidad de agua en época seca que requiere el río Guadalquivir, mientras que, en época húmeda recoge agua sobrante del Guadalquivir. Para realizar ambas funciones consta de equipos de bombeo (para trasvasar agua del Guadalquivir al embalse) y de equipos de turbinado (para aprovechar energéticamente el trasvase de agua desde el embalse al Guadalquivir).

La funcionalidad de este canal se ve afectada por la presencia de sólidos, pudiendo destacar los siguientes problemas:

- Pérdida de sección del canal dificultando la llegada de agua a la zona de aspiración de las bombas.
- Acumulación de sólidos en las cántaras de bombeo.
- Obstrucción de los elementos (rejas y compuertas) de las instalaciones previas a las bombas.

## 1.2. Antecedentes

Se considera necesario recoger las conclusiones establecidas en el trabajo anterior, ya que serán el punto de partida de este trabajo.

A pesar de la necesidad de dragado del canal completo para eliminar los sólidos actualmente depositados es necesario llegar a alguna solución que garantice el correcto funcionamiento de la instalación durante su uso corriente sin llegar al extremo de la problemática anteriormente descrita. Entre las alternativas consideradas se establece la colocación de agitadores como aquella a profundizar en el estudio, por ser de bajo consumo energético y bajo impacto ambiental.

En el estudio anterior se llegaron a las siguientes conclusiones en cuanto al empleo de agitadores como posible solución:

- La colocación de agitadores es un método efectivo para reducir la concentración de partículas que llegan a las cántaras de aspiración. Aunque la entrada de sólidos al canal se sigue produciendo, se tiene una zona de sedimentación controlada.
- La colocación de agitadores es un método efectivo para partículas de tamaño entre 0.01 mm y 0.05 mm y densidades en torno a 1500 – 1900 kg/m<sup>3</sup>.

Éstas fueron las principales conclusiones establecidas, las cuales se comprobarán en el apartado correspondiente a la simulación en Ansys Fluent.

Varias cuestiones quedaron abiertas en el estudio previo:

- Valor de la fracción volumétrica de sólidos en el canal. Se tomó un valor altamente conservador, siendo éste el límite superior que presenta el modelo elegido para la simulación (10%). Teniendo en este caso como objetivo buscar un valor más real.
- Estudiar el problema teniendo en cuenta que existen en el mercado diversos tipos de agitadores.
- Estudio del funcionamiento de los agitadores con caudales de aguas bajas.

## 1.3. Objetivo del estudio

Aunque ya se han recogido algunas ideas acerca del objetivo del presente trabajo, se recogen de nuevo con mayor detalle.

Una vez conocido que la colocación de agitadores es efectiva en el caso a estudiar, se hace necesario optimizar el proceso. Para llevar a cabo esto, se ha procedido a un estudio del mercado de agitadores consultando catálogos de comerciantes que se dedican a su fabricación para caracterizar sus principales parámetros. La optimización se ha realizado desde el punto de vista de consumo energético, dimensiones y colocación.

## 2 DESCRIPCIÓN DEL CASO

Para la realización del estudio es necesario conocer el caso y los elementos que se involucran en él.

### 2.1. Localización

Cerca de la localidad de Montoro (Córdoba) se encuentra el embalse del Arenoso (situado en el río Arenoso), el cual tiene como funciones:

- Regulación de la cuenca propia.
- Laminación de las avenidas.
- Regulación de la cuenca del Guadalquivir.

Asociado a este último objetivo del embalse surge el concreto problema a estudiar. La regulación de la cuenca del Guadalquivir se realiza en dos etapas, según la época del año:

- En la época húmeda recibe agua mediante bombeo del río Guadalquivir a través del canal del Arenoso.
- En la época seca aporta agua al Guadalquivir, incluyendo un aprovechamiento hidroeléctrico mediante el turbinado del caudal desembalsado.

La función de esta regulación del Guadalquivir es almacenar agua sobrante durante el invierno para poder emplearla en uso agrícola durante la época de escasez de agua de lluvia.

La conexión entre el embalse y el río Guadalquivir se hace a través del canal del Arenoso. Las bajas velocidades del agua en este canal provocan la deposición del material transportado en el lecho, lo cual produce una pérdida de sección del canal repercutiendo en la imposibilidad, en algunas ocasiones, de llevar a cabo el bombeo necesario desde el canal al embalse.

Esta deposición de material ocurre principalmente en la época de lluvia, momento en el que el Guadalquivir va más cargado de partículas en suspensión.

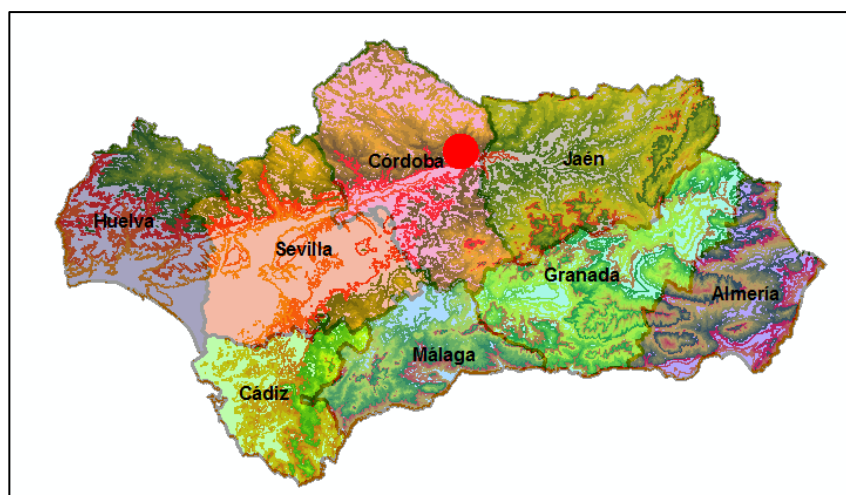


Ilustración 2-1. Ubicación de la zona de estudio en Andalucía

## 2.2. Río Arenoso

El río Arenoso nace en el municipio cordobés de Cardena hasta su desembocadura en el río Guadalquivir, a cuya cuenca pertenece. Tiene una longitud de 40 kilómetros. Su cuenca es de 404 km<sup>2</sup>, sobre la cual cae una precipitación media anual de 740 mm (dato corroborado con método de isoyetas).

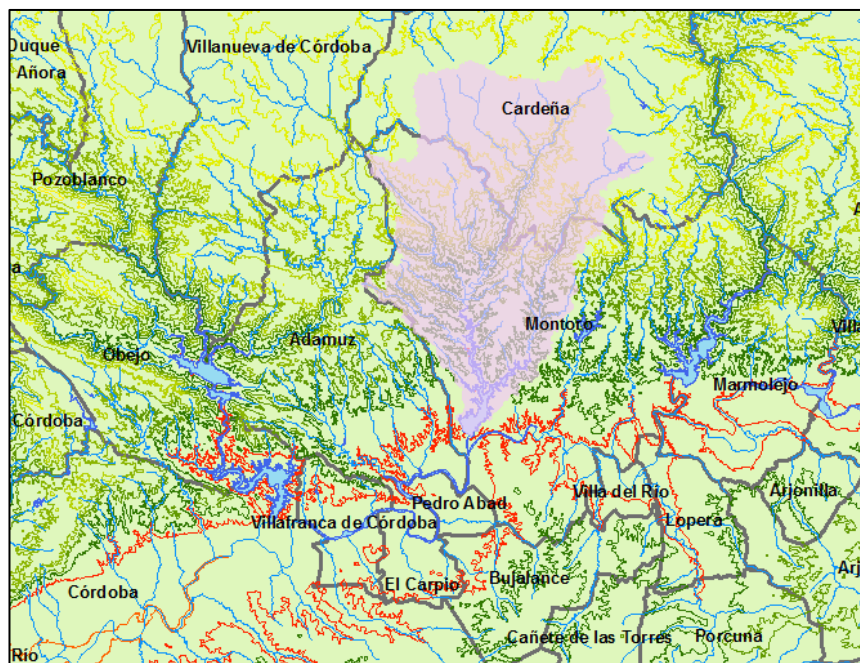


Ilustración 2-2. Cuenca del río Arenoso

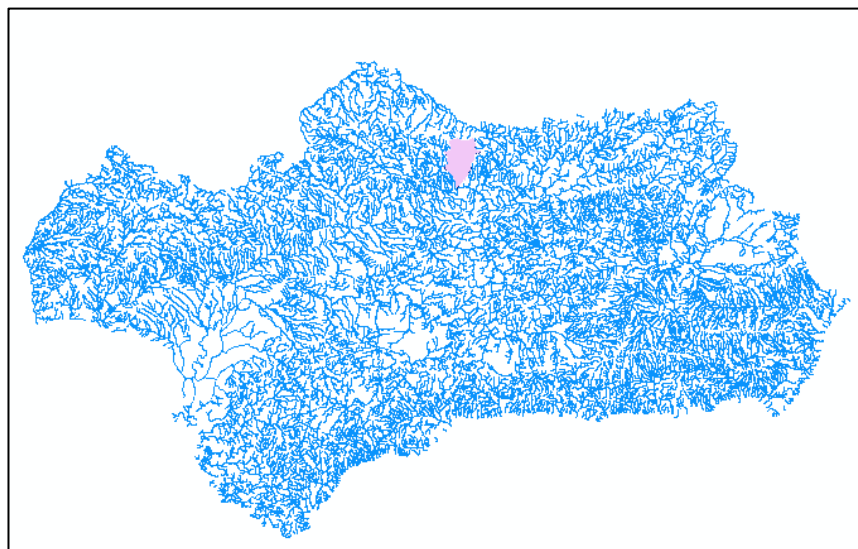


Ilustración 2-3. Ubicación de la cuenca respecto al resto de ríos de Andalucía

Aunque no es objetivo del presente estudio, se ha comprobado el dato de la precipitación media anual de la cuenca mediante el método de las isoyetas.

Tabla 2-1. Método isoyetas

Precipitación (mm)	Área (km <sup>2</sup> )
600	37.02
700	290.79
900	54.13
1000	19.28
1200	2.80

Este método calcula la precipitación media de una zona a partir de un plano de isoyetas (Ilustración 2-4) y usando la expresión 2-1.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i A_i}{A_T} \quad (2-1)$$

Siendo  $i$  el subíndice que representa cada porción de precipitación  $P_i$  y de superficie  $A_i$ .

Obteniendo una precipitación media anual en la cuenca de aproximadamente 740 mm/año.

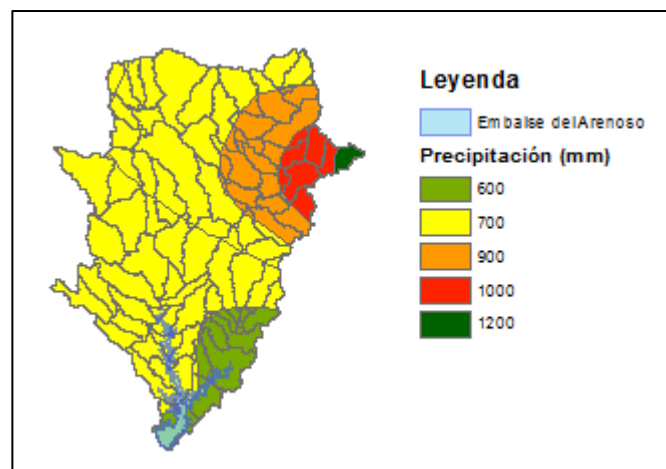


Ilustración 2-4. Mapa isoyetas de la cuenca del río Arenoso

### 2.3. Embalse y presa del Arenoso

La presa del Arenoso se encuentra sobre el río Arenoso, aproximadamente a 1.2 km de su desembocadura en el río Guadalquivir, siendo esta distancia la del canal de estudio, la cual se verá más adelante.

Es una presa de reciente construcción, año 2007, con una altura máxima de 80 metros, longitud de 1481.28 metros y anchura de coronación de 11.30 metros. Se trata de una presa de tipo gravedad de materiales sueltos, cuyo núcleo central está formado de arcillas procedentes de propio vaso del embalse y protegido mediante escollera.

Otras características de la presa son:

- Nivel de coronación: 215 m.s.n.m.

- Cota de cimentación: 135 m.s.n.m.
- Talud exterior: 1.7 H : 1 V.



Ilustración 2-5. Presa y embalse del Arenoso

Fuente: Ministerio de agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente

Al tratarse de una presa de materiales sueltos el aliviadero está colocado en una de sus márgenes, concretamente en la margen izquierda, y presenta las siguientes características:

- Aliviadero de labio fijo.
- Cota umbral: 209 msnm.
- Longitud de vertido inicial: 24 metros.
- Longitud de vertido final: 12 metros.
- Perfil de vertido tipo Creager.
- Disipación de energía mediante trampolín y cuenco receptor.
- Longitud total (incluido trampolín): 241 metros.
- Capacidad de desagüe máxima: 468 m<sup>3</sup>/s.

En cuanto a los desagües de fondo:

- Dos desagües de fondo, de 2.5 y 2 metros de diámetro cada uno.
- Capacidad total de desagüe: 468 m<sup>3</sup>/s.
- El mayor de ellos deja pasar agua en ambos sentidos, ya que es el que permite la entrada desde el canal al embalse.

Esta presa da lugar a la formación del embalse del Arenoso, del cual ya se conocen sus objetivos a cumplir. Del embalse se conocen los siguientes datos:

- Capacidad: 167 Hm<sup>3</sup>
- Superficie inundada: 765 ha.

Nivel máximo marcado por la cota umbral del aliviadero: 209 m.s.n.m.



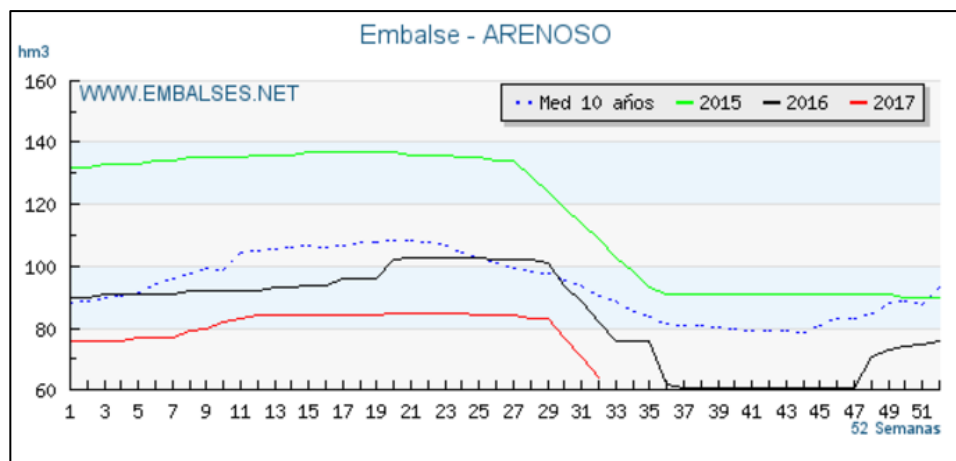


Ilustración 2-6. Evolución del volumen embalsado en los últimos años

Fuente: [www.embases.net](http://www.embases.net)

## 2.4. Instalación de bombeo

La instalación para el bombeo está formada por cuatro grupos motobomba verticales, las cuales elevan el agua a una altura manométrica variable. La potencia de los motores es de 2400 kW. Los motores son de doble velocidad, de esta forma, cuando el nivel del embalse es bajo funcionan los cuatro grupos a la velocidad menor, mientras que cuando el nivel del embalse es alto funcionan tres de los cuatro grupos. El caudal nominal del bombeo es de 10 m<sup>3</sup>/s, por lo que cuando el bombeo funciona a baja velocidad el caudal unitario es de 2.78 m<sup>3</sup>/s. Cuando funcionan 3 grupos, el caudal unitario es de 3.33 m<sup>3</sup>/s.

La impulsión se realiza a través de un colector de impulsión metálico de 2500 mm de diámetro interior, el cual se conecta con el desagüe de fondo de igual diámetro.

Se tienen los siguientes datos, además de los ya aportados:

- Velocidad nominal de giro: 740 r.p.m.
- Velocidad mínima de giro: 490 r.p.m.
- Cota mínima de aspiración: 135 m.s.n.m.
- Cota máxima de aspiración: 142.5 m.s.n.m.
- Cota mínima de llegada al embalse: 160 m.s.n.m.
- Cota máxima de llegada al embalse: 203 m.s.n.m.

La instalación para el bombeo se completa con las rejillas previas a las cántaras, las cántaras para el bombeo (una por grupo de bombeo), la valvulería, las tuberías, la instalación antiarriete mediante calderín de 50 Hm<sup>3</sup>, la instalación eléctrica y los equipos auxiliares.

## 2.5. Instalación para el turbinado

La instalación del turbinado cuenta con una turbina tipo Francis con un caudal nominal de 20 m<sup>3</sup>/s, una velocidad de giro de 428 r.p.m. y un alternador de 15000 kW de potencia.

## 2.6. Subestación

La subestación de la instalación tiene doble función, aportar energía eléctrica a los grupos para el bombeo e incorporar a la red la energía que se produce en el turbinado. La subestación de transformación es de 15 MVA, con una relación 66/6 kV e instalación eléctrica de media tensión (MT) a 6 kV y de baja tensión (BT) a 380 V.

## 2.7. Canal Arenoso

El canal es el elemento sobre el que se va a centrar toda la atención del presente estudio. En la siguiente imagen se puede visualizar el sistema a estudiar en planta.

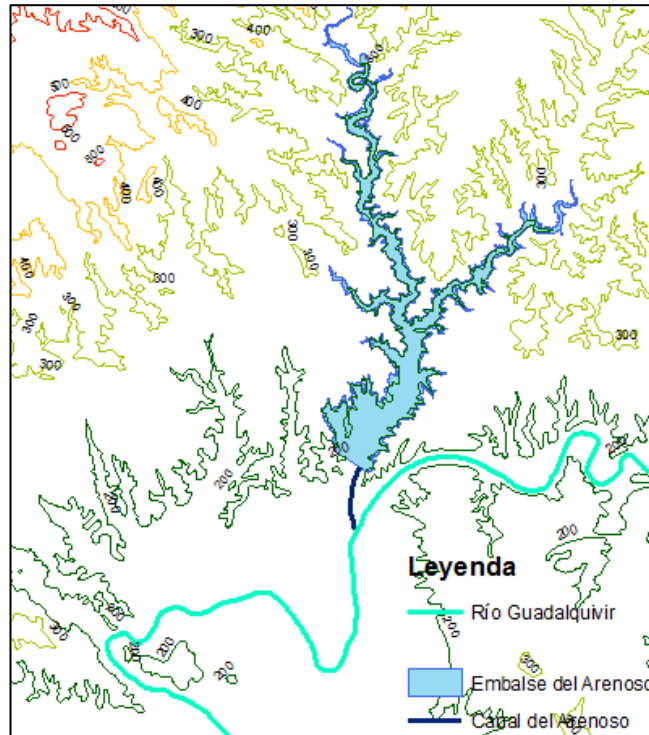


Ilustración 2-7. Vista en planta de los elementos de la zona de estudio

Funciona como elemento de unión entre el embalse y el río Guadalquivir.

Este canal tiene una longitud de 1200 metros con dos tramos diferenciados por el material del lecho. Desde el pk 0+000 (tras el cuerpo de presa) hasta el pk 0+340 el canal presenta revestimiento de escollera en ambas márgenes, mientras que desde el pk 0+340 hasta la desembocadura en el río Guadalquivir presenta el revestimiento solamente en la margen derecha.

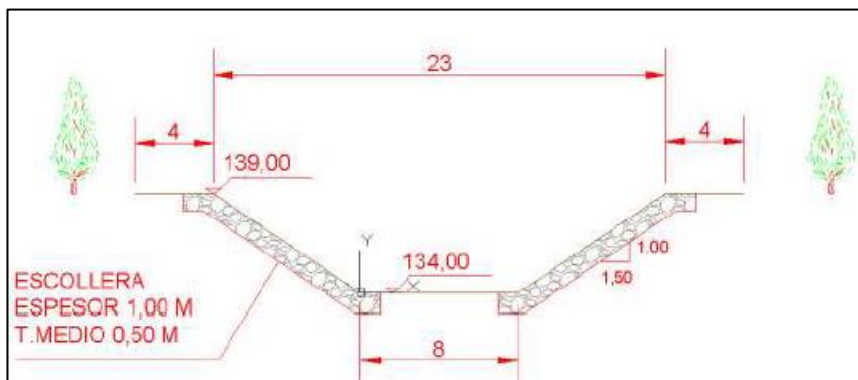


Ilustración 2-8. Sección del canal desde p.k. 0+000 a p.k. 0+340

Fuente: [1]



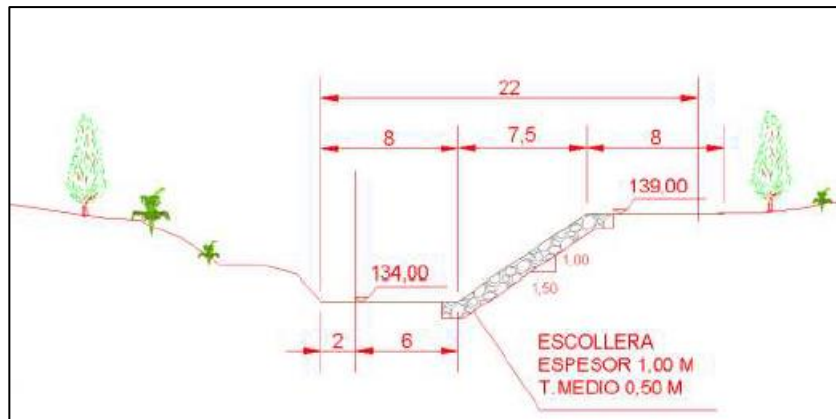


Ilustración 2-9. Sección del canal desde p.k. 0+340 hasta el final.

Fuente: [1]

Este revestimiento de escollera tiene un espesor aproximado de un metro, con un diámetro medio de escollera de 0.50 metros, por lo que tiene dos capas de material.

La cota de diseño del lecho del canal es de 134 m.s.n.m. y la altura de lámina de agua que se puede alcanzar para el caudal de estudio se representa en la siguiente tabla facilitada por la empresa explotadora al estudio previo a este:

**CANAL DE ALIMENTACIÓN DEL RÍO ARENOSO**

**Datos de partida:**

Longitud:	1220,00 m
Sección tipo:	Trapezoidal
Ancho base:	8,00 m
Talud:	3 (h) : 2 (v) 1,50
Cota de rasante:	134,00 m.s.n.m.
Número de Manning:	0,020
Caudal:	10,000 m <sup>3</sup> /s

Cota lámina de agua	Altura de agua	Sección de agua	Perímetro mojado	Radio hidráulico	Velocidad	Pérdidas unitarias	Pérdidas totales	Cota de lámina en la estación de bombeo
m.s.n.m.	m	m <sup>2</sup>	m	m	m/s	m/m	m	m.s.n.m.
135.50	1.50	15.375	13.408	1.147	0.650	0.000141	0.17200	135.328
136.00	2.00	22.000	15.211	1.446	0.455	0.000051	0.06164	135.938
136.50	2.50	29.375	17.014	1.727	0.340	0.000022	0.02730	136.473
137.00	3.00	37.500	18.817	1.993	0.267	0.000011	0.01384	136.986
137.50	3.50	46.375	20.619	2.249	0.216	0.000006	0.00770	137.492
138.00	4.00	56.000	22.422	2.498	0.179	0.000004	0.00459	137.995
138.50	4.50	66.375	24.225	2.740	0.151	0.000002	0.00289	138.497
139.00	5.00	77.500	26.028	2.978	0.129	0.000002	0.00190	138.996
139.50	5.50	89.375	27.831	3.211	0.112	0.000001	0.00129	139.499
140.00	6.00	102.000	29.633	3.442	0.098	0.000001	0.00090	139.999

Ilustración 2-10. Cotas para un caudal de 10 m<sup>3</sup>/s

Fuente: [1]

Los valores de la Ilustración 2-10 son los que se emplearán en la simulación del caso: un caudal de 10 m<sup>3</sup>/s y una cota de lámina de agua de 6 metros. Se consideran tales como los correspondientes a una avenida. Como se ha comentado, estos datos fueron facilitados por la empresa explotadora al inicio de la línea de investigación.

## 2.8. Material sólido

En este tipo de estudio en el que se pretende tratar un problema con presencia de material sólido es necesario conocer qué tipo de material va a estar presente, para ello es necesario analizar la geología de la cuenca a la que pertenece el río. Como el problema viene asociado a la entrada de partículas desde el Guadalquivir al Arenoso hay que centrarse en la cuenca del primero de ellos.

La Cuenca del Guadalquivir tiene forma triangular abriéndose desde la provincia de Jaén hasta Cádiz. En la zona más al norte predominan unidades autóctonas procedentes de la erosión del Macizo Ibérico, mientras que en la zona más al sur predominan unidades alóctonas procedentes del volcado desde las Cordilleras Béticas.

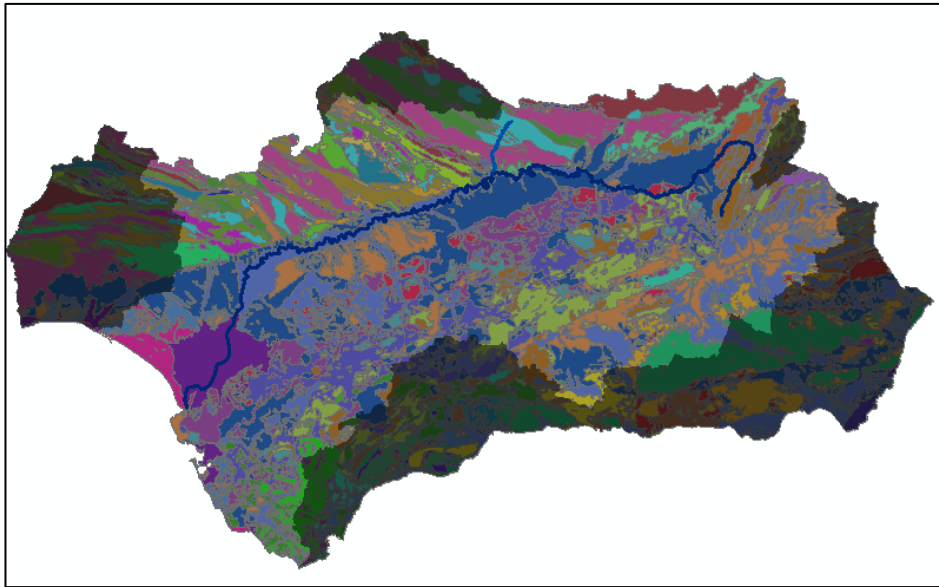


Ilustración 2-11. Materiales de la cuenca del río Guadalquivir

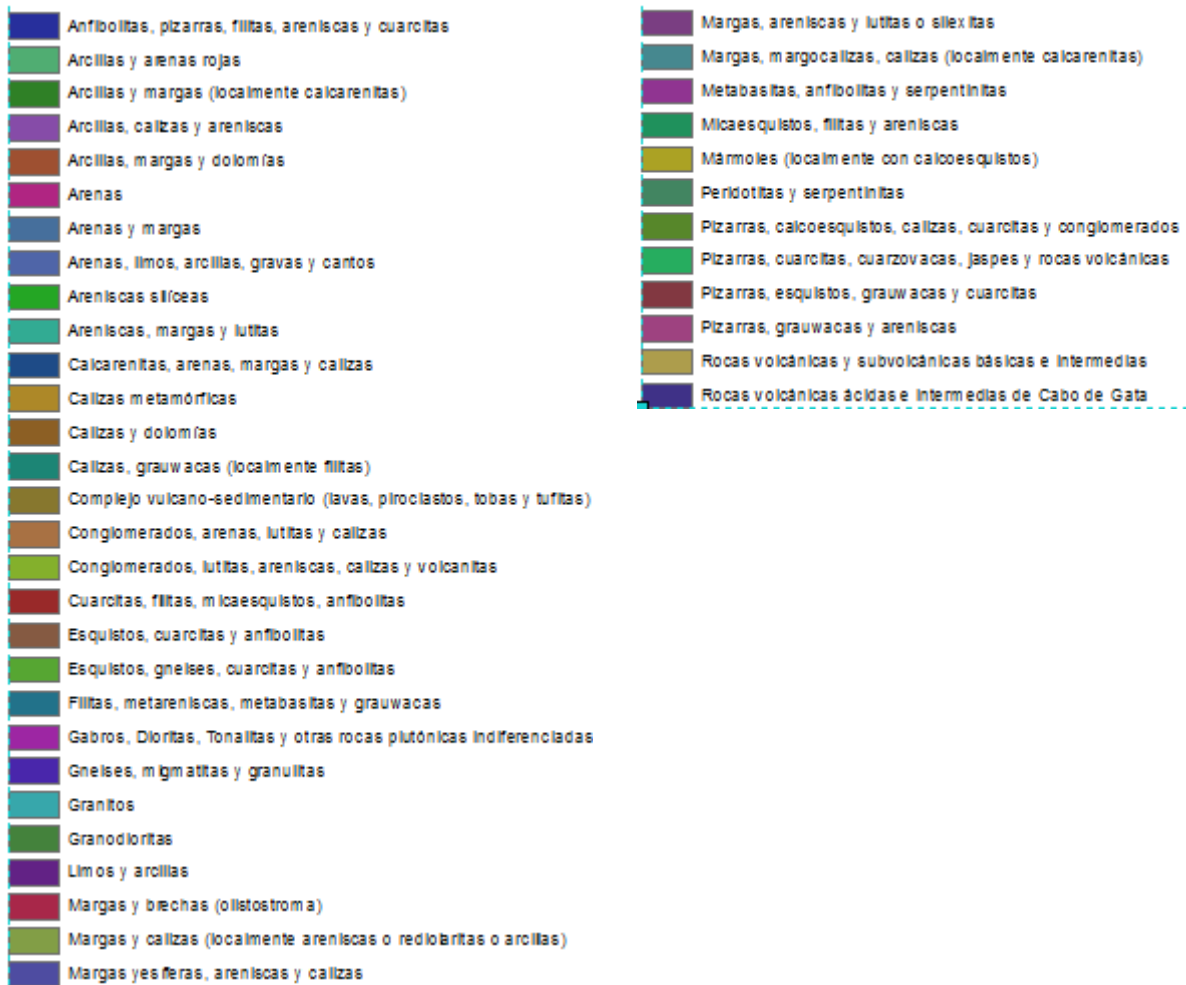


Ilustración 2-12. Nombre de los materiales de la Ilustración 2-11

En la Ilustración 2-11 e Ilustración 2-12 puede verse el material por el que discurre el río Guadalquivir hasta su punto de conexión con el Arenoso. Solo es de interés la zona hasta el punto de conexión, la cual está formada principalmente por arcillas, limos y arenas.

En esta misma figura, la zona sin sombrear representa la cuenca del Guadalquivir.

### 2.8.1. Red Saica

La red Saica se define como Sistema Automático de Información de Calidad y tiene como objetivo mejorar el conocimiento de la realidad del estado de los recursos hídricos de la cuenca del río Guadalquivir. Permite conocer parámetros relacionados con la calidad del agua, entre los que se encuentran los sólidos en suspensión, lo cual puede permitir cuantificar la cantidad de sólidos presentes en el flujo de agua.

Los sólidos totales de una muestra de agua se dividen en sólidos en suspensión y en sólidos disueltos, siendo de interés para este estudio los sólidos en suspensión.

La red está formada por 21 Estaciones Automáticas de Alerta (EAA). Estas estaciones están compuestas por un equipo que bombea agua del río a la estación y realiza medidas de sólidos en suspensión, conductividad, pH, temperatura y oxígeno disuelto.

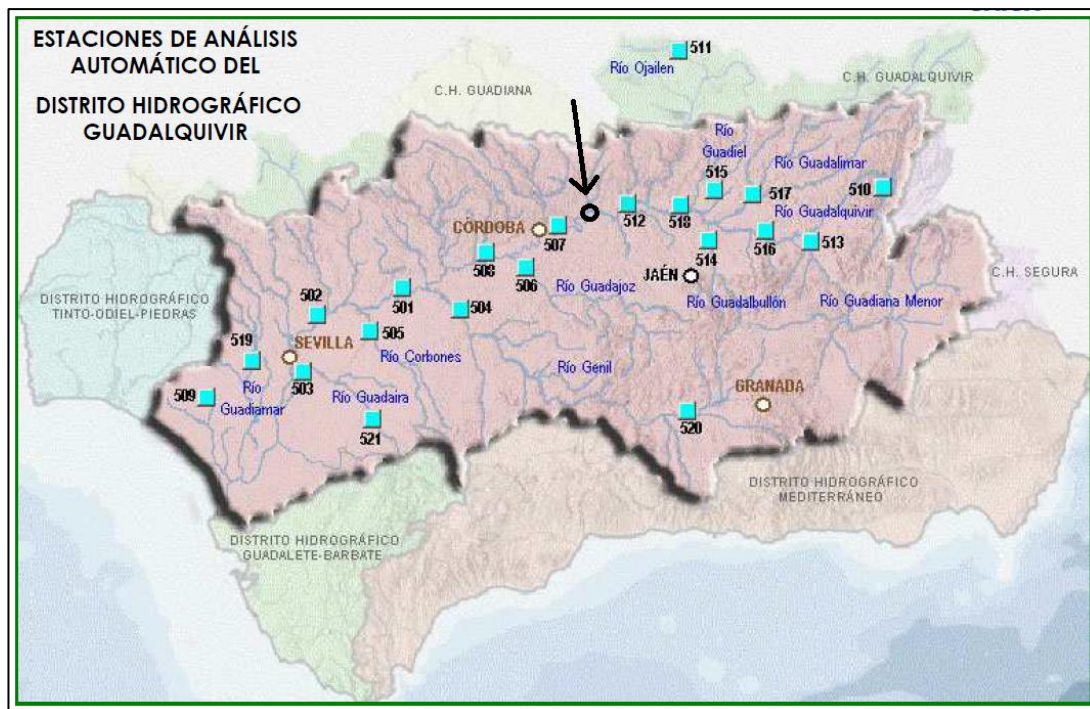


Ilustración 2-13. Estaciones Automáticas de Alerta  
Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

La ubicación de la zona en estudio se encuentra en el curso medio – bajo del Guadalquivir, entre las estaciones 507 y 512 mostradas en la Ilustración 2-13, por lo que serán sobre las que se centre el estudio de sólidos.


Estación de Córdoba		Código: 507	
<b>Ubicación de la Estación</b>			
Cauce:	RÍO GUADALQUIVIR	UTM X:	350.758
Municipio:	CÓRDOBA	UTM Y:	4.195.092
Provincia:	CÓRDOBA	HUSO:	30
		N:	37° 53' 28.02"
		W:	4° 41' 50.22"
<b>Masa de Agua</b>			
Tipología:	17 - Grandes ejes en ambiente mediterráneo		Código masa 511100111
<b>Acceso a la E.A.A.</b>			
Desde la A- IV, se toma la salida 391 se continua en dirección a la penitenciaría. Se toma el carril de servicio de la margen derecha en dirección a Sevilla, que pasa por detrás de una gasolinera y se sigue por dicho carril 2,5 Km hasta llegar bajo el puente de la A-IV sobre el río Guadalquivir.			
<b>Parámetros de calidad del agua</b>		<b>Fotografía de la estación</b>	
pH Conductividad Oxígeno disuelto Temperatura Turbidez / Sólidos en suspensión Materia Orgánica (SAK) Nivel			
<b>Mapa de situación</b>		<b>Croquis de acceso</b>	
			

Ilustración 2-14. Ficha de la estación 507

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir



Estación de S. Julián		Código: 512	
<b>Ubicación de la Estación</b>			
Cauce:	RÍO GUADALQUIVIR	UTM X:	397.190
Municipio:	MARMOLEJO	UTM Y:	4.208.476
Provincia:	JAÉN	HUSO:	30
N:	38° 1' 05.34"	W:	4° 10' 16.56"
<b>Masa de Agua</b>			
Tipología:	17 - Grandes ejes en ambiente mediterráneo		
Código masa:	511100086		
<b>Acceso a la E.A.A.</b>			
Desde la salida 335 de la A-IV hacia Marmolejo se pasa por un polígono industrial, se sigue por la carretera de servicio. Se continúa por el carril de servicio paralelo a la A-IV hasta la Estación de Bombeo, junto a ella se encuentra la EAA			
<b>Parámetros de calidad del agua</b>		<b>Fotografía de la estación</b>	
pH Conductividad Oxígeno disuelto Temperatura Turbidez / Sólidos en suspensión Materia Orgánica (SAK) Nivel			
<b>Mapa de situación</b>		<b>Croquis de acceso</b>	
			

Ilustración 2-15. Ficha de la estación 512

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

De todas las medidas realizadas por las EAA interesan las relacionadas con los sólidos: turbidez y sólidos en suspensión. La medida de la turbidez se realiza en NTU (unidad nefelométrica de turbidez), la cual puede ser empleada para obtener una aproximación de los sólidos totales en suspensión. Además de a través de la turbidez, existe una medida directa de los sólidos en suspensión en algunas estaciones.

La medida de sólidos en suspensión se realiza mediante un equipo con método de medición de luz difusa con ángulo dual dispersa a 90°. Este equipo permite medir turbidez, según el método EN ISO 7027 y sólidos en suspensión según DIN 37414 en un rango de 0.001 a 50 g/L.

El problema que presenta la turbidez es que solamente permite medir valores inferiores a 500 NTU, por lo que su medida será representativa de situaciones que no se corresponden con avenidas, lo cual puede dar una idea de los sólidos en condiciones normales de funcionamiento.

Por otro lado, la medida de sólidos no presenta este límite, sin embargo, solamente existen medidas del año 2011. Aún así, según un estudio de evolución de turbidez en el Guadalquivir realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir [20], el periodo de 2009 a 2011, desde el punto de vista hidrológico, se

considera húmedo, siendo el periodo más lluvioso de los últimos treinta años, teniendo una precipitación total registrada de 630 mm frente a los 550 mm de la media. Esta última idea aumenta la valoración sobre el empleo del año 2011 como referencia en cuanto a sólidos, ya que la mayor parte de los sólidos en el canal son aportados durante las avenidas del río Guadalquivir.

Establecidas las limitaciones que presenta este método para determinar los sólidos en suspensión y la ventaja de tener el año 2011 como año húmedo, se pasa al análisis de las estaciones para obtener la fracción volumétrica de sólidos en la zona de estudio.

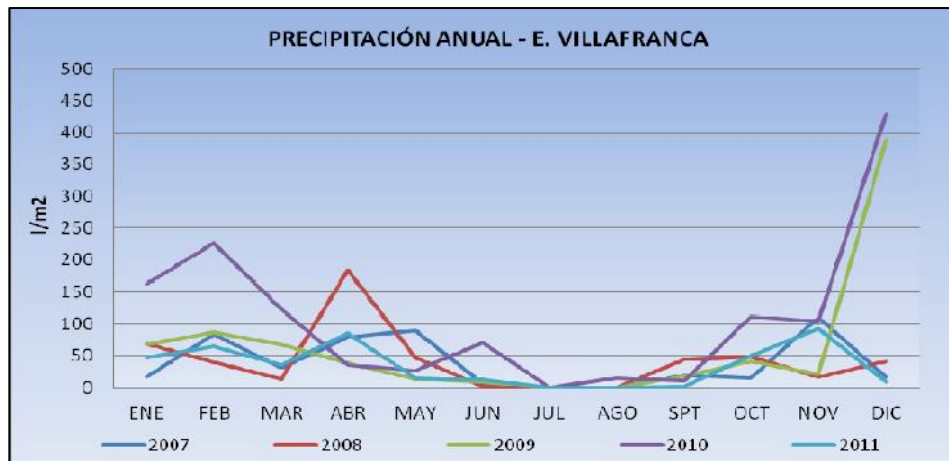


Ilustración 2-16. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 507

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

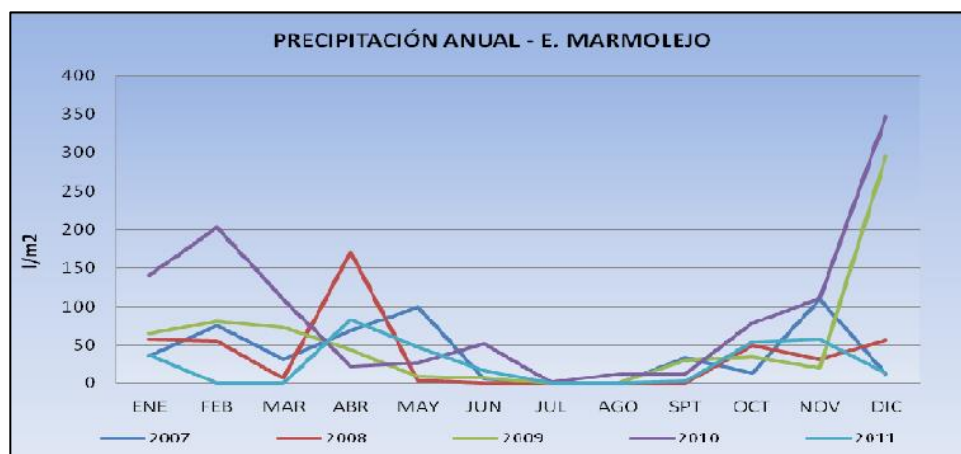


Ilustración 2-17. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 512

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Teniendo en cuenta la limitación que presentan los datos de turbidez se procede a analizar los datos de sólidos en suspensión del año 2011.

Para la estación 507 los meses de octubre a diciembre, aunque no sean los más lluviosos, presentan datos significativos. Durante estos meses se recogen los datos mostrados en la Ilustración 2-18.

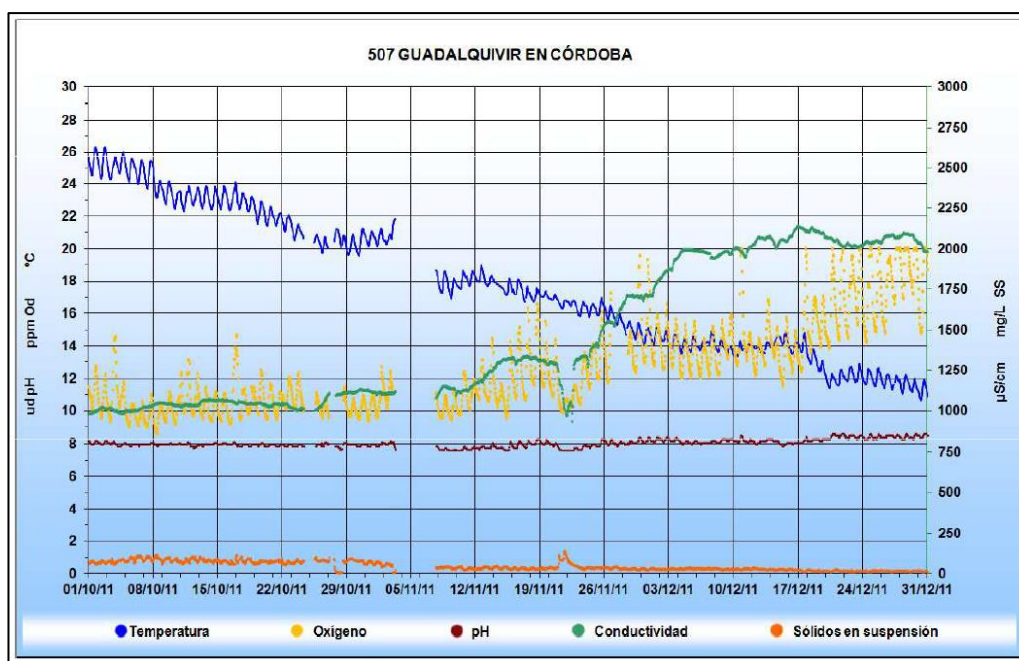


Ilustración 2-18. Medidas EAA 507 meses octubre a diciembre

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Siendo el valor máximo próximo a 250 mg SS / L.

El valor de sólidos en suspensión durante el funcionamiento normal se encuentra en torno a los 100 – 150 mg SS / L.

Otros meses interesantes según se aprecia en la Ilustración 2-16 son:

- Abril de 2008.
- Diciembre de 2009.
- Enero – Marzo 2010.
- Diciembre 2010.

En la mayoría de estos meses la EAA se encuentra inundada, impidiendo la obtención de datos. Por lo que puede establecerse que para la estación 507 un valor de 250 mg SS / L son representativos de episodios de lluvia, pero no extrema.

En la estación 512, como se aprecia en la Ilustración 2-17, se tienen los siguientes meses interesantes:

- Abril 2008.
- Diciembre 2009.
- Enero – Marzo 2010.
- Diciembre 2010.

La mayor parte de los días de los meses indicados la EAA ha permanecido inundada, lo cual provoca que los datos de esta estación sean poco representativos.

Para no tener una única estación como referencia, se ha analizado también la EAA 518, que se encuentra aguas arriba de la 512, aunque esté alejada de la zona de estudio.

Los datos de lluvia son similares a los representados anteriormente de las estaciones 507 y 512, por lo que las fechas representativas de avenidas se mantienen.

Durante el mes de septiembre de 2011 se alcanza en esta estación un valor de 750 mg SS / L y durante los



meses de octubre a diciembre del mismo año se llega hasta los 500 mg SS / L.

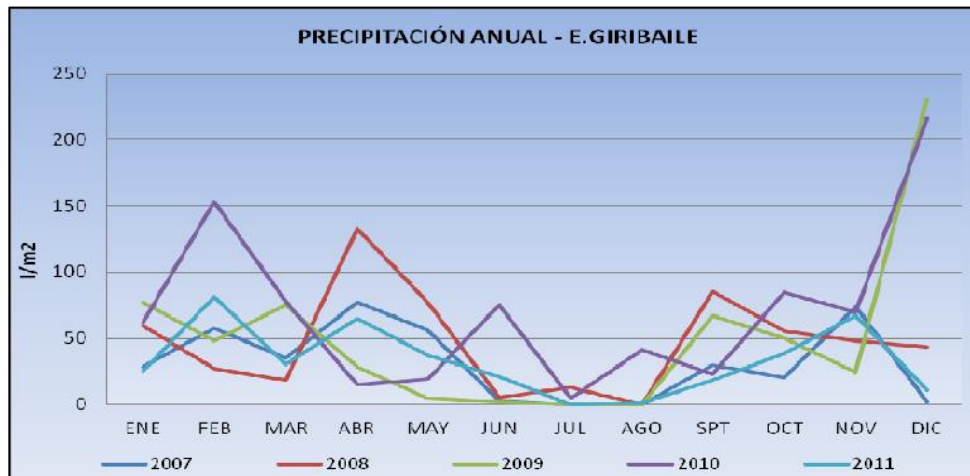


Ilustración 2-19. Precipitación anual en estación meteorológica cercana a EAA 518

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

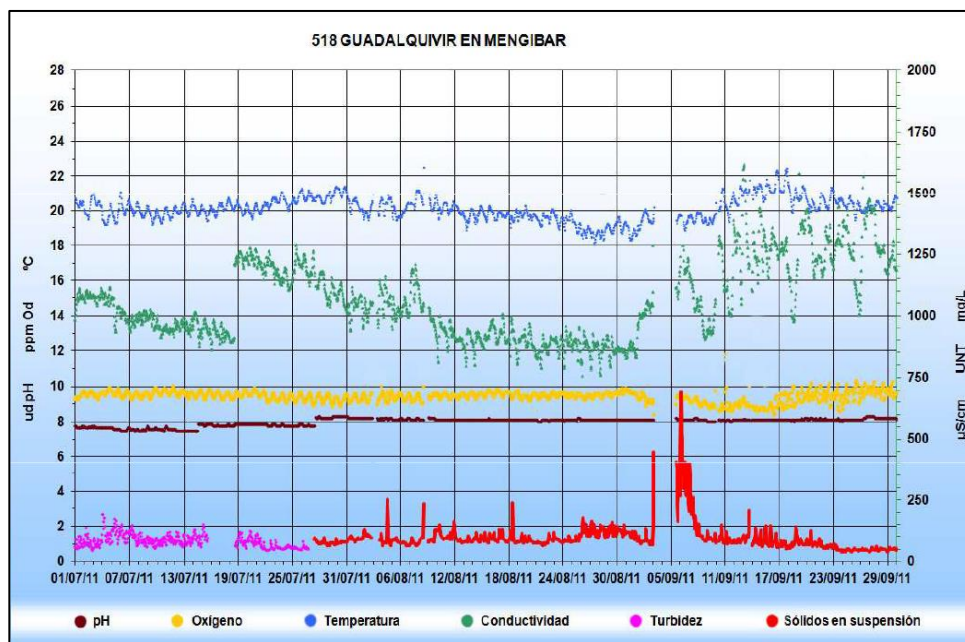


Ilustración 2-20. Medidas EAA 518 meses julio a septiembre

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

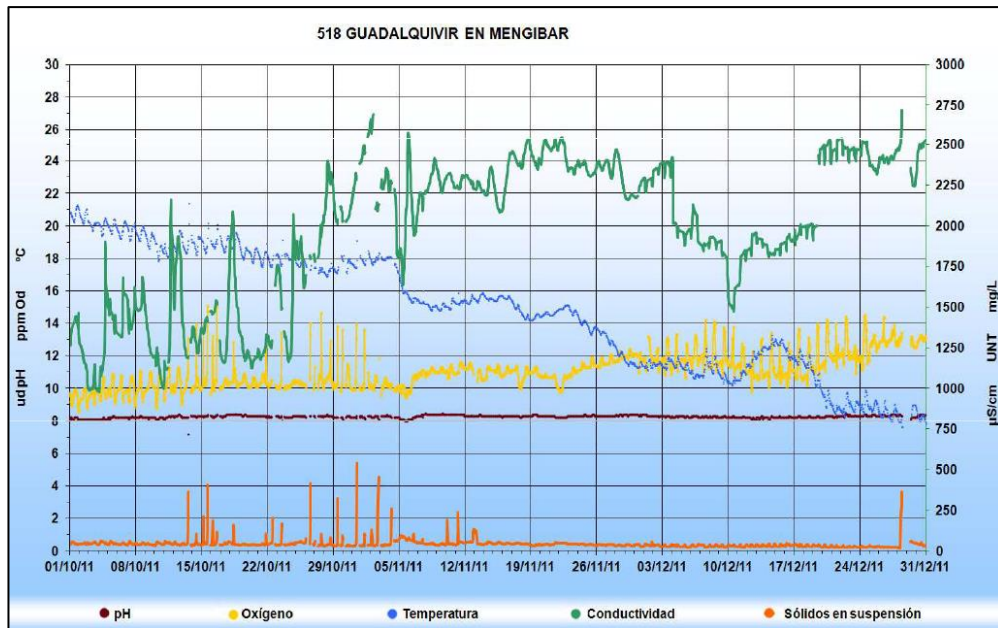


Ilustración 2-21. Medidas EAA 518 meses octubre a diciembre

Fuente: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir

Teniendo en cuenta los datos analizados, se decide, para estar del lado de la seguridad, considerar en el canal una concentración de 1000 mg SS / L, ya que, como se ha podido comprobar, en algunos casos la concentración llega a valores cercanos a 750 mg SS / L.

El siguiente paso será obtener la fracción volumétrica (V.F., del inglés *volume fraction*) de material que se tiene en el canal.

$$V.F. = 100 \frac{Q_s}{Q_T} \quad (2-2)$$

Siendo:

- $Q_s$ : caudal sólido.
- $Q_T$ : caudal total.

Teniendo en cuenta que el caudal de partida en el canal de estudio va a ser de 10 m<sup>3</sup>/s, se tiene una entrada de sedimentos de 10 kg/s. Como se verá más adelante, se van a considerar dos tipos de partículas ( $\rho_s = 1500$  kg/m<sup>3</sup> y  $\rho_s = 1900$  kg/m<sup>3</sup>), asignándole a cada una de ellas 5 kg/s.

De tal forma que se obtiene el siguiente caudal sólido:

$$Q_s = 5 \left( \frac{kg}{s} \right) * \frac{1}{1500} \left( \frac{m^3}{kg} \right) + 5 \left( \frac{kg}{s} \right) * \frac{1}{1900} \left( \frac{m^3}{kg} \right) \approx 6e-3 \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (2-3)$$

Con este valor de caudal sólido y un caudal total de 10 m<sup>3</sup>/s se obtiene una fracción volumétrica de 0.06%.

## 3 DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN A EMPLEAR

La solución que se pretende implementar consiste en el uso de agitadores o aceleradores de corriente, cuya eficacia fue propuesta y verificada en el estudio anterior al presente.

En el trabajo mencionado se nombran otras alternativas que se podrían haber considerado, sin embargo, el objetivo de esta línea de investigación tiende al empleo de agitadores, debido entre otras cosas a su efectividad y al bajo consumo energético.

Aún así, a continuación, se incluyen otro tipo de medidas que se pueden emplear.

### 3.1. Métodos de extracción de sedimentos

Dentro de los métodos de extracción de sedimentos podrían considerarse dos tipos:

- Solución directa: métodos de extracción.
- Solución indirecta: métodos para impedir o reducir la entrada de sólidos.

#### 3.1.1 Soluciones directas

Las soluciones directas consisten, como su propio nombre indica, en la extracción directa del material. Se tratan de medidas correctivas, puesto que corrigen el funcionamiento del sistema, pero no dan una solución definitiva. El aporte constante de sedimento por parte del río Guadalquivir volverá a aterrar el canal con el paso del tiempo.

- Dragado. Se trata de un método de extracción de acción directa en el que se extrae el material depositado en el fondo del canal mediante medios mecánicos (dragas mecánicas: similar a excavación terrestre) o equipos hidráulicos (dragas de succión).
- Remoción hidráulica de sedimentos. Esta solución consiste en emplear la fuerza erosiva del agua para limpiar el fondo del canal. Aprovechando la existencia de un embalse en uno de los extremos del canal, podría descargarse agua que permita el arrastre de partículas desde el canal al Guadalquivir. El problema que presenta es la pérdida de volumen almacenado en las descargas de limpieza.
- Retiro de sedimentos con sifón. Gobernado por el efecto de vacío debido a la diferencia de niveles entre la toma de descarga y la extractora. Este sistema emplea la energía hidráulica disponible por diferencia de niveles, por lo que se necesita diferencia de cota considerable para que el agua recorra el sifón completo dejando los sólidos en la parte baja.

#### 3.1.2 Soluciones indirectas

La medida indirecta más eficaz sería ubicar las instalaciones en zonas donde el aporte de material sea muy bajo. Sin embargo, esto solo es posible en nuevos proyectos, y necesitan un estudio muy detallado de la cuenca en la que se va a situar.

La presencia de la fase sólida en una corriente genera erosión (generada por las partículas), transporte y deposición. La solución de estos problemas podría estar en ir directamente a su origen, es decir, la erosión generada por otros factores sobre el material sólido para provocar el desprendimiento de partículas dando lugar a los sedimentos. Detener la erosión al completo es una tarea físicamente imposible, además de económicamente, pero sí que pueden llevarse a cabo medidas que lo frenen. En la actualidad, tanto en España como en otros países, la presencia de sedimentos está generando grandes problemas, por ejemplo, el aterramiento de algunos embalses o el daño de instalaciones de bombeo o turbinado, como es el caso del

presente estudio. Llevar a cabo medidas para intentar paliar este efecto en su origen puede suponer un gasto extra en la confección de los proyectos puesto que estos problemas varían en función de la situación (para una misma actuación, lo que en una zona genera una ventaja, en otra ocasiona un problema) y habría que hacer un estudio al máximo detalle, pero un alivio, incluso económico, desde el punto de vista de la conservación y mantenimiento de las instalaciones una vez se pone en marcha la actividad.

Teóricamente existen actuaciones posibles a llevar a cabo para resolver el problema de la erosión. A continuación, se exponen brevemente, puesto que no es objetivo del estudio, algunas de las que se consideran que generan menor impacto ambiental:

- Tratamiento vegetal. La presencia de vegetación sobre el terreno genera una protección del suelo que dificulta el arrastre y desprendimiento de material sólido.
- Agricultura. Cultivar el campo siguiendo las líneas de nivel puede reducir la erosión generada por la escorrentía superficial.

Estas medidas además suponen una protección para el terreno.

Otra medida indirecta puede ser la coordinación con presas aguas arriba y aguas abajo del Guadalquivir en la zona de estudio.

### 3.2. Empleo de agitadores sumergibles

Dentro de la clasificación anteriormente expuesta, este método se encontraría en un paso intermedio, puesto que el objetivo es crear una zona controlada de depósito de sedimentos que posteriormente hay que extraer de forma directa.

Los agitadores sumergibles son elementos que aportan velocidad al flujo. Normalmente se emplean en plantas de tratamiento de aguas para remover el fluido y permitir la mezcla con reactivos añadidos.

En este caso, el objetivo que persiguen es crear una recirculación del flujo que genere zonas de baja velocidad donde se favorezca la deposición de sedimentos.

Para su modelado en Ansys Fluent ha sido necesario realizar un estudio de los catálogos de los principales fabricantes de estos dispositivos para caracterizarlos según sus parámetros de diseño.



Ilustración 3-1. Aceleradores de corriente de distintos tamaños

Fuente: fabricante Sulzer

Los agitadores pueden ser tanto verticales como horizontales, si nos referimos a su eje de giro, siendo interesantes para este caso los de eje horizontal. Dentro del grupo de agitadores de eje horizontal existen dos grandes grupos:

- Agitadores de alta velocidad. Son de menor diámetro y generan en el flujo velocidades superiores a 3 m/s. Esta última característica conlleva mayor gasto energético. Estos agitadores no son objeto del presente estudio.
- Agitadores de baja velocidad. Imprimen al fluido una velocidad máxima entre 1.5 y 3 m/s. Es el grupo en el que se centra el estudio. Sus diámetros los hacen competentes en la búsqueda de los objetivos de recirculación que se persigue.

Un parámetro característico de un agitador es su eficiencia, la cual se define como:

$$Eficiencia = \frac{Empuje}{Potencia consumida} \quad (3-1)$$

Como se aprecia en la fórmula 3-1, un agitador será más eficiente mientras mayor cantidad de flujo mueva consumiendo la menor potencia. Esta fórmula se ha obtenido de los catálogos de fabricantes [11] y [12], los cuales se basan en la norma ISO 21630, específica para agitadores sumergibles. Sin embargo, para este trabajo no pasa de un concepto teórico, puesto que se buscará la eficiencia desde un punto de vista que se verá en el apartado correspondiente a los resultados.

Realizado un estudio de varios fabricantes, se extraen los siguientes parámetros como característicos de su diseño:

- Velocidad de giro.
- Potencia máxima.
- Diámetro.

Estos tres parámetros, junto con su colocación en el canal serán los parámetros a considerar en el proceso.

La colocación de los agitadores, para que se genere la recirculación deseada, ha de ser diagonal, habiendo que determinar:

- Separación longitudinal entre ellos.
- Altura de colocación.
- Separación transversal.

Algunas recomendaciones realizadas por los fabricantes en cuanto a su posición son [11] [12]:

- Es recomendable que la altura de su eje sea igual a su diámetro (Ilustración 3-2).
- La distancia máxima a la que llega el efecto de un agitador es de 2.5 veces la altura de lámina de agua.

Estas recomendaciones serán objeto de revisión en las simulaciones a realizar.

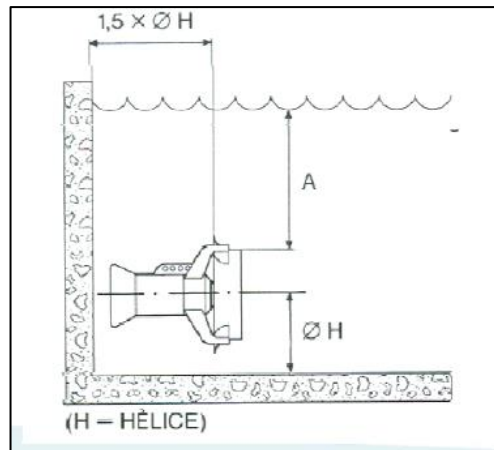


Ilustración 3-2. Colocación de agitador

Fuente: fabricante FLYGT

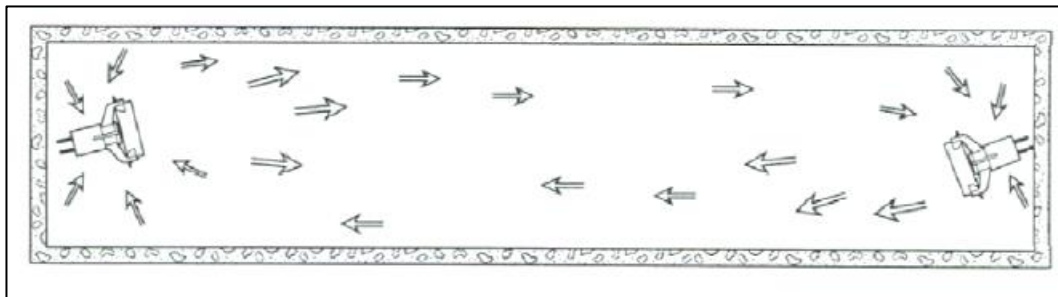


Ilustración 3-3. Colocación de agitadores

Fuente: fabricante FLYGT

Del estudio de agitadores en el mercado se han extraído las siguientes conclusiones:

- Rango de potencia: 0.6 – 7.5 kW.
- Rango de velocidad de giro: 36 – 134 rpm.
- Rango de diámetros: 0.9 – 2.75 m.

En concreto, en Tabla 3-1 se incluyen cada uno de los rangos anteriores con mayor detalle.

Tabla 3-1. Resumen estudio de mercado de agitadores

Diámetro (mm)	Potencia (kW)	Velocidad de giro (rpm)
900	0.6	76
	2.4	134
1200	1.6	79
	3	102
1400	1	49
	3.5	86
1600	0.7	36
	3.6	86
1800	0.8	39
	3.8	86
2000	1.1	39
	3.9	86
2200	1.1	39
	6.5	86
2500	1.4	36
	6.7	86
2750	4.8	57
	7.5	86

De la tabla anterior puede deducirse que, para mover los álabes de un agitador de mayor diámetro la potencia necesaria es mayor. Esto se traduce, según la fórmula 3-1, en que a medida que se aumenta el tamaño del agitador se reduce la eficiencia. La potencia consumida es mayor para mantener un empuje constante a medida que aumenta el diámetro.

### 3.2.1. Caracterización geométrica

Geoméricamente se van a caracterizar por un diámetro exterior, un diámetro interior y el espesor.

- Diámetro exterior: rango establecido en Tabla 3-1.
- Diámetro interior: valor fijo en 0.25 m para todos los agitadores. Representa el diámetro del cuerpo del motor. En la Ilustración 3-1 puede visualizarse que a pesar de cambiar el diámetro de los álabes el cuerpo del motor se mantiene constante. Ilustración 3-3. Colocación de agitadores
- Espesor: valor fijo de 0.20 m. Representa el espesor de los álabes.

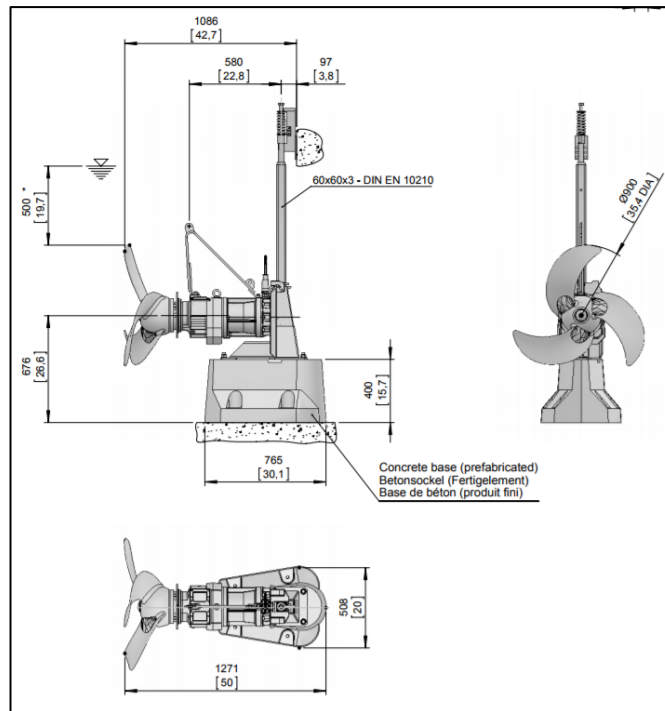


Ilustración 3-4. Alzado, planta y perfil de agitador de 900 mm de diámetro

Fuente: fabricante Sulzer

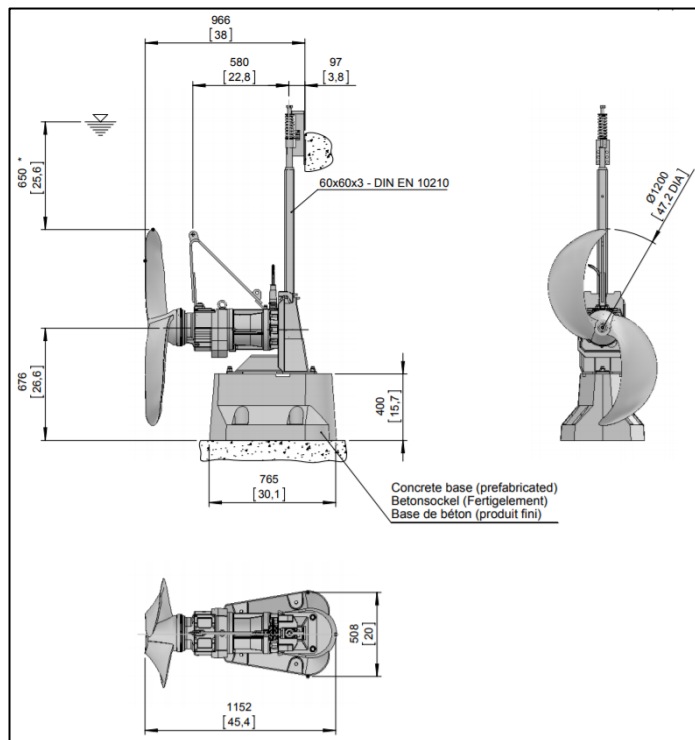


Ilustración 3-5. Alzado, planta y perfil de agitador de 1200 mm de diámetro

Fuente: fabricante Sulzer



### 3.2.2. Caracterización de funcionamiento

Además de la caracterización geométrica, se han establecido como parámetros claves de funcionamiento la velocidad de giro y la potencia máxima.

La velocidad de giro es un parámetro a introducir directamente, sin embargo, el valor de la potencia se va a emplear para generar una curva de funcionamiento altura – caudal (curva H-Q) del agitador o curva característica, ya que funciona como una bomba.

Las curvas de funcionamiento de las bombas representan la altura necesaria (eje de ordenadas) para dar un determinado caudal (eje de abscisas). Estas curvas características varían de forma en función del tipo: axial, radial o mixta.

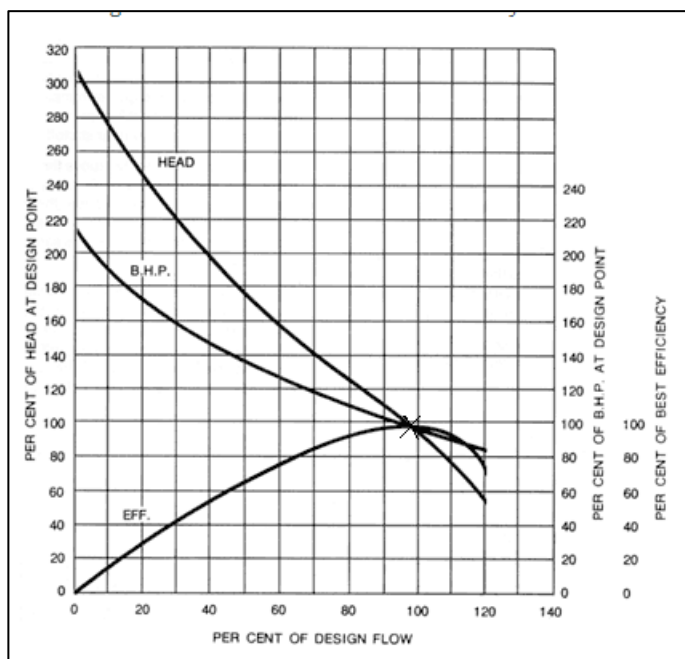


Ilustración 3-6. Curva H-Q bomba de flujo axial

Fuente: [21]

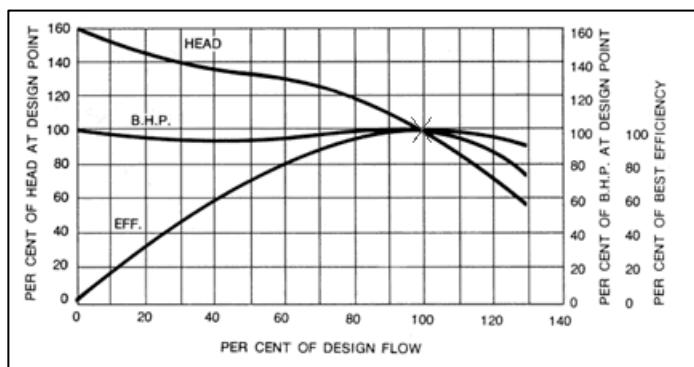


Ilustración 3-7. Curva H-Q bomba de flujo mixto

Fuente: [21]

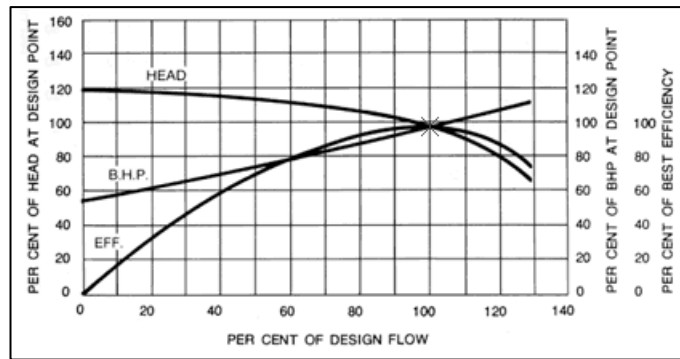


Ilustración 3-8. Curva H-Q bomba de flujo radial

Fuente: [21]

En la Ilustración 3-6 puede verse la forma típica de la curva característica de los agitadores. Las simplificaciones tomadas para caracterizar la curva H-Q a usar en este estudio son las siguientes:

- Punto de diseño es el punto de máximo rendimiento.
- Caudal de diseño es la mitad del caudal máximo.
- El agitador trabaja próximo a su punto de máximo rendimiento.
- La curva de rendimiento tiene tal forma que:
  - o Caudal mínimo es cero y se corresponde con rendimiento 0.
  - o Caudal de diseño se corresponde con máximo rendimiento.
  - o Caudal máximo es el doble del caudal de diseño y su rendimiento es 0.

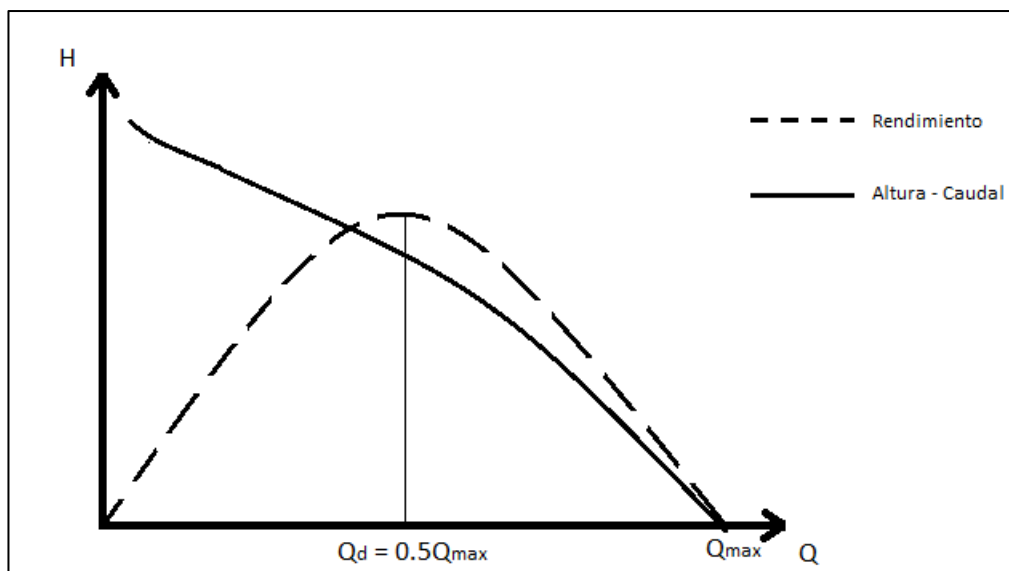


Ilustración 3-9. Simplificaciones consideradas en curva H-Q

Además de las simplificaciones anteriores, se va a considerar solo una porción de la curva H-Q comprendida entre  $0.5Q_d$  y  $1.5Q_d$  con el objetivo de poder considerar la curva como una función parabólica. Esto quiere decir que el punto de funcionamiento se encuentra comprendido entre los límites de eje de abscisas establecidos.

A partir de las simplificaciones propuestas y la fórmula de la potencia (ecuación 3-2) se va a obtener la curva

H-Q.

$$W = \frac{\rho_w g Q H}{\eta} \quad (3-2)$$

Donde:

- $\rho_w$ : densidad del fluido.
- $g$ : gravedad.
- $Q$ : caudal.
- $H$ : altura.
- $\eta$ : rendimiento del conjunto agitador – motor. Para estar del lado de la seguridad, se va a suponer en el punto de funcionamiento un valor del rendimiento bajo, de 0.5.
- $W$ : potencia máxima.

La altura se puede relacionar con la velocidad para dejarlo todo en función del caudal:

$$H = k \frac{v^2}{2g} \quad (3-3)$$

Siendo  $k$  el coeficiente de pérdidas, que se va a considerar de valor 1.1.

Teniendo esto en cuenta, el valor del caudal y altura en el punto de diseño queda en función de parámetros conocidos:

$$Q_d = \left( \frac{W \eta}{\rho g} 2g \frac{(\pi D^2)^2}{4^2 k} \right)^{1/3} \quad (3-4)$$

$$H_d = k \frac{Q_d^2}{\left( \frac{\pi D^2}{4} \right)^2 2g} \quad (3-5)$$

Como la relación altura – caudal es parabólica:

$$H = B_0 - B_2 Q^2 \quad (3-6)$$

Donde los valores de las constantes  $B_0$  y  $B_2$  se obtienen de la relación entre caudales establecida en las simplificaciones:

$$H_d = B_0 - B_2 Q_d^2 \quad (3-7)$$

$$0 = B_0 - B_2 (2Q_d^2) \quad (3-8)$$

Con las ecuaciones 3-7 y 3-8 se obtienen las constantes:

$$B_0 = \frac{4}{3}H_d \quad (3-9)$$

$$B_2 = \frac{H_d}{3Q_d^2} \quad (3-10)$$

Finalmente queda la siguiente curva altura – caudal:

$$H = \frac{4}{3}H_d - \frac{H_d}{3Q_d^2}Q^2 \quad (3-11)$$

Donde los valores de Q oscilan entre  $0.5Q_d$  (o  $0.25Q_{\max}$ ) y  $1.5Q_d$  (o  $0.75Q_{\max}$ ).

A continuación, se incluye una figura solamente para visualizar la forma de la curva, puesto que en el apartado correspondiente a la simulación en Ansys Fluent se incluirán las curvas de los agitadores empleados.

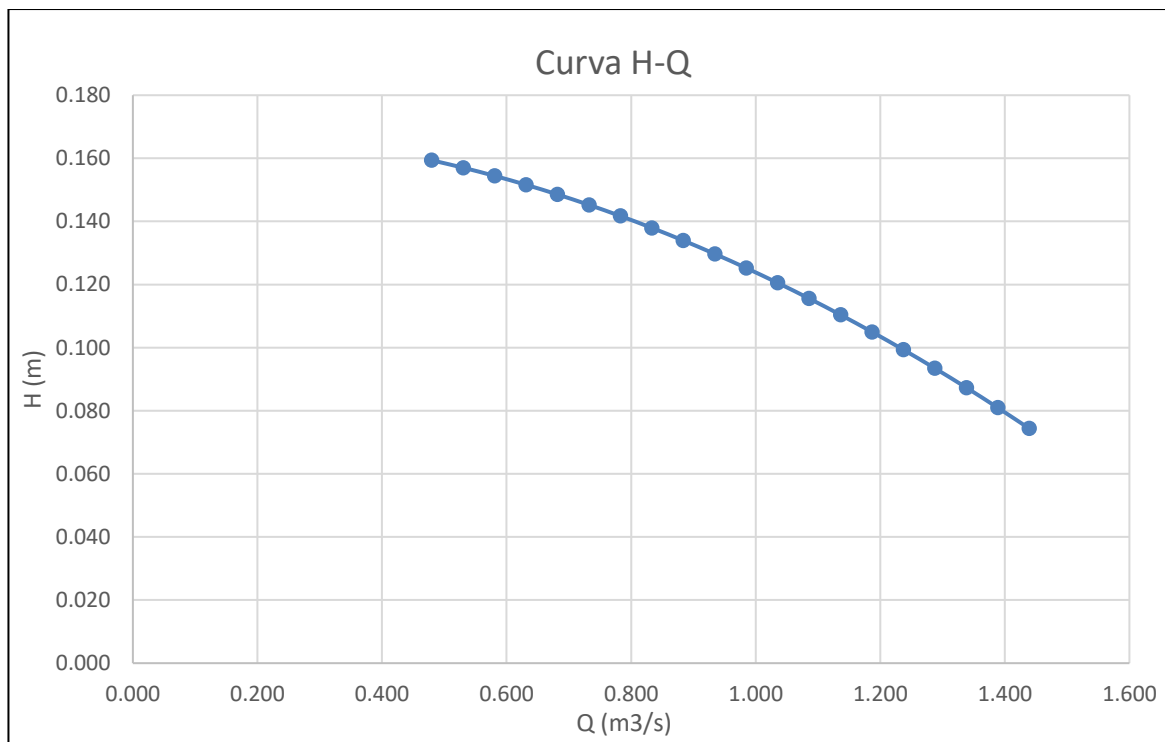


Ilustración 3-10. Tipo de curva H-Q empleada para caracterizar agitadores

### 3.3. Solución esperada

La respuesta al uso de agitadores esperada es la siguiente:

- Recirculación del flujo en la zona entre agitadores.
- Creación de zonas de remanso en las que se depositarán las partículas de forma que se controle la zona en la que se depositan.
- Aumento de la concentración entre los agitadores, debido al hecho de la creación de zonas favorables para la deposición de partículas.

## 4. TEORÍA DE SEDIMENTOS

Antes de comenzar con la simulación del problema usando un software de cálculo es necesario plantear la teoría que hay detrás del problema.

Con este apartado se pretende dar una visión teórica del posible origen de las partículas para que se genere la sedimentación y de la dinámica de pequeñas partículas en flujos no uniformes.

### 4.1. Origen de las partículas

El origen del problema del presente estudio se encuentra en la presencia de partículas sólidas en el canal.

Nos encontramos con 2 fases en el problema:

- Fase líquida: agua. Caracterizada en el problema por su densidad, viscosidad y velocidad. Este último será uno de los responsables del movimiento de las partículas sólidas. A mayor velocidad, mayor posibilidad de movimiento del material sólido.
- Fase sólida: material sólido. Sus características se dividen en las propias de cada partícula aislada y las del conjunto de partículas. Dentro de las primeras encontramos el peso específico, la forma, el tamaño y la velocidad de sedimentación entre otras. Dentro de las características de un grupo de partículas tenemos la distribución granulométrica y parámetros relacionados con esta como son la desviación típica granular y el coeficiente de graduación. En el problema a tratar se caracterizarán mediante su diámetro y densidad.

La presencia de esta fase sólida junto con la fase líquida presenta consecuencias como pueden ser la erosión, transporte y deposición.

La erosión es la responsable natural de la presencia de sedimentos en los ríos, ya sea ocasionada por la acción del viento o por la propia acción del agua. Además, existen fuentes artificiales como la explotación de minas y canteras.

El transporte de sedimento en un río se clasifica según dos criterios:

- Según su procedencia u origen: cuenca (también llamado material de lavado de la cuenca) o lecho.
- Según el modo de transporte: en suspensión o de fondo.

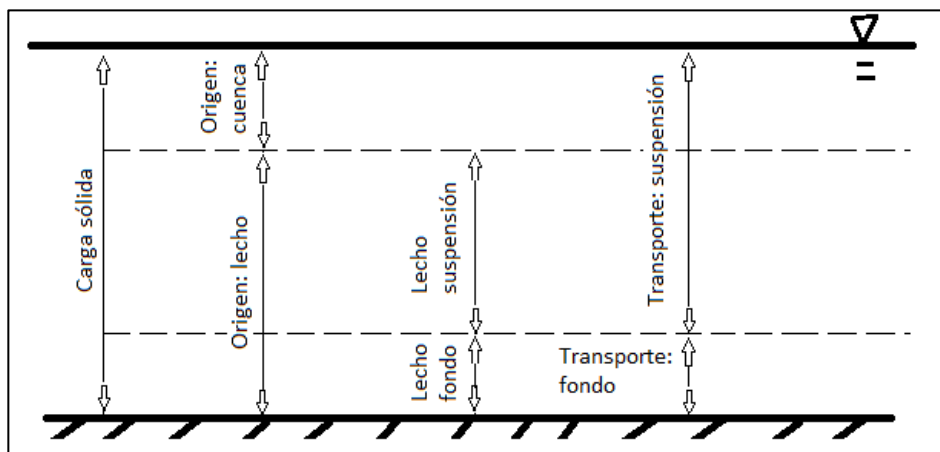


Ilustración 4-1. Transporte de sedimento en un río

El material cuya procedencia es el lecho admite ambos tipos de transporte, mientras que el procedente de la cuenca solo admite el transporte en suspensión. Esto tiene que ver con el tamaño de las partículas. Un criterio para separar ambos orígenes es considerar que las partículas de tamaño inferior a 0.065 mm proceden de la cuenca y las mayores proceden del lecho [3]. La procedencia de las partículas será la que determine sus características, lo cual está relacionado con la zona por la que discurre el río.

En cuanto al modo de transporte puede decirse que el material en suspensión es sostenido por la turbulencia del flujo, mientras que el material de fondo es arrastrado por la corriente rodando, deslizando o saltando. El corte de tamaño entre un modo de transporte y el otro está influenciado por la velocidad del flujo y la tensión que genere sobre el lecho.

Por último, se presenta la deposición. Este fenómeno ocurre cuando la partícula no es capaz de seguir en movimiento junto al flujo. Suele ocurrir en zonas donde la velocidad de la corriente es baja provocando la acumulación de partículas en el lecho. Una consecuencia puede ser la pérdida de sección del cauce, aunque puede ser compensado por erosión en otra zona. En el caso concreto de este estudio esta deposición impide que las bombas tengan altura de lámina de agua suficiente para aspirar.

## 4.2. Teoría de umbral de movimiento

Al tratar una fase granular que se mueve en una corriente de agua es necesario incluir el concepto de umbral de movimiento.

El hecho de que un lecho granular soporte la circulación de una corriente de agua provoca que en algún momento este movimiento genere el desplazamiento de las partículas que se encuentran depositadas en el fondo. Esto quiere decir que el canal en estudio no presenta únicamente partículas que entran desde la confluencia con el Guadalquivir, sino que su lecho está formado por partículas que se han ido depositando y que, en función de las características de la corriente líquida puede entrar en movimiento. Conocer las condiciones en las que se produce el inicio del movimiento de una partícula que se encuentra sobre el lecho es el objetivo que persigue la teoría del umbral de movimiento.

Añadiendo el concepto de umbral de movimiento se está incluyendo la posibilidad de resuspensión de partículas desde el lecho.

Las variables que influyen en esta teoría son la tensión de corte o acción del agua sobre el lecho y la velocidad. Estas variables se conocen como tensión crítica y velocidad crítica en el punto exacto en el que se inicia el movimiento, punto entre el movimiento y el reposo.

Analizando el problema teniendo en cuenta una única partícula, ésta ejerce una resistencia a las fuerzas que tratan de moverla, de tal forma que se puede establecer un equilibrio entre las fuerzas que tratan de desestabilizar y las que estabilizan.

- Fuerza estabilizadora. Establece resistencia al movimiento.
  - o Peso sumergido de la partícula.
- Fuerzas desestabilizadoras. Tienden a mover la partícula.
  - o Fuerzas de contacto.
  - o Fuerzas de arrastre: turbulencia, viscosidad y flotación.

Se define la tensión cortante adimensional (expresión 4-1) como un parámetro que relaciona la fuerza desestabilizadora con la estabilizadora.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_0}{(\gamma_p - \gamma_w)D_p} \quad (4-1)$$

Donde los subíndices p y w representan a la partícula sólida y al agua respectivamente, y los demás términos son:

- $\tau_0$ : tensión cortante en el fondo.

- $\gamma$ : peso específico.
- $D$ : diámetro.

Además de la tensión cortante adimensional, esta teoría hace uso del número de Reynolds granular,  $Re^*$ .

$$Re^* = \frac{v^* D_p}{\nu} \quad (4-2)$$

Donde, además de lo ya definido:

- $v^*$ : velocidad de corte.  $v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}}$
- $\nu$ : viscosidad cinemática.  $\nu = \frac{\mu_w}{\rho_w}$

En las expresiones anteriores,  $\rho$  y  $\mu$  representan la densidad y viscosidad dinámica, respectivamente.

La relación entre la expresión 4-1 y la expresión 4-2 se refleja en el ábaco de Shields (Ilustración 4-2).

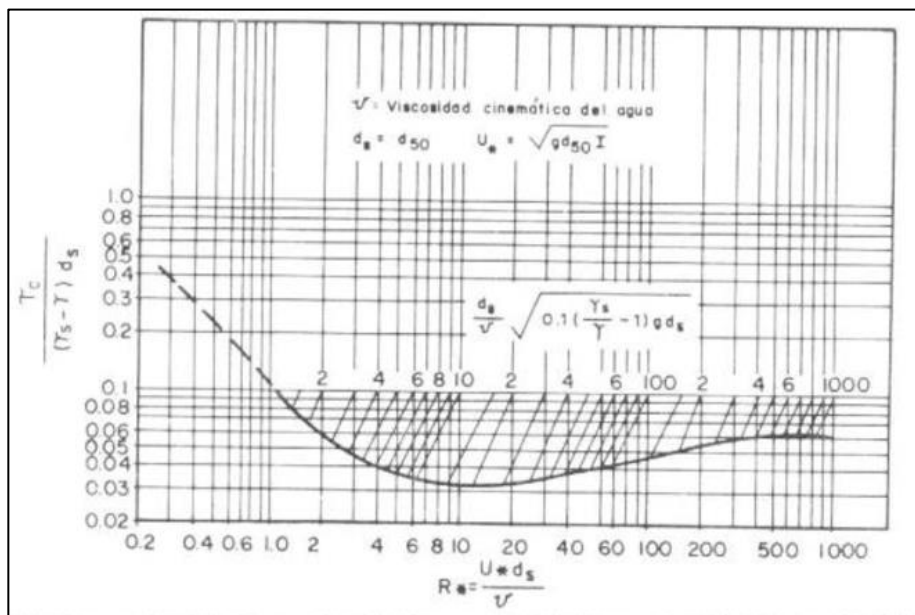


Ilustración 4-2. Ábaco de Shields

Fuente: [3]

La línea marcada en la anterior ilustración limita la zona de movimiento (zona superior) de la de reposo (zona inferior).

El número de Reynolds granular refleja el grado de turbulencia mediante la relación entre el valor relativo de las fuerzas de inercia y las viscosas en el entorno de la partícula. Se distinguen tres zonas en función del número de Reynolds granular:

- $Re^* < 5$ : movimiento turbulento liso. La subcapa límite granular cubre la altura del grano. No es habitual este caso.
- $5 < Re^* < 70$ : movimiento turbulento intermedio. Se conoce como zona de transición.
- $Re^* > 70$ : movimiento turbulento rugoso. Cuando  $Re^*$  alcanza el valor de 400,  $\bar{\tau}$  tiende a un valor constante de 0.056 sin depender de  $Re^*$ .

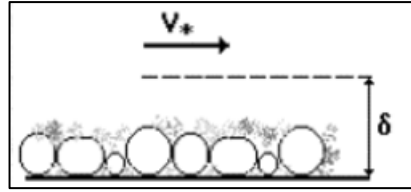


Ilustración 4-3. Movimiento turbulento liso

Fuente: [3]

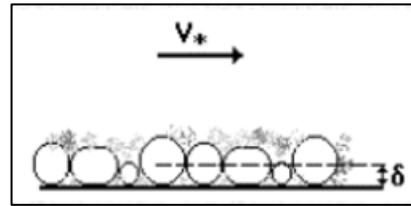


Ilustración 4-4. Movimiento turbulento rugoso

Fuente: [3]

En la Ilustración 4-3 e Ilustración 4-4,  $\delta$  representa la subcapa límite.

### 4.3. Dinámica de pequeñas partículas en flujos no uniformes

Para determinar la posición de una pequeña partícula que se mueve en un fluido se puede hacer uso de la segunda Ley de Newton (ecuación 4-3).

$$\sum F = ma \quad (4-3)$$

Siendo las fuerzas que actúan sobre la partícula (representado en la ecuación 4-3 como  $\Sigma F$ ): la gravedad, la resultante de las fuerzas de presión y la viscosidad que el fluido aplica sobre su superficie. Si se integra esta fuerza para el flujo alrededor de una esfera a bajos números de Reynolds se llega a (Maxey y Riley, Phys. Fluids 1983):

$$(\rho_p + C_M \rho_f) \Omega \frac{dv_p}{dt} = (\rho_p - \rho_f) \Omega g - 3\pi \mu d_p (v_p - v_f) + \rho_f (1 + C_M) \Omega \frac{Dv_f}{Dt} \quad (4-4)$$

En la ecuación 4-4, los subíndices p y f se refieren a la partícula y al fluido respectivamente. Además:

- $\rho$ : densidad del fluido
- $\mu$ : viscosidad dinámica del fluido
- $\Omega = \frac{\pi d_p^3}{6}$ : volumen de la partícula
- $v$ : vector velocidad
- $\frac{d}{dt}$ : derivada temporal siguiendo a la partícula
- $\frac{D}{Dt}$ : derivada temporal siguiendo al fluido

La parte correspondiente a la izquierda de la ecuación 4-4 se refiere al producto de la masa por la aceleración de partícula al que se le añade un término debido a la inercia del fluido que se mueve alrededor de la partícula



y que se llama masa virtual ( $C_M$ ). El valor de  $C_M$  es una constante, que para una esfera rígida tiene un valor de 0.5.

A la derecha de la igualdad en la ecuación 4-4 se encuentran, por orden, los términos debidos a la fuerza de la gravedad y el empuje de Arquímedes, la resistencia de Stokes para una esfera (flujo uniforme a bajos números de Reynolds) y la aceleración del fluido por ser no uniforme o no estacionario.

La validez de la expresión se reduce a ocasiones en las que el diámetro de la partícula es mucho menor que la escala característica más pequeña del flujo y la concentración de partículas es suficientemente pequeña como para poder despreciar su interacción con el fluido y entre las propias partículas. Como se ha visto anteriormente, se tiene una concentración sólida de 0.06%, inferior a 0.1%, por lo que dichas interacciones pueden ser despreciadas en los modelos.

Conocido el campo fluido  $v_f(x, t)$  puede obtenerse la trayectoria de una partícula integrando la ecuación 4-4 haciendo uso también de la relación 4-5.

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p \quad (4-5)$$

Donde  $x_p$  representa la posición de la partícula.

El problema habitual se encuentra en la obtención de una solución para el campo fluido, e incluso conociéndolo se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales de gran complejidad. Esta complejidad está asociada a la no linealidad introducida por la función  $v_f(x, t)$ . Este es el motivo por el que se recurre a técnicas de simulación computacional para la resolución de este tipo de problemas.

Adimensionalizando la expresión 4-4 se puede analizar algunos términos para comprobar su importancia en el sistema. La adimensionalización se va a hacer respecto de la longitud y velocidad características del flujo,  $L$  y  $U$  respectivamente. Se definen las siguientes variables adimensionales:

$$V = \frac{v_p}{U} \quad (4-6)$$

$$u = \frac{v_f}{U} \quad (4-7)$$

$$X = \frac{x}{L} \quad (4-8)$$

$$\tau = \frac{t}{L/U} \quad (4-9)$$

Sustituyendo estas variables en la expresión 4-4 se obtiene:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\beta - 1}{\beta + C_M} \frac{1}{S_t} (V_T + u - V) + \frac{1 + C_M}{\beta + C_M} \frac{DV}{D\tau} \quad (4-10)$$

Donde se ha usado:

$$\beta = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (4-11)$$

$$S_t = \frac{t_p}{t_r} \quad (4-12)$$

$$V_T = \frac{t_p g}{U} \quad (4-13)$$

$$t_p = \frac{\beta - 1}{k_T} \frac{d_p^2}{18\nu} \quad (4-14)$$

$$t_r = \frac{L}{U} \quad (4-15)$$

El término representado en la ecuación 4-12 es el número de Stokes y mide la importancia relativa de la inercia frente a la resistencia aerodinámica a bajos números de Reynolds.

El término representado en la ecuación 4-13 es la velocidad terminal de la partícula.

La constante  $k_T$  se emplea para corregir la desviación de la ley de Stokes para valores finitos del número de Reynolds relativo a la velocidad terminal de la partícula.

De estas relaciones introducidas se puede deducir que, al disminuir el tamaño de la partícula, lo cual supone una reducción de los términos  $S_t$  y  $V_T$ , los términos de inercia y gravitatorio ven reducida su importancia en relación con el término de fricción, por lo que la velocidad de la partícula se va aproximando a la del fluido.

# 5. DESARROLLO NUMÉRICO USANDO TÉCNICAS CFD

Este capítulo corresponde con la simulación del problema usando un software de dinámica de fluidos computacional como es Ansys Fluent.

Puesto que la simulación no es una concreta, se ha realizado, en primer lugar, una calibración sin partículas para, posteriormente, pasar a realizar diversas pruebas cambiando la ubicación de los agitadores.

## 5.1. Introducción

“La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés, *Computational Fluids Dynamics*) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica, etc.” (KESSLER, M., 2016).

La dinámica de fluidos computacional trata de resolver ecuaciones cuyo origen es la mecánica de fluidos haciendo uso de cálculo numérico.

Mediante el uso de CFD se resuelven ecuaciones que de forma analítica no se podrían resolver, sino que es necesario hacer uso de la discretización del dominio. La principal ecuación que se resuelven mediante el uso de CFD es del tipo ecuación de transporte de una variable denominada  $\phi$ . Esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi dA + \int_V S_\phi dV \quad (5-1)$$

Donde los términos representan, por orden:

- Término temporal.
- Término convectivo.
- Término difusivo.
- Término fuente.

Los métodos de discretización más conocidos son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo el último el más empleado y el que usa Ansys Fluent.

El método de volúmenes finitos permite la discretización del volumen de control para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Divide el espacio fluido en una malla de discretización. En torno a cada punto de esta malla se construye un volumen de control de tal forma que el volumen total del fluido es igual a la suma de todos los volúmenes de control.

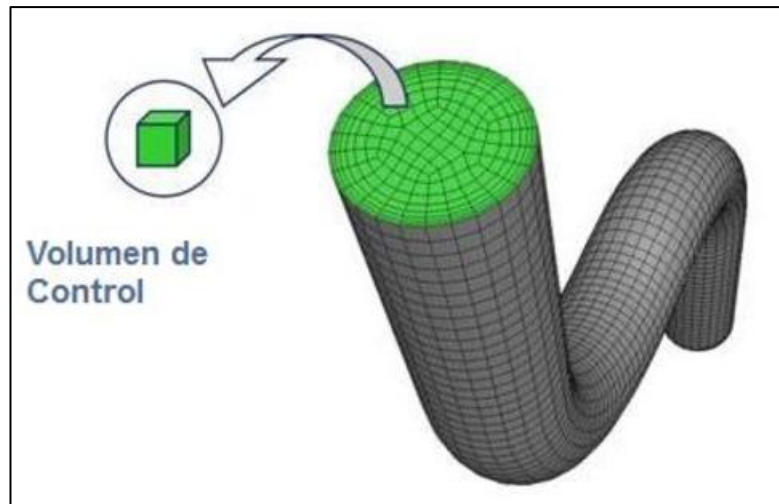


Ilustración 5-1. Volumen total discretizado en volúmenes de control

Fuente: [22]

Las ecuaciones que gobiernan la resolución del flujo media CDF se basan en leyes de conservación:

- Conservación de la masa.
- Conservación de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la energía.

## 5.2. Geometría

La geometría del problema es la descrita en el apartado 2.7. Canal Arenoso, en el que se describe cómo es el canal de estudio.

Se trata de un canal de 1200 metros de longitud con una sección transversal trapezoidal.

Aunque la longitud sea de 1200 metros, el modelado de la geometría de Fluent permite un máximo de 1000 metros, por lo que las simulaciones se han tenido que efectuar para esta longitud.

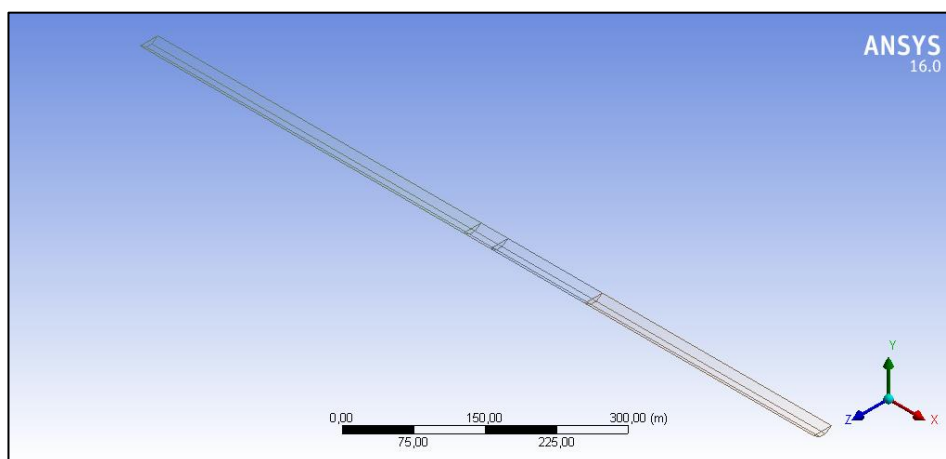


Ilustración 5-2. Geometría del canal

El origen de coordenadas de la geometría se ha tomado en el centro del canal, lo cual significa que ambos extremos se encuentran en las coordenadas -500 metros (confluencia del canal con el Guadalquivir) y +500 metros (ubicación de las cántaras del bombeo).

La longitud del canal se divide en dos tramos, diferenciados por la rugosidad del material de la sección:

- Tramo 1: desde la confluencia con el Guadalquivir hasta 660 metros. Recubrimiento de escollera en la margen derecha.
- Tramo 2: resto del canal. Recubrimiento de escollera en ambas márgenes.

A su vez, en la geometría, el tramo 1 se encuentra dividido en tres zonas, lo cual es debido al mallado con la presencia de agitadores.

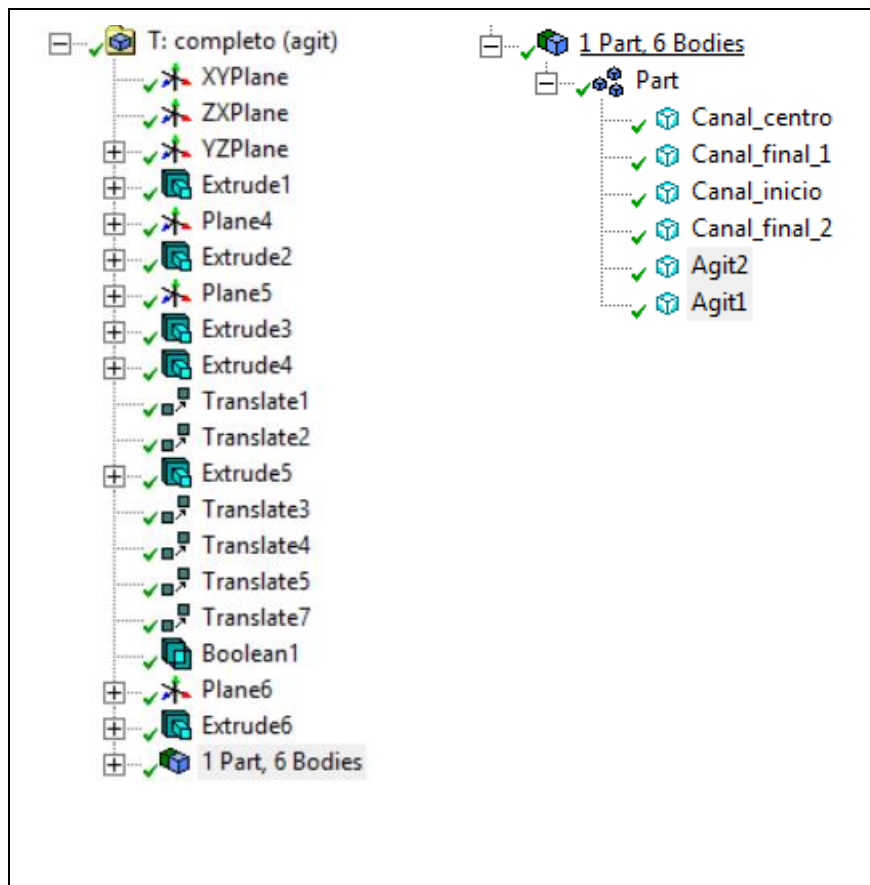


Ilustración 5-3. Elementos que forman la geometría en estudio

Las características de la sección se muestran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Características de la sección del canal

<b>Base menor (m)</b>	8
<b>Calado (m)</b>	6
<b>Talud</b>	3H : 2V
<b>Base mayor (m)</b>	26
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	102
<b>Perímetro mojado (m)</b>	29.63

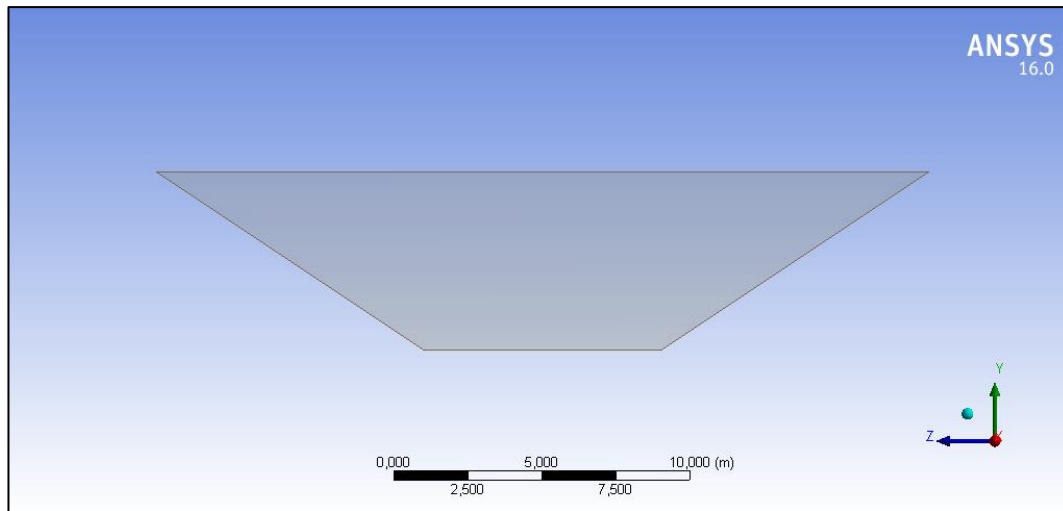


Ilustración 5-4. Sección transversal del canal

La geometría de los agitadores se verá más adelante.

Es importante nombrar cada una de las caras de la geometría sobre las que se van a imponer las condiciones de contorno (Ilustración 5-5, Ilustración 5-6 e Ilustración 5-7).

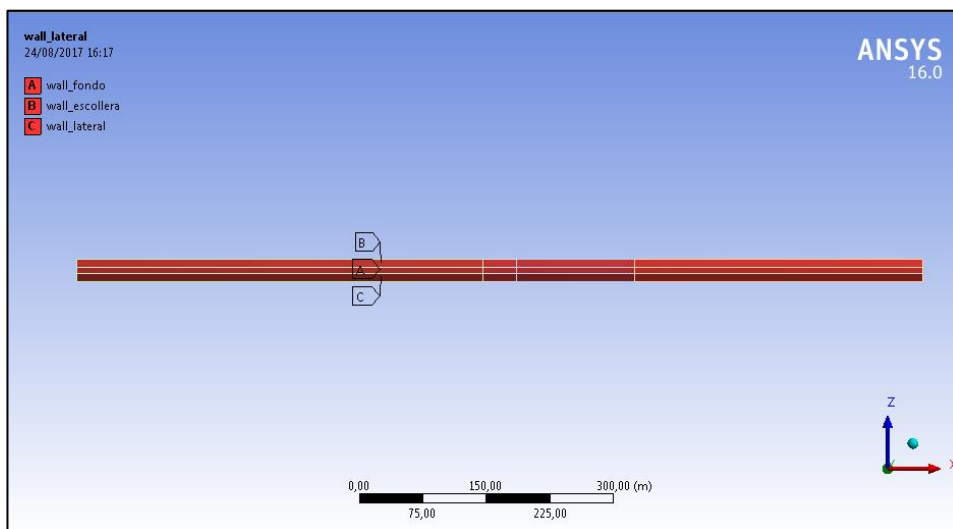


Ilustración 5-5. Nomenclatura de las caras del lecho

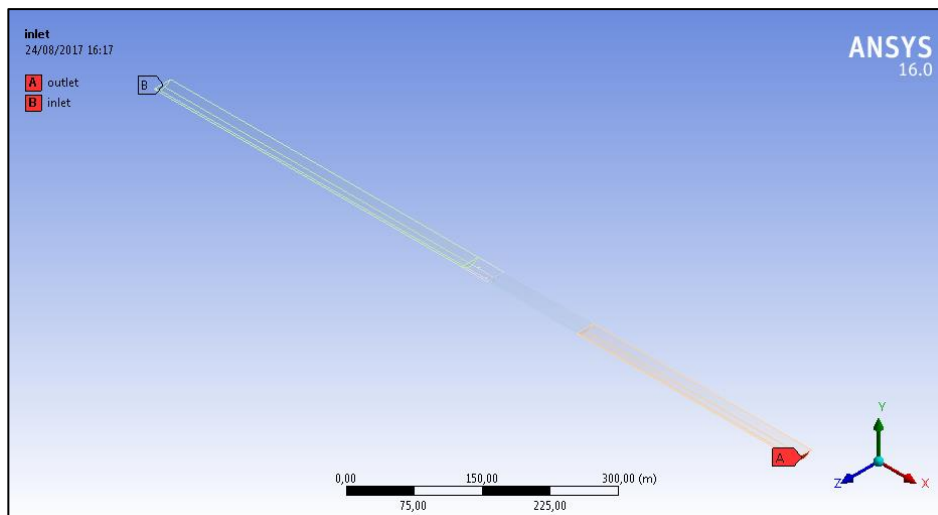


Ilustración 5-6. Nomenclatura de la entrada y la salida

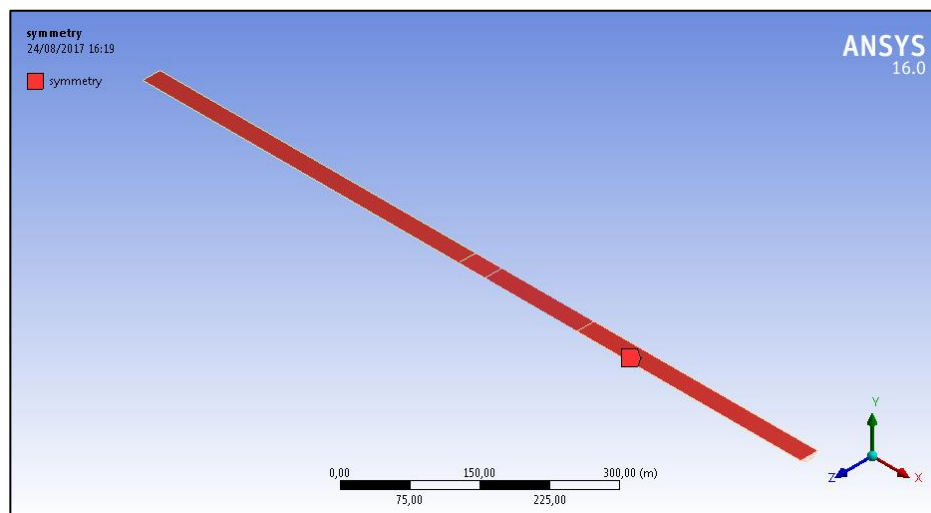


Ilustración 5-7. Nomenclatura de la superficie libre

### 5.3. Mallado

Como ocurre en cualquier simulación numérica, la malla es uno de los apartados más importantes. El valor y la precisión de los resultados obtenidos depende en un alto porcentaje del mallado empleado.

La malla será quien defina la forma de cada uno de los volúmenes de control, anteriormente citados, en los que se divide la geometría total.

Los elementos que discretizan el volumen total pueden ser de distinto tipo y la colocación de unos respecto a otros determinará el tipo de malla.

Para mallas de geometría de dos dimensiones pueden usarse celdas triangulares y cuadriláteras (en inglés, *triangular cells* y *quadrilateral cells*, respectivamente), mientras que para geometrías de tres dimensiones existen mayor tipo celdas: hexaédricas, tetraédricas, piramidales, prismas y poliédricas (en inglés, *hexahedral*, *tetrahedral*, *pyramid*, *wedge* y *polyhedral*, respectivamente).

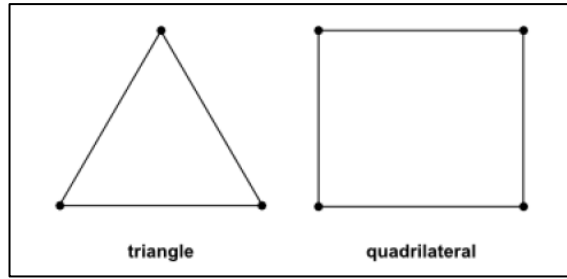


Ilustración 5-8. Tipos de celda en mallas 2D

Fuente: [15]

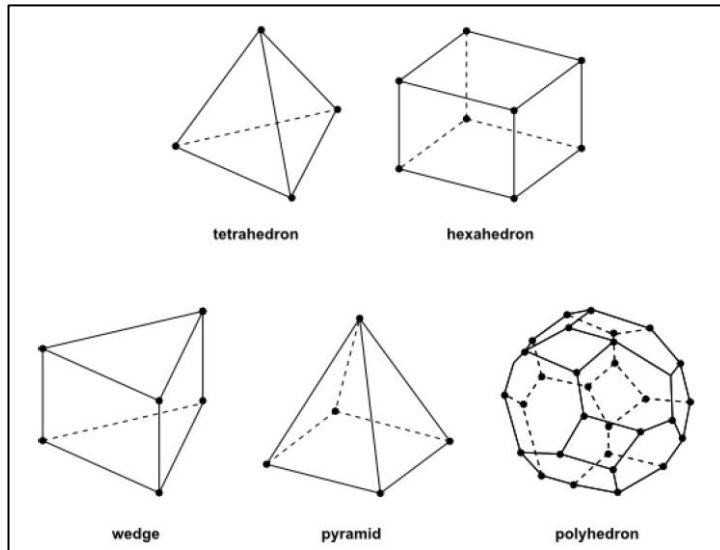


Ilustración 5-9. Tipos de celda en mallas 3D

Fuente: [15]

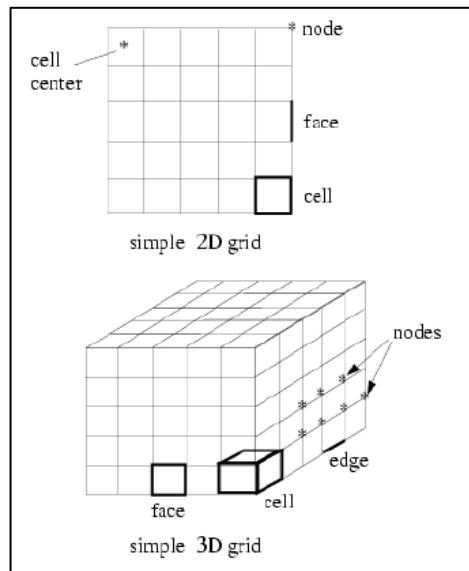


Ilustración 5-10. Componentes de una malla 2D y 3D

Fuente: [15]



Una de las clasificaciones de las mallas es la siguiente:

- Malla estructurada. La conexión entre elementos de la malla es regular. Los elementos que utiliza son cuadriláteros en mallas 2D y hexaedros en mallas 3D. Su empleo se reduce a geometrías sencillas. Entre las ventajas que presenta se encuentra la mayor precisión de los resultados y poder ser diseñada por el usuario. Por otro lado, requiere mayor tiempo de elaboración y está limitada por la geometría.
- Malla no estructurada. La conexión entre elementos de la malla es irregular. Entre las ventajas existentes se encuentra que la generación es automática y más rápida. Mientras que los principales inconvenientes son la peor precisión de resultados y mayor coste computacional, además de un peor control sobre algunas zonas al no ser generada por el usuario.
- Malla híbrida. Mezcla de las dos tipologías de malla anteriormente expuestas. En zonas de geometría sencilla emplea malla estructurada y en la compleja malla no estructurada.

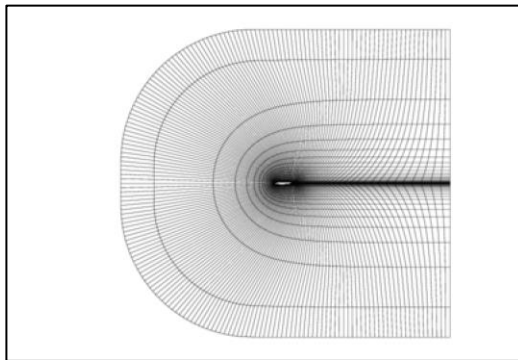


Ilustración 5-11. Malla estructurada cuadrilátera

Fuente: [15]

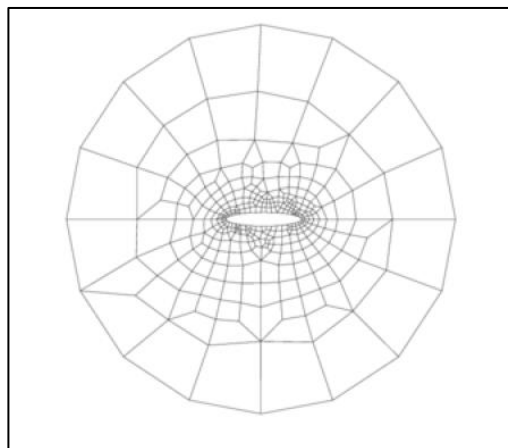


Ilustración 5-12. Malla no estructurada cuadrilátera

Fuente: [15]

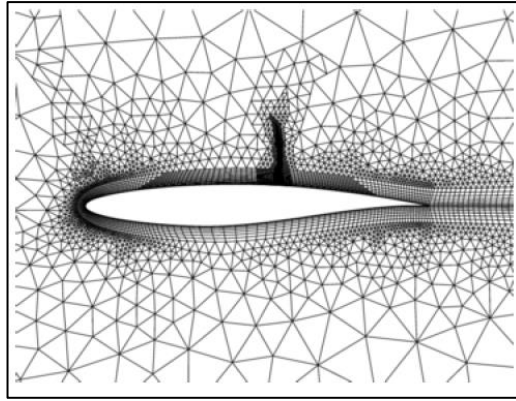


Ilustración 5-13. Malla híbrida

Fuente: [15]

En la elección de un tipo de malla u otro hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Tiempo de resolución. Las mallas estructuradas pueden consumir mucho tiempo de resolución, por tanto, el uso de mallas no estructuradas es consecuencia de este factor. El refinamiento de una malla aumenta este tiempo, lo cual, suele pensarse, que aumenta la precisión, cuando no es así en todos los casos.
- Precisión de la solución. La precisión de la solución es un factor que depende de la calidad de la malla generada. Para generar una mayor precisión es conveniente refinar la malla en zonas donde se produzcan altos gradientes.
- Tasa de convergencia. La calidad de la malla aumenta con una mayor tasa de convergencia. Un aumento en la tasa de convergencia significa que la solución correcta se ha alcanzado más rápido.

Ansys fluent permite medir la calidad de la malla, para lo cual emplea los siguientes indicadores:

- Calidad ortogonal (en inglés, *orthogonal quality*). Se define como el producto normalizado del vector área de una cara  $i$  ( $\vec{A}_i$ ) y el vector desde el centroide de una celda al centroide de la cara anterior ( $\vec{f}_i$ ). También como el producto normalizado del vector área de una cara  $i$  ( $\vec{A}_i$ ) y el vector desde el centroide de una celda al centroide de la celda adyacente con la que comparte una cara ( $\vec{c}_i$ ).

Los valores de la calidad ortogonal oscilan entre 0 y 1. Mientras más cerca se encuentre de la unidad, mayor calidad ortogonal.

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|} \quad (5-2)$$

$$\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \quad (5-3)$$

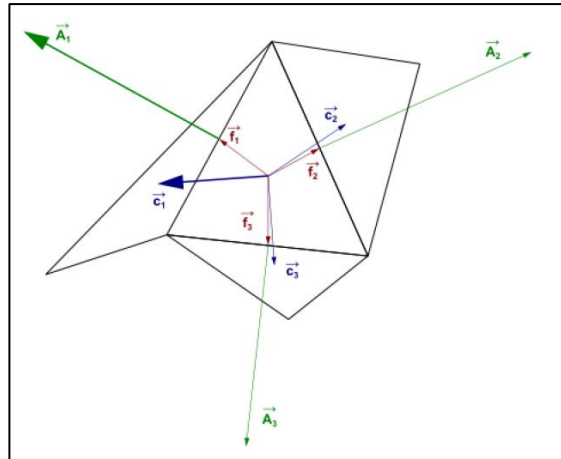


Ilustración 5-14. Representación de los vectores que aparecen en ecuaciones 5-2 y 5-3

Fuente: [15]

- Relación de aspecto (en inglés, *aspect ratio*). Es una medida de lo alargada que es una celda. Se calcula como el ratio entre el máximo y el mínimo valor de las siguientes distancias: distancia normal entre el centroide de la celda y el centroide de las caras, y la distancia entre el centroide de la celda y los nodos.

Para un cubo de lado unidad, la máxima distancia es 0.866, y la mínima 0.5, por lo que la relación de aspecto es de 1.732.

En este caso concreto, un valor alto de este indicador no sería mala opción, puesto que el flujo sigue una trayectoria según su eje longitudinal en la mayor parte del canal.

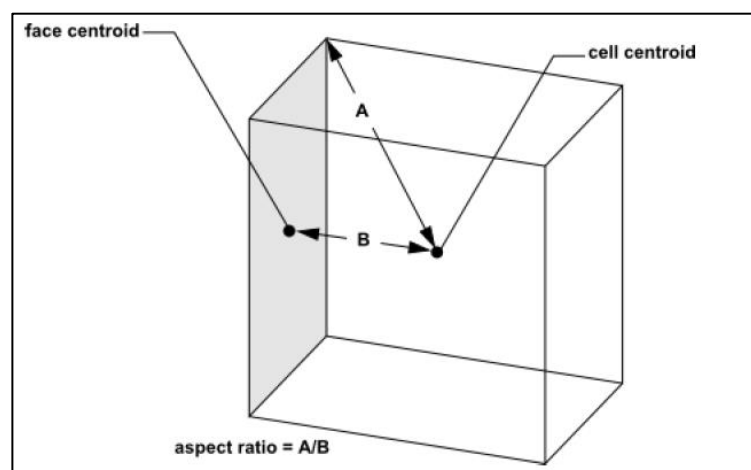


Ilustración 5-15. Forma de calcular la relación de aspect

Fuente: [15]

- Distorsión (en inglés, *skewness*). Diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de igual volumen. Una alta distorsión puede provocar pérdida de precisión y desestabilizar la solución. Un valor por encima de 0.95 provoca problemas de convergencia, por lo que es conveniente estar por debajo de este valor.

Teniendo en cuenta la teoría expuesta, se ha llevado a cabo la elección de la malla.

Lo ideal para el tipo de problema que se presenta podría ser una malla formada por celdas tipo hexagonales, sin embargo, la presencia de los agitadores y el tipo de flujo que genera provoca que la calidad de una malla hexagonal sea baja. Por tanto, la posibilidad del uso de elementos hexagonales pasaría por generar una malla híbrida distinguiendo la zona de mayor agitación de la zona sin agitación.

La malla ideal en caso de no tener agitadores sería una estructurada y formada por elementos hexagonales, como la que se presenta a continuación (Ilustración 5-16). En esta malla el valor de  $y^+$  (parámetro que se presenta en el apartado correspondiente al modelo de turbulencia) se controla manualmente mediante el uso de la herramienta *sizing*. Como adelanto, el valor de este parámetro debe mantenerse dentro de un rango y depende del espesor de los elementos en la zona cercana a las paredes del canal.

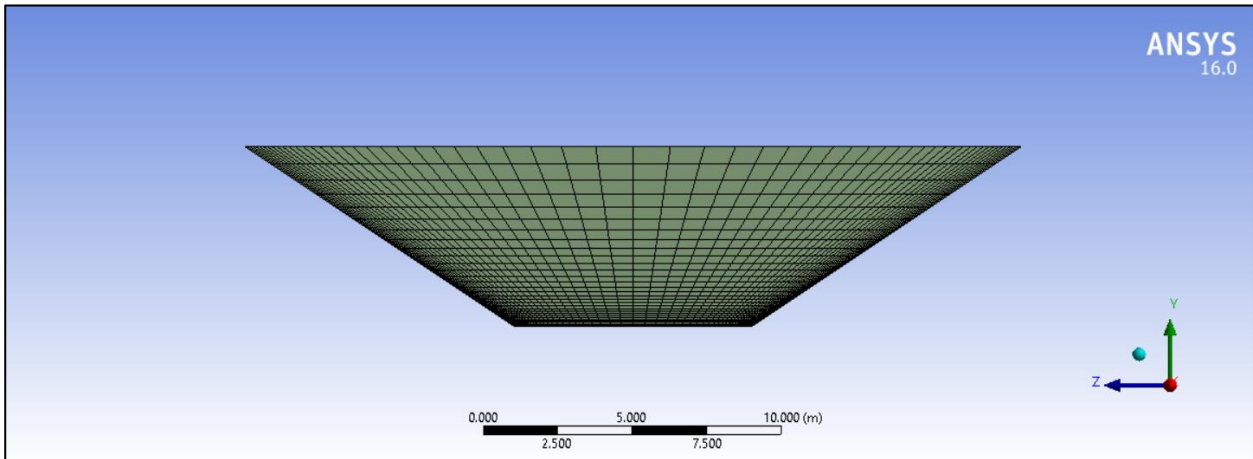


Ilustración 5-16. Malla estructurada

Sin embargo, los resultados que aporta al incluir los agitadores no son de calidad.

El empleo de elementos tetraédricos a lo largo de todo el canal, además de generar un gasto computacional importante, no ofrece buenos resultados al tratarse de un flujo con una trayectoria regular en las zonas alejadas a los agitadores.

Siguiendo estas ideas se genera una malla híbrida formada por elementos tetraédricos en la zona de los agitadores y elementos hexagonales en el resto del canal. Además, es una malla conforme, es decir, los nodos de las celdas se unen entre sí en los límites de las distintas zonas de la malla.

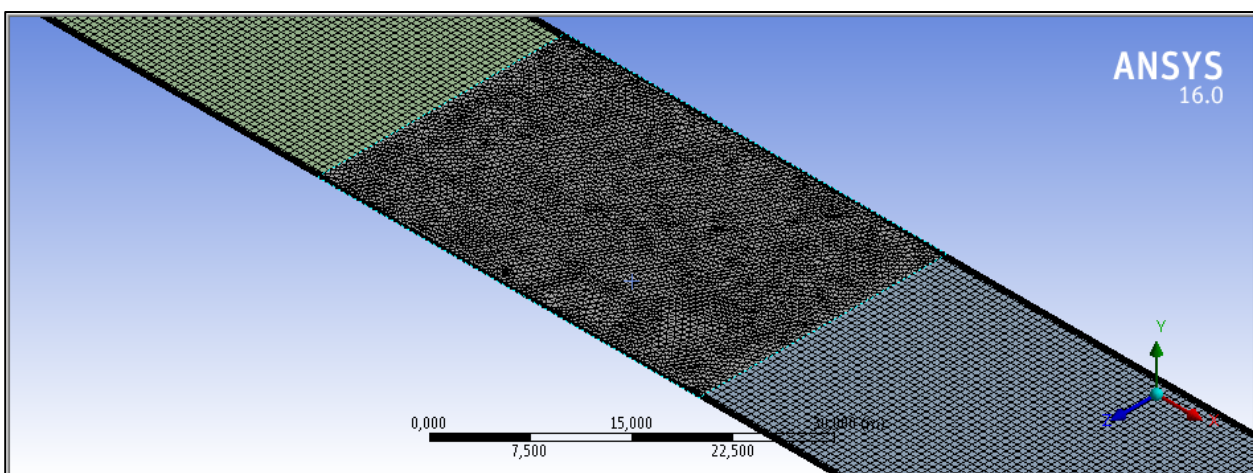


Ilustración 5-17. Malla híbrida generada

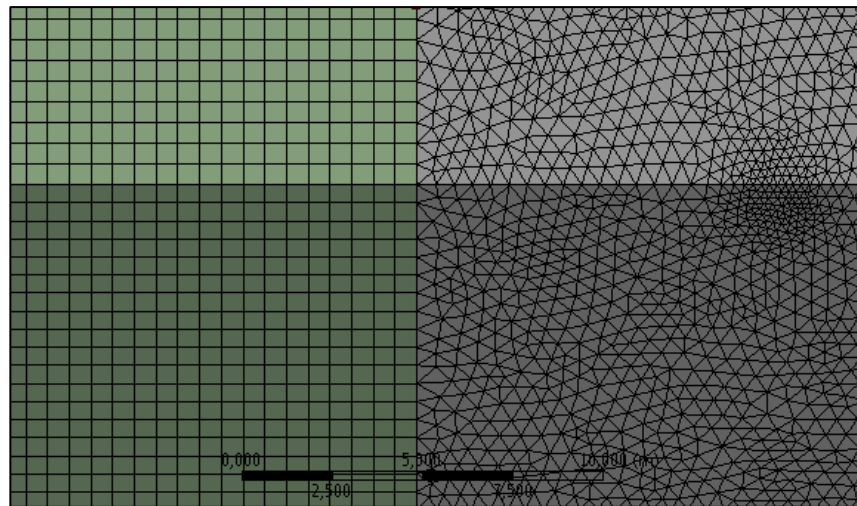


Ilustración 5-18. Malla conforme

La elección del tamaño de los elementos se ha hecho refinando la malla hasta que los resultados obtenidos sean similares usando una malla y otra.

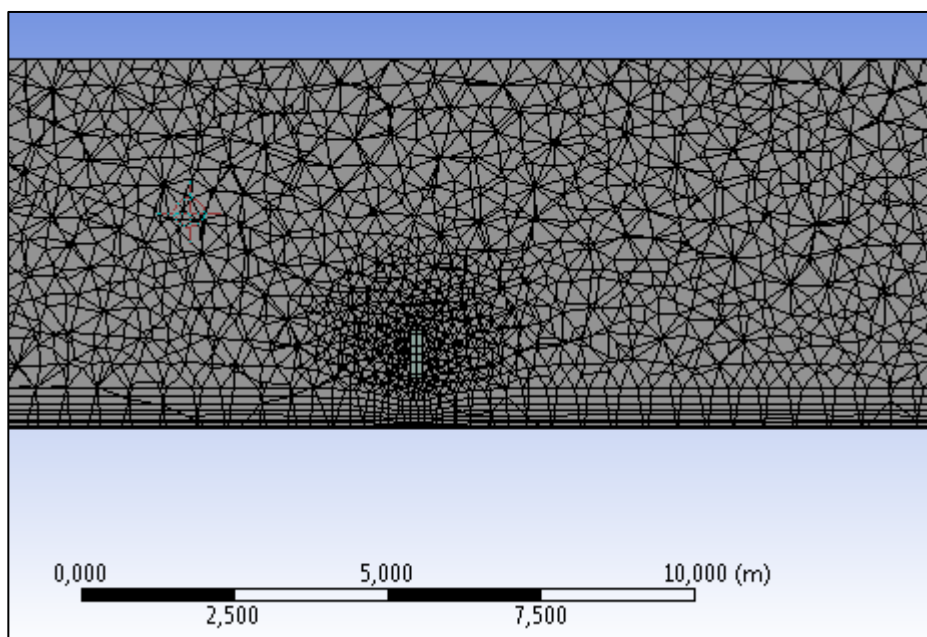


Ilustración 5-19. Malla en la zona de los agitadores

Como se muestra en la Ilustración 5-18 y en la Ilustración 5-19, el refinamiento de la malla es mayor en la zona que rodea a los agitadores. Esto se ha conseguido generando una esfera de influencia alrededor de estos elementos en la que el tamaño de la malla se ha bajado respecto al resto del canal.

El control del parámetro  $y^+$  se consigue haciendo uso de la herramienta *inflation*, la cual permite generar varias capas de celdas con el valor deseado.

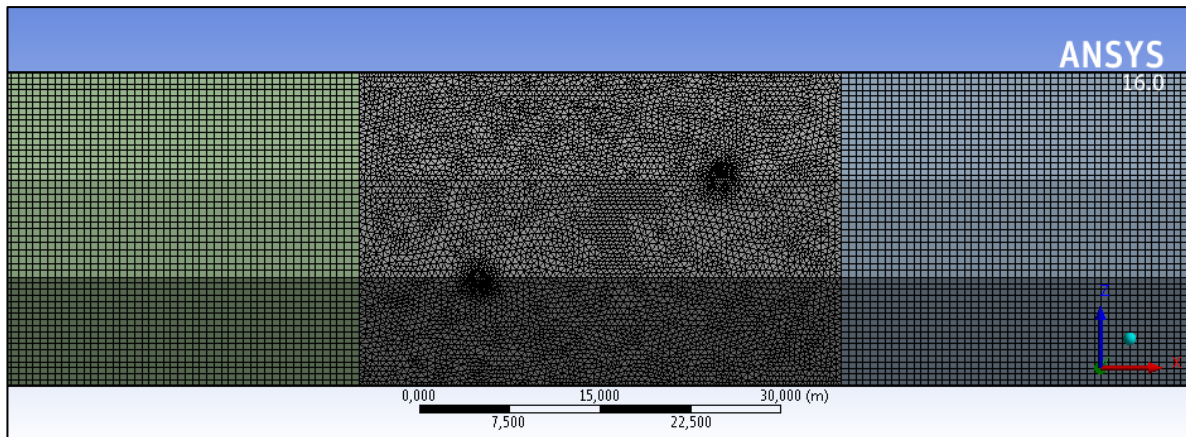


Ilustración 5-20. Malla en la zona central del canal

## 5.4. Materiales

Otro de los apartados a definir en la configuración del modelo de Ansys Fluent son los materiales. Las dos fases a considerar son el agua y las partículas sólidas.

Las características de los materiales son:

- Fase líquida: agua

Tabla 5-2. Propiedades de la fase líquida

$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\mu_w$ (kg/(ms))	0.001
$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	1.003e-6

- Fase sólida: partículas

Tabla 5-3. Propiedades de la fase sólida

Tipo de partícula	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{50}$ (mm)
Tipo 1	1500	0.01
Tipo 2	1900	0.05

## 5.5. Modelos

Se detallan a continuación los distintos modelos empleados para la resolución del problema.

Previamente a la definición de los modelos, es necesario comentar que el problema a resolver se va a considerar estacionario, ya que se pretende obtener la posición final de las partículas, para así comprobar dónde se depositan según el efecto de los agitadores. El objetivo es obtener los puntos en los que se encuentran las partículas para impedir que avancen en el canal.

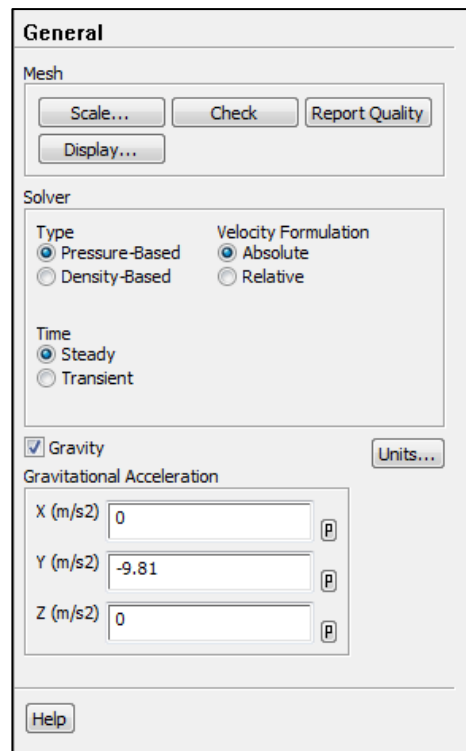


Ilustración 5-21. Definición de la gravedad y tipo de análisis

También hay que indicar la gravedad, que en este caso se define según el eje y.

### 5.5.1. Turbulencia

La turbulencia es un fenómeno que se da en la mayoría de flujos de la naturaleza e industriales. Se observa en flujos con un número de Reynolds alto y consiste en un movimiento del flujo irregular y aleatorio en tres dimensiones, del que no es posible obtener una solución analítica. La aparición de la Mecánica de Fluidos Computacional ha permitido calcular la turbulencia mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Algunos de los modelos existentes para resolver la turbulencia son los siguientes:

- *Direct Numerical Simulation (DNS)*. Tiene como fundamento la resolución de todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin aproximaciones. El coste computacional es muy alto y su empleo se reduce a geometrías sencillas donde el número de Reynolds no es tan alto.
- *Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)*. Es el modelo más utilizado y el más económico desde el punto de vista de coste computacional. Es apropiado para la mayoría de los problemas de ingeniería ya que ofrece un nivel de precisión adecuado. Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes usando aproximaciones.
- *Scale-Resolving Simulation (SRS)*. Es un modelo intermedio de los dos anteriores. En este caso se resuelve la turbulencia para al menos una parte del dominio del fluido.

Además de estos modelos existen otros tantos que toman características de los presentados, conocidos como híbridos.

Es importante la elección de un buen modelo de turbulencia, para lo que hay que considerar aspectos como la física del flujo, el nivel de precisión requerido, los recursos computacionales disponibles y el tiempo disponible para el cálculo.

#### Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)

Teniendo en cuenta lo anterior, es el modelo que se va a emplear en este caso, puesto que se adapta a las exigencias y recursos computacionales.

En este modelo las variables de las ecuaciones de Navier-Stokes son descompuestas en una componente media

y otra de fluctuación debido a la turbulencia.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (5-4)$$

Donde:

- $\bar{\phi}$ : componente media
- $\phi'$ : componente de fluctuación

Sustituyendo expresiones de esta forma (ecuación 5-4) en las ecuaciones de continuidad y de conservación de la cantidad de movimiento de Navier-Stokes, se obtienen las ecuaciones RANS:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5-5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (5-6)$$

Donde el término  $-\overline{\rho u'_i u'_j}$  se conoce como tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds y se representa mediante  $R_{ij}$ .

Dentro del modelo de ecuaciones promediadas de Reynolds hay varios submodelos según la forma de modelar  $R_{ij}$ .

- Spalart-Allmaras
- k- $\epsilon$
- k- $\omega$
- RSM
- Transición laminar-turbulencia

La lista anterior se presenta en orden ascendente de coste computacional. A medida que disminuye el coste computacional, disminuye también la precisión de la solución que ofrecen. Existen algunos submodelos más que no aparecen reflejados.

Los más comunes de usar son el modelo k- $\epsilon$  y el modelo k- $\omega$ . Estos modelos resuelven el problema de la turbulencia usando dos ecuaciones adicionales e introducen un término llamado viscosidad turbulenta para resolver el tensor de esfuerzos turbulentos de Reynolds.

La robustez, economía y razonable precisión del modelo k- $\epsilon$  lo hacen apropiado para resolver una gran cantidad de problemas. Dentro del submodelo k- $\epsilon$  se distingue entre *Realizable*, *Standard* y *RNG*. En Ansys Fluent es recomendable el empleo del modelo k- $\epsilon$  *Realizable*.

Este modelo k- $\epsilon$  *Realizable* presenta las siguientes ecuaciones para k y  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (5-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (5-8)$$

Donde:

- $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right]$



- $\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$
  - $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$
  - $G_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de la velocidad media
- $$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$
- $G_b$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad

En este modelo la viscosidad turbulenta se modela de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5-9)$$

La diferencia de este modelo con otros modelos k- $\varepsilon$  está en el valor de  $C_\mu$ , el cual, en este caso, no presenta un valor constante. Por ejemplo, para k- $\varepsilon$  estándar tiene un valor de 0.09.

El modelo emplea las siguientes constantes:

- $C_{1\varepsilon} = 1.44$
- $C_2 = 1.9$
- $\sigma_k = 1$
- $\sigma_\varepsilon = 1.2$

### 5.5.1.1. Tratamiento cercano a las paredes (*Near-Wall Treatment*)

Junto al modelo de turbulencia hay que elegir un modelo de resolución en las zonas cercanas a la pared. La presencia de una condición de contorno tipo pared afecta al comportamiento del flujo por ser una zona con cambio brusco de la velocidad.

La zona próxima a las paredes puede dividirse en dos capas, una interior y otra exterior. A su vez, la interior se divide en tres subcapas: subcapa viscosa (*viscous sublayer*) en la que predominan los esfuerzos viscosos; subcapa de transición (*buffer layer*) donde la viscosidad y la turbulencia son importantes; subcapa turbulenta (*turbulent region*), donde la turbulencia tiene mayor importancia.

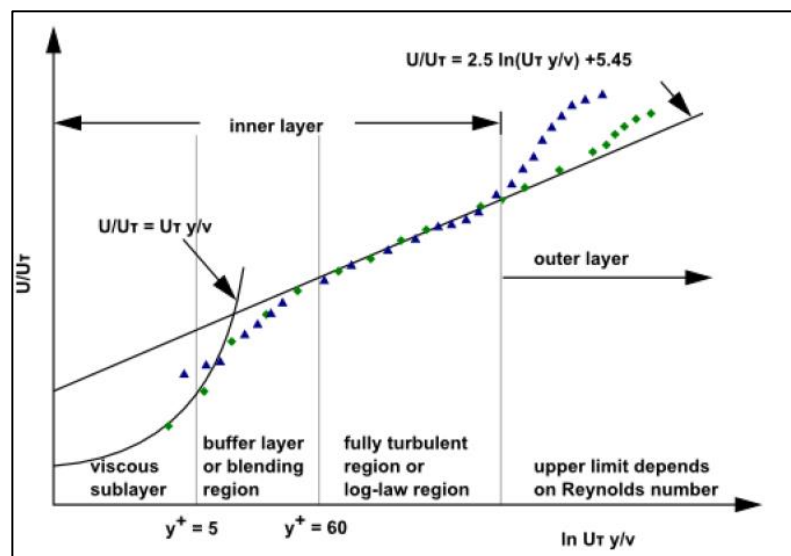


Ilustración 5-22. Subdivisiones zona cercana a la pared

Fuente: [14]

Existen dos enfoques para resolver la zona próxima a la pared. Por un lado, se encuentra la posibilidad de emplear un modelo de pared. Esta forma emplea relaciones semiempíricas para resolver la subcapa viscosa y de transición. Por otro lado, existe la posibilidad de emplear otro tipo de modelado el cual modifica el modelo de turbulencia empleado para resolver la zona entre la pared y la subcapa turbulenta. Esta forma de resolución se hace necesaria cuando la zona afectada por este fenómeno es la zona en la que se centra el estudio. Por este motivo, en este caso se va a emplear un modelo de pared, ya que la importancia de este estudio no reside esencialmente en el comportamiento del flujo en la zona próxima a las paredes, sino en todo el canal.

Como se ve en la Ilustración 5-22, la región en la que nos encontramos depende del valor de  $y^+$ , el cual se define como:

$$y^+ = \frac{u_\infty \Delta y_1}{\nu} \quad (5-10)$$

El valor de  $y^+$  se puede controlar mediante el parámetro  $\Delta y_1$ , el cual se refiere a la distancia de la pared a la primera celda del mallado.

El objetivo será mantener el valor de  $y^+$  en el rango de 30 a 300.

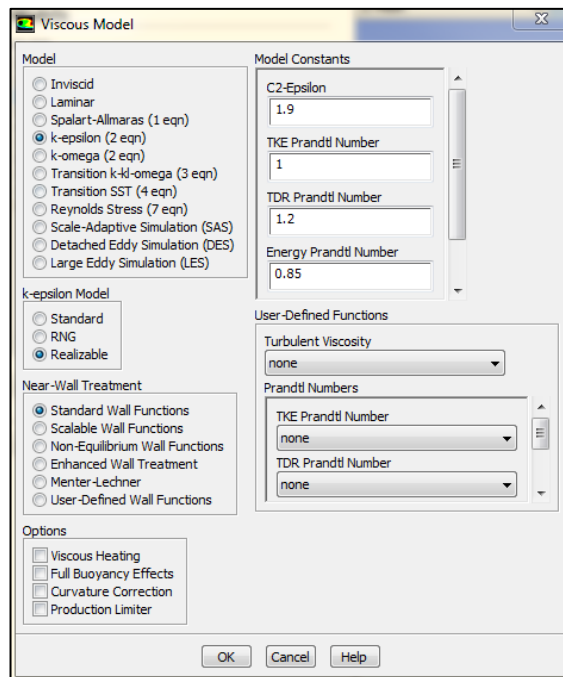


Ilustración 5-23. Elección del modelo de turbulencia

### 5.5.2. Flujo multifásico

Se entiende por flujo multifásico aquél que involucre a más de una fase. En este caso, se tienen dos fases: una fase líquida y una fase sólida. Existen distintos modelos para simular un flujo multifásico.

Los avances en la mecánica de fluidos computacional han proporcionado la base para una mayor comprensión de la dinámica de flujos multifase. Existen actualmente dos enfoques para el cálculo numérico de flujos multifase: el enfoque Euler-Lagrange y el enfoque Euler-Euler.

En el enfoque Euler-Lagrange, conocido como modelo discreto o lagrangiano (en inglés, *Discrete Phase Model*), la fase fluida (el flujo de agua en este caso) es tratada como una fase continua y se resuelve con las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa (partículas en este caso) se calcula a partir del

campo fluido. La fase dispersa puede intercambiar masa, cantidad de movimiento y energía con la fase fluida. El empleo de este modelo va a permitir hacer un seguimiento de la trayectoria de las partículas en la zona de los agitadores, de tal forma que se controle si la recirculación generada por estos es la esperada o no lo es.

En el enfoque Euler-Euler, se considera que el volumen de una fase no puede ser ocupado por otras fases, introduciendo el concepto de fracción volumétrica. Cada una de las fracciones se suponen funciones continuas en el tiempo y en el espacio y su suma es igual a la unidad. Las ecuaciones de conservación para cada fase se derivan para obtener un conjunto de ecuaciones de estructura similar para cada una de las fases. Estas ecuaciones se completan con relaciones empíricas o, en el caso de flujos granulares, aplicando teoría cinética.

Además de estos dos enfoques, existe la posibilidad de implementar un modelo de transporte de sedimento haciendo uso de una UDS, el cual se va a definir a continuación. El empleo de este modelo va a permitir controlar las zonas en las que se aumenta la concentración debido al efecto de los agitadores.

### 5.5.2.1. Implementación mediante UDS

El transporte de sedimento se puede modelar añadiendo a las ecuaciones del flujo principal (continuidad y cantidad de movimiento) una ecuación para un escalar.

Si se define la concentración (kg sedimento / kg agua) como el escalar mencionado, la ecuación a implementar podría ser la ecuación de transporte genérica por convección-difusión para el escalar  $c$ , ecuación del tipo 5-1.

$$\frac{\partial[\rho_w c]}{\partial t} + \frac{\partial[\rho_w u_i c]}{\partial x_i} - \frac{\partial[J_{c_i}]}{\partial x_i} = S_c \quad (5-11)$$

Los términos representan, respectivamente: variación local de la concentración; flujo convectivo neto de la concentración; flujo difusivo de la concentración; generación volumétrica.

Las unidades del escalar a definir son:

$$c \left( \frac{kg \text{ sedimento}}{kg \text{ agua}} \right)$$

El flujo difusivo se define como:

$$J_{c_i} = \Gamma_c \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (5-12)$$

Donde:

- $\Gamma_c$ : difusividad de la magnitud transportada

Al tratar un flujo con sedimento hay que tener en cuenta los siguientes puntos para implementar el modelo:

- Las partículas poseen movimiento propio, por lo que es necesario añadir la velocidad de sedimentación. Si se define la gravedad respecto al eje  $y$ , el término convectivo queda:

$$\frac{\partial[\rho_w u_x c]}{\partial x} + \frac{\partial[\rho_w (u_y - w_y) c]}{\partial y} + \frac{\partial[\rho_w u_z c]}{\partial z} \quad (5-13)$$

Donde  $w_y$  es la velocidad de sedimentación, la cual depende del tamaño de grano adimensional  $D^*$ , la densidad y viscosidad cinemática del agua.

$$w_j = \frac{10\mu_w}{d_{50}\rho_w} \left[ (1 + 0.01D^{*3})^{1/2} - 1 \right] \quad (5-14)$$

$$D^* = d_{50} \left[ \frac{g}{v^2} \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \right]^{1/3} \quad (5-15)$$

Como la densidad del agua y la velocidad de sedimentación se consideran constantes, el término convectivo se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{\partial[\rho_w u_x c]}{\partial x} + \frac{\partial[\rho_w u_y c]}{\partial y} + \frac{\partial[\rho_w u_z c]}{\partial z} - \rho_w w_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5-16)$$

Así es más sencillo de implementar en el modelo UDF, puesto que queda la ecuación sin sedimento por un lado y el término fuente convectivo ( $S_c$ ) por otro.

$$S_c = \rho_w w_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5-17)$$

- El movimiento es, generalmente, turbulento. Esto tiene efecto sobre la difusividad, que será la correspondiente al transporte difusivo turbulento en lugar del molecular.

$$J_{c_i} = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (5-18)$$

Desarrollado queda:

$$\frac{\partial J_{c_i}}{\partial x_i} = \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (5-19)$$

En esta expresión aparece el término de viscosidad turbulenta, del que se ha hablado en el apartado de modelado de la turbulencia. Este parámetro depende del modelo de turbulencia elegido. Para la UDF se va a emplear el modelo k-ε estándar, puesto que tiene un coste computacional menor. Para este modelo, la viscosidad turbulenta se define como:

$$\frac{\mu_t}{\rho} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5-20)$$

Donde  $C_\mu$  (constante de calibración del modelo de turbulencia empleado) vale 0.09 y el valor de  $\sigma_t$  (número de Prandtl) se tomará igual a 1.

Una vez expuestas las particularidades para el problema de transporte de sedimento, la ecuación a resolver junto a las del flujo principal queda:

$$\frac{\partial[\rho_w c]}{\partial t} + \frac{\partial[\rho_w u_x c]}{\partial x} + \frac{\partial[\rho_w u_y c]}{\partial y} + \frac{\partial[\rho_w u_z c]}{\partial z} - \frac{\mu_t}{\sigma_t} \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] = \rho_w w_y \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5-21)$$

Para que el programa de cálculo tenga en cuenta la presencia de partículas, es necesario acoplar el modelo de transporte de sedimento con la resolución general del flujo. Para ello, hay que tener en cuenta el efecto del sedimento sobre las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y variables turbulentas. Este efecto se va a introducir haciendo uso de términos fuente (en inglés, *source terms*), los cuales se introducen en el apartado de condiciones de las celdas (en inglés, *cell zone conditions*). Los términos fuente a introducir son:

- Ecuación de cantidad de movimiento. La velocidad de sedimentación de las partículas genera una fuente de cantidad de movimiento en la ecuación que se corresponde con la componente de la velocidad alineada con la gravedad. En este caso la gravedad actúa según el eje OY, por lo que el término queda:

$$S_{u_y} = (\rho_s - \rho_w) g c \quad (5-22)$$

- Ecuación de energía cinética turbulenta. Al emplear el modelo de turbulencia k-ε, hay que considerar la generación de turbulencia del movimiento de sedimentación en la ecuación de la energía cinética. El término queda:

$$S_k = -\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5-23)$$

- Ecuación para la tasa de disipación. Al igual que hay que introducir un término por el efecto de la sedimentación en la ecuación de energía cinética turbulenta, hay que considerar el mismo efecto sobre la tasa de disipación.

$$S_\varepsilon = -C_{3\varepsilon} \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} g \frac{\partial c}{\partial y} \quad (5-24)$$

Donde:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left\{ \sqrt{\frac{v_y^2}{(v_x^2 + v_z^2)}} \right\}$$

La constante  $C_{3\varepsilon}$  tiene en cuenta la verticalidad del vector velocidad en cada punto del dominio. En movimientos verticales (eje OY), el efecto de la sedimentación sobre la ecuación de la tasa de disipación es máxima, mientras que en movimientos horizontales no tiene ningún efecto.

Sobre la ecuación de continuidad no es necesario actuar.

Además del efecto del sedimento sobre la ecuación de transporte, es necesario definir unas condiciones de contorno. Se consideran dos tipos de condiciones de contorno sobre la concentración o escalar definido:

- Valor impuesto. Se conoce el valor exacto o la distribución de valores de la concentración.

$$c_{x,y,z \in superficie} = c(t, x, y, z) \quad (5-25)$$

Esta es la condición a imponer sobre la superficie de entrada y el lecho del canal.

- Flujo impuesto. Se impone la derivada de la concentración sobre la superficie.

$$\left. \frac{\partial c}{\partial \vec{n}} \right|_{x,y,z \in superficie} = q_c(t, x, y, z) \quad (5-26)$$

Esta es la condición a imponer sobre las superficies no confinadas establecidas como condiciones de simetría y en la superficie de salida, de tal forma que se indique que la descarga de sedimento se

produce de forma libre, por lo que el valor de  $q_c$  se tomará igual a cero en la salida y en la superficie libre.

Al estar tratando un problema estacionario, no es necesario establecer condición inicial de la concentración de sedimento.

Descritos los fundamentos del modelo, se pasa a comentar las herramientas que Ansys Fluent ofrece para la implementación del modelo:

- UDS (en inglés, *User Defined Scalars*). Ecuaciones de transporte genéricas, como la definida en la ecuación 5-11. Permite introducir la ecuación necesaria para resolver un escalar, que en este caso es la concentración ( $c$ ).
- UDF (en inglés, *User Defined Functions*). Funciones que el usuario define escritas en lenguaje de programación C. Ansys Fluent cuenta con una biblioteca de funciones integrada en la que algunas funciones ya están escritas, y son conocidas como MACROS. Estas funciones pueden emplearse para definir los términos fuente, condiciones de contorno que no sean constantes, propiedades de los materiales que no sean constantes, etc.
- UDM (en inglés, *User Defined Memories*). Posiciones de memoria en las que el usuario puede almacenar variables para acceder a ellas posteriormente. Su uso es interesante para emplear variables que ya han sido calculadas en una MACRO para usarlas en otra.

El uso de estas herramientas en Fluent se hace a través de la herramienta *Define* → *User-Defined*.

Las MACROS usadas son las siguientes:

- DEFINE\_SOURCE: para los términos fuente anteriormente desarrollados.
- DEFINE\_PROFILE: para la condición de contorno en el lecho.
- DEFINE\_DIFFUSIVITY: para la difusividad.
- DEFINE\_PROPERTY: para la viscosidad del agua, la cual varía en función de la concentración.
- DEFINE\_ADJUST: para el cálculo de la tensión en el lecho.

La UDF escrita se encuentra en el anexo 2 de la presente memoria.

Para introducir la UDF en Ansys Fluent se realiza una interpretación del código.

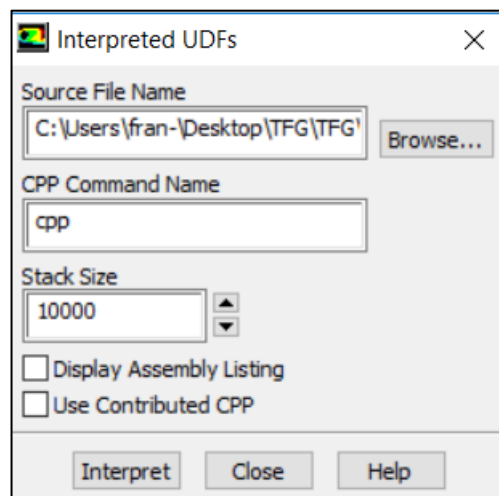


Ilustración 5-24. Interpretación del código de la UDF en Ansys Fluent

Una vez interpretado el código, puede operarse con las opciones implementadas en él.

El siguiente paso a la interpretación del código es activar la UDS para añadir la ecuación de transporte del escalar  $c$  en la simulación.

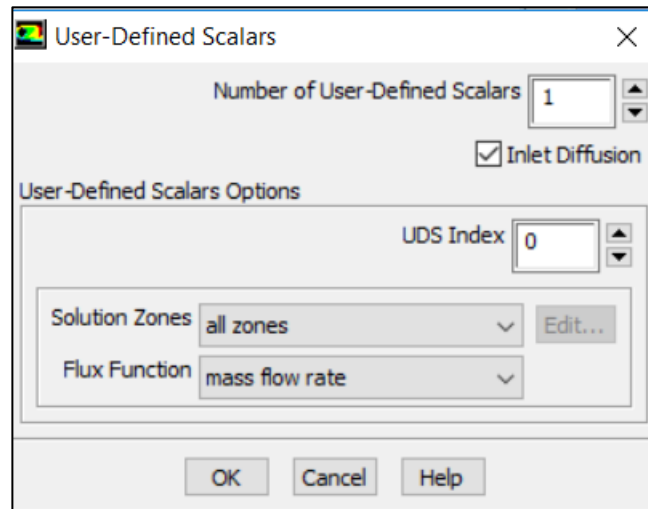


Ilustración 5-25. Activación UDS

Al usar la MACRO DEFINE\_ADJUST para el cálculo de la tensión en el lecho es necesario activar estas funciones.

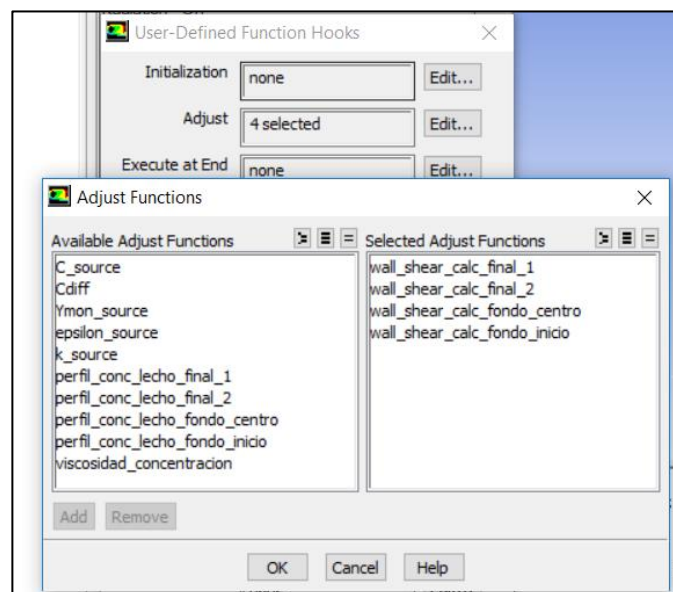


Ilustración 5-26. Activación MACRO para cálculo de tensión en el lecho

Por último, en el apartado correspondiente a *Define* solamente quedaría por activar las posiciones memoria que se van a utilizar, que en este caso son 17. Estas posiciones de memoria almacenan los siguientes datos:

- Términos fuente (de la posición 1 a la 4).
- Viscosidad en función de la concentración (posición 5).
- Tensión en el fondo, parámetro de Shields y número de Reynolds granular en cada una de las partes en las que se divide el lecho: inicio, centro, final 1 y final 2 (de la posición 6 a la 17).

Como se ha dicho anteriormente, en el modelo se va a tener en cuenta el efecto que la concentración de sólidos

produce sobre la viscosidad del fluido. Solamente se va a considerar en el modelo mediante UDF.

Se han estudiado distintos modelos, habiendo elegido el mismo que iniciaba esta línea de investigación, el cual está pensado para sólidos en los clarificadores secundarios.

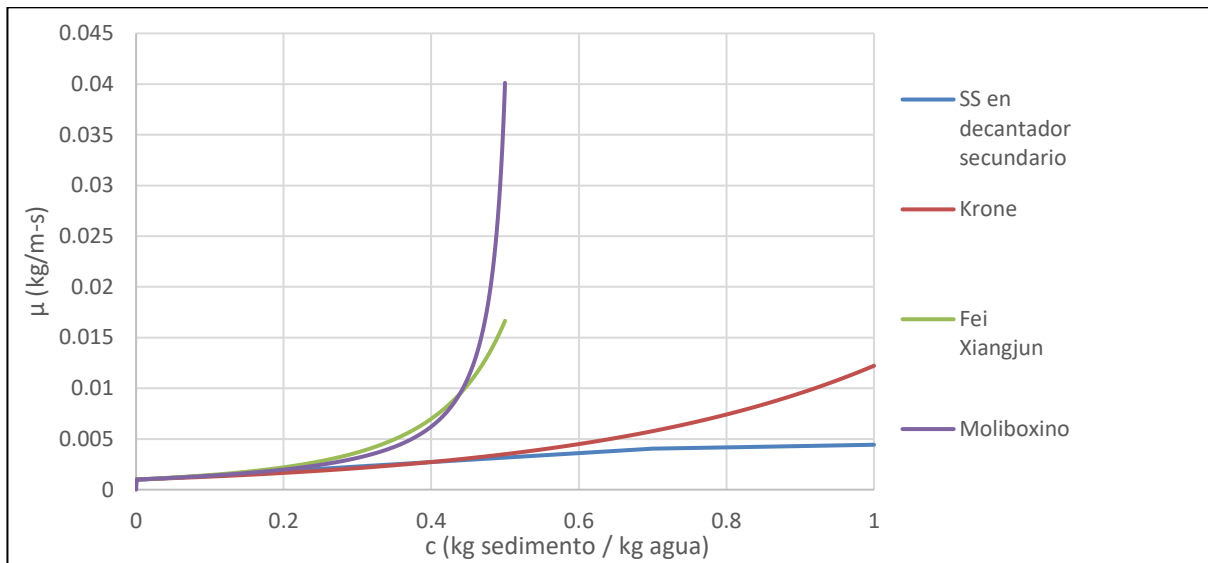


Ilustración 5-27. Modelos reológicos de viscosidad

Para las concentraciones que se están tratando cualquiera de los modelos anteriores sería útil, puesto que la mayoría de ellos coincide hasta una concentración superior a 0.2.

Estos modelos se encuentran reflejados en [19].

Por seguir los pasos del estudio anterior, se ha elegido el modelo correspondiente a sólidos en suspensión en un decantador secundario, el cual se define de la siguiente forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = 0.001 \quad \text{si } c < 0.01 \\ \mu = 0.00404527222 + 0.00304527222 \frac{c - 0.7}{0.69} \quad \text{si } 0.01 < c < 0.7 \\ \mu = 0.00327e(0.132c) \quad \text{si } c > 0.7 \end{array} \right. \quad (5-27)$$



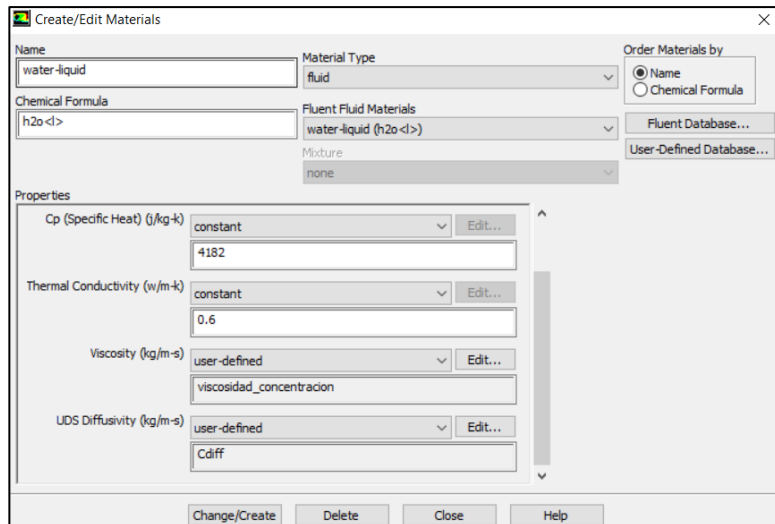


Ilustración 5-28. Propiedades del agua

La introducción de los términos fuente se hace en todos los elementos definidos, en el apartado correspondiente a términos fuente en *cell zone conditions*.

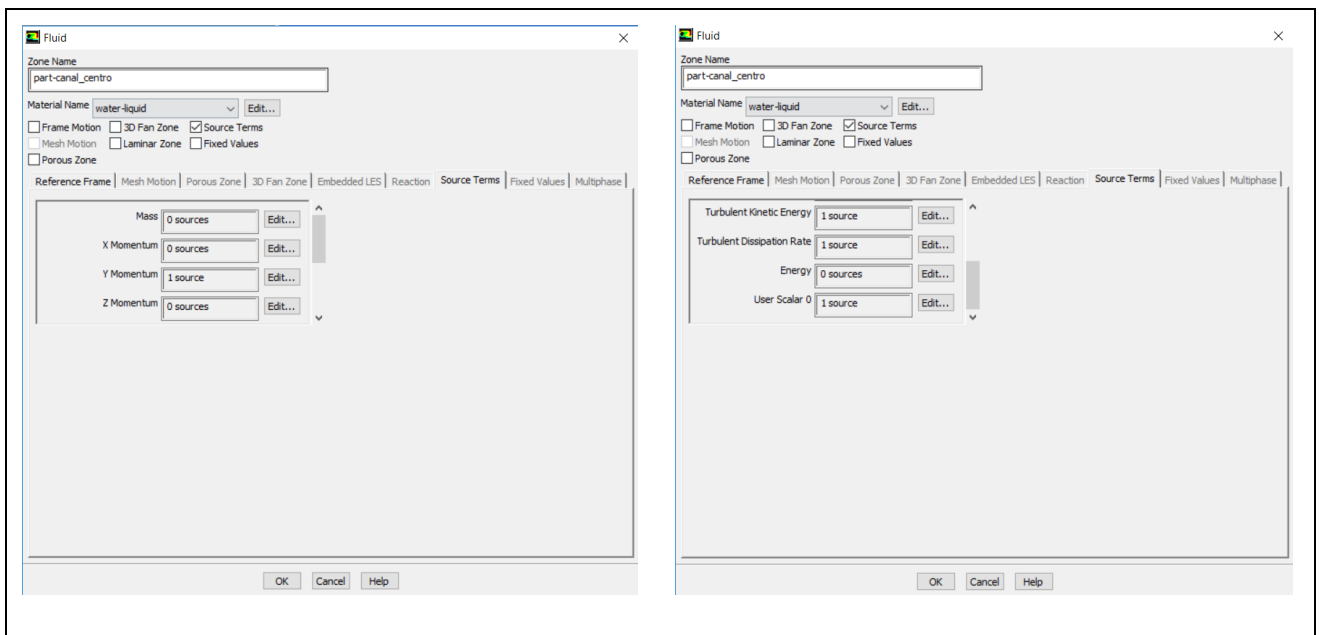


Ilustración 5-29. Términos fuente

Para finalizar la descripción de este modelo faltan las condiciones de contorno establecidas para el escalár.

- Entrada. Se establece un valor fijo de la concentración. Por el motivo que se verá más adelante, se va a considerar un único tipo de partícula, por lo que se define una concentración en la entrada de 0.001 kg sedimento / kg agua.

$$c_{entrada} = \frac{10 \left( \frac{kg \text{ sedimento}}{s} \right)}{10000 \left( \frac{kg \text{ agua}}{s} \right)} = 0.001 \left( \frac{kg \text{ sedimento}}{kg \text{ agua}} \right) \tag{5-28}$$

- Salida. Condición de contorno de tipo flujo impuesto igual a 0.

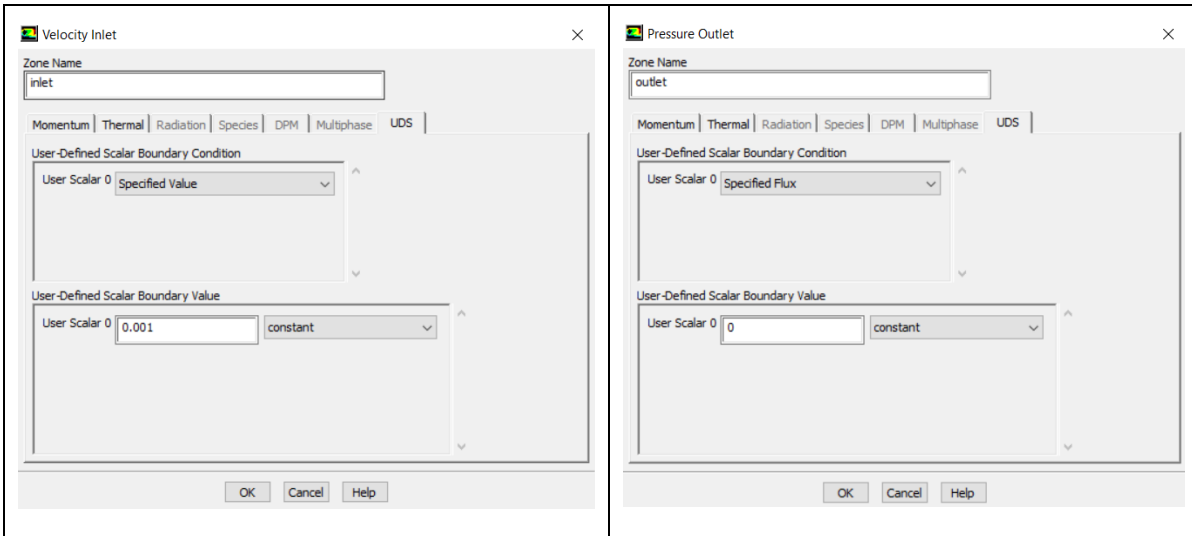


Ilustración 5-30. Condiciones de contorno entrada y salida

- Lecho. Sobre el lecho se va a considerar la posibilidad de resuspensión de partículas. Para ello, hay que considerar el parámetro de Shields ( $\bar{\tau}$ ), calculado mediante la UDF y cuya definición aparece en el capítulo 4. Esta condición se basa en la siguiente ley empírica [6]:

$$\begin{cases} c_{fondo} = 0 & \text{si } \bar{\tau} < 0.25 \\ c_{fondo} = 0.6(\bar{\tau} - 0.25) & \text{si } 0.25 \leq \bar{\tau} \leq 0.75 \\ c_{fondo} = 0.3 & \text{si } \bar{\tau} > 0.75 \end{cases} \quad (5-29)$$

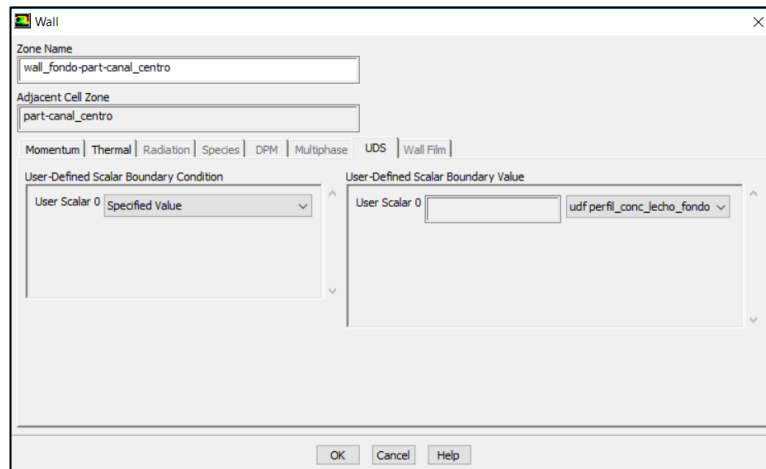


Ilustración 5-31. Condición de contorno sobre el lecho

Al considerar un único tipo de partícula en esta simulación, los valores a usar son:

Tabla 5-4. Características fase sólida en modelo UDF

$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_{50}$ (mm)	$D^*$	$w_y$ (m/s)
1700	0.03	0.57	0.000307

### 5.5.2.2. Modelo discreto (*Discrete Phase Model*)

Como se ha comentado, uno de los enfoques que Ansys permite para tratar los flujos con más de una fase es el modelo discreto, en el que se emplea el método Lagrangiano para la fase discreta o partículas sólidas y el método Euleriano para la fase continua o flujo de agua.

La diferencia entre ambos métodos:

- Método Lagrangiano. Se sigue el movimiento de cada partícula en el tiempo a través de la ecuación que define su trayectoria.
- Método Euleriano. Se especifica el movimiento del fluido a través de la densidad y velocidad de las partículas en un punto específico del espacio como una función del tiempo y el espacio. Las herramientas de trabajo son las típicas de la Teoría de Campos.

Este modelo se activa en el apartado correspondiente a modelos del programa.

Se está considerando un flujo estacionario, por lo que las partículas se tratarán del mismo modo.

En este caso las partículas se introducen como inyecciones. Se van a considerar dos tipos de partículas, las cuales se han definido en el apartado correspondiente a materiales. Estas inyecciones se caracterizan mediante los siguientes parámetros, además de los ya conocidos:

- Velocidad: se considera la misma velocidad que el flujo, 0.1 m/s.
- Masa de entrada: se ha estimado, según la fracción volumétrica, un total de masa de entrada de 10 kg/s. Considerando una misma proporción para ambas inyecciones, se establece en 5 kg/s.

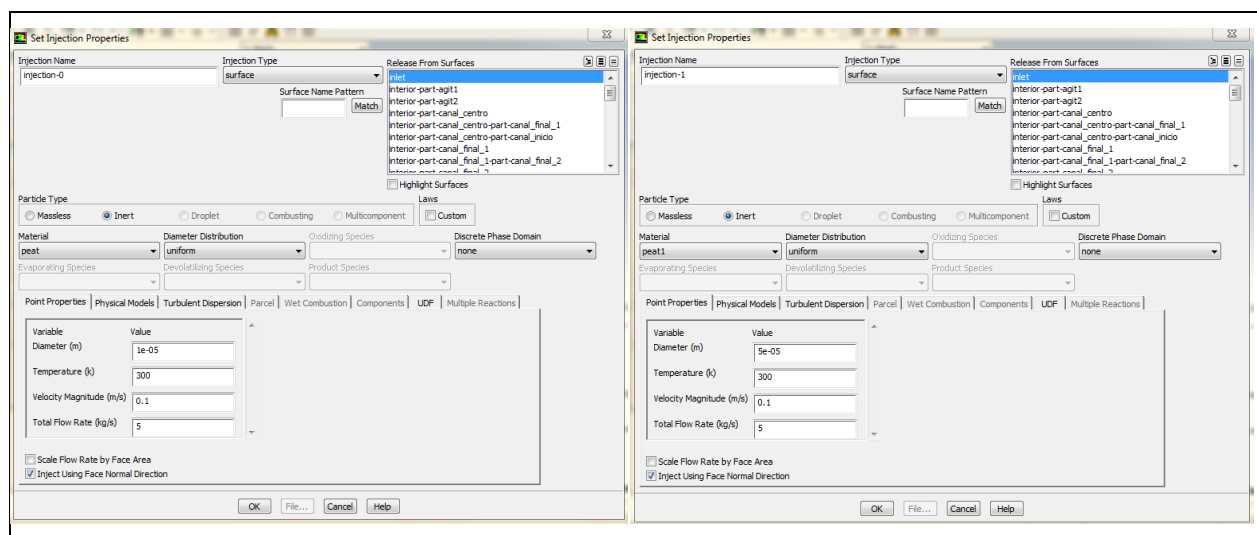


Ilustración 5-32. Caracterización de las inyecciones

Otra de las entradas que necesita el método son los parámetros de seguimiento de la trayectoria:

- Número máximo de pasos (en inglés, *maximum numero of time steps*): máximo número de pasos usados para computar la trayectoria de una única partícula.
- Longitud de escala (en inglés, *length scale*): controla el tamaño de los pasos de la integración en la resolución de la ecuación que define la trayectoria de las partículas. Esta ecuación es del tipo ecuación 4-4. A menor valor de la longitud de escala, mayor precisión tiene el cálculo de la trayectoria de las partículas, lo que supone un mayor coste computacional.

Ambos parámetros se pueden relacionar mediante la siguiente expresión:

$$L = \text{Número máximo de pasos} * \text{Longitud de escala} \quad (5-30)$$

Siendo  $L$  la distancia que las partículas tienen que viajar, que en este caso se corresponde con la longitud del canal.

Distintas pruebas han sido realizadas para ajustar el valor de estos parámetros, habiendo resultado como definitivas:

- Número máximo de pasos: 50000
- Longitud de escala: 0.02

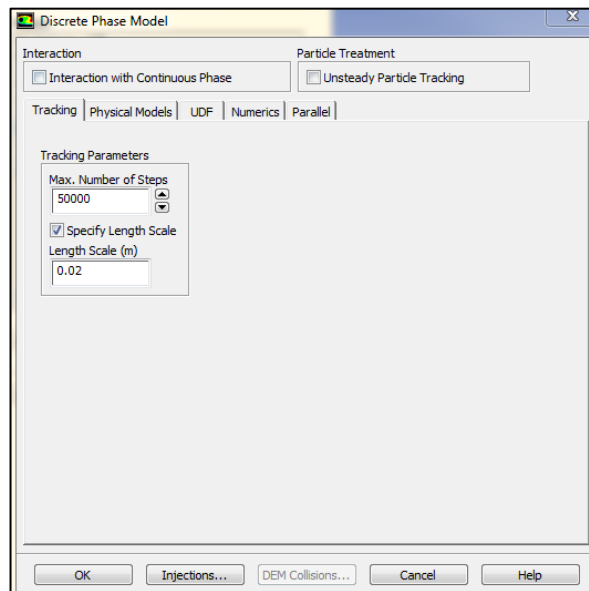


Ilustración 5-33. Parámetros de seguimiento de la trayectoria de las partículas

Activando el modelo lagrangiano, hay que establecer unas condiciones de contorno para la trayectoria de las partículas sobre la superficie de entrada, salida y el lecho.

- Condición de contorno tipo *escape*. Se establece cuando las partículas pueden atravesar el contorno debido al paso del flujo. Es la condición a definir en la entrada y en la salida.
- Condición de contorno tipo *reflect*. Se establece cuando las partículas pueden rebotar contra el contorno al tratarse de una colisión sólido – sólido. Es el caso del lecho.

### 5.5.2.3. Modelo euleriano

El enfoque Euler-Euler permite usar distintos modelos:

- VOF. Cuando se tienen dos fluidos inmiscibles y la posición de la interfase entre ellos es de interés. Suele usarle para resolver flujos en canales donde los dos fluidos a definir son el agua y el aire.
- Modelo mixto. Se emplea para resolver flujos con dos o más fases fluidas o de partículas.
- Modelo de Euler. Es el modelo más complejo de los multifásicos. Resuelve un conjunto de  $n$  ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para cada fase. Suele emplearse en fluidos con partículas en suspensión, en columnas de burbujas.

De estos modelos, el VOF es apropiado para flujos en superficie libre, y el modelo mixto y euleriano para flujos en los que la fracción volumétrica de la fase de partículas exceda el 10%. Para flujos en los que la fracción volumétrica esté por debajo de este valor, es adecuado el uso del modelo lagrangiano o modelo disperso.

Este motivo, añadido al gran coste computacional del modelo y la imposibilidad de tratar los agitadores usando la condición tipo fan cuando se activa el modelo euleriano, han hecho que se opte por no usar este modelo para la realización del estudio.

## 5.6. Condiciones de contorno

En todo estudio numérico es necesario definir las condiciones del problema a resolver en cada uno de los contornos existentes.

Se establecen aquí las condiciones de contorno generales, habiendo especificado en cada modelo las particulares.

En el modelo en estudio existen 4 contornos:

- Entrada, llamada inlet. Se establece condición del tipo *velocity inlet*. Se emplea para definir la velocidad del flujo en la entrada, puesto que se conoce la sección y el caudal de estudio.

Los parámetros necesarios para definir esta condición se especifican en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5. Parámetros condición de contorno entrada

Parámetro	Valor
Velocidad (m/s)	0.1
Re	1349832.44
Intensidad turbulenta (%)	2.74
Diámetro hidráulico (m)	13.77

El valor de estos parámetros se obtiene de las siguientes expresiones:

- o Intensidad turbulenta (I):

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0.16Re^{-1/8} \quad (5-31)$$

$$Re = \frac{\rho_w v D_H}{\mu_w} \quad (5-32)$$

- o Diámetro hidráulico ( $D_H$ ):

$$D_H = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} \quad (5-33)$$

Además de estos parámetros hay que definir la dirección del flujo: normal a la superficie.

- Salida, llamada outlet. Se establece condición de contorno tipo *pressure outlet*. Ésta permite establecer la presión de salida en 0, con el objetivo de obtener la pérdida de carga en el canal mediante el conocimiento de la presión en la entrada.

Los parámetros necesarios para definir esta condición de contorno se especifican en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6. Parámetros condición de contorno salida

Parámetro	Valor
Presión (Pa)	0
Intensidad turbulenta (%)	2.74
Diámetro hidráulico (m)	13.77

Además de estos parámetros hay que definir la dirección del flujo: normal a la superficie.

- Lecho del canal, llamada wall. Se establece condición de contorno tipo *wall*. Se emplea en contornos que representan partes sólidas.

Los parámetros necesarios para definir esta condición de contorno se especifican en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7. Parámetros condición de contorno lecho

Parámetro	Valor
Altura de rugosidades del lecho (m)	0.007
Altura de rugosidades de la escollera (m)	0.02

En este caso los parámetros a definir son los valores de la altura de rugosidades de los materiales que forman el lecho.

El lecho se ha considerado formado por material arenoso pudiendo presentar alguna irregularidad debido a la presencia de vegetación.

- Superficie libre, llamada *symmetry*. Para modelar el contorno de la superficie libre se ha empleado una condición de contorno de simetría, *symmetry*.

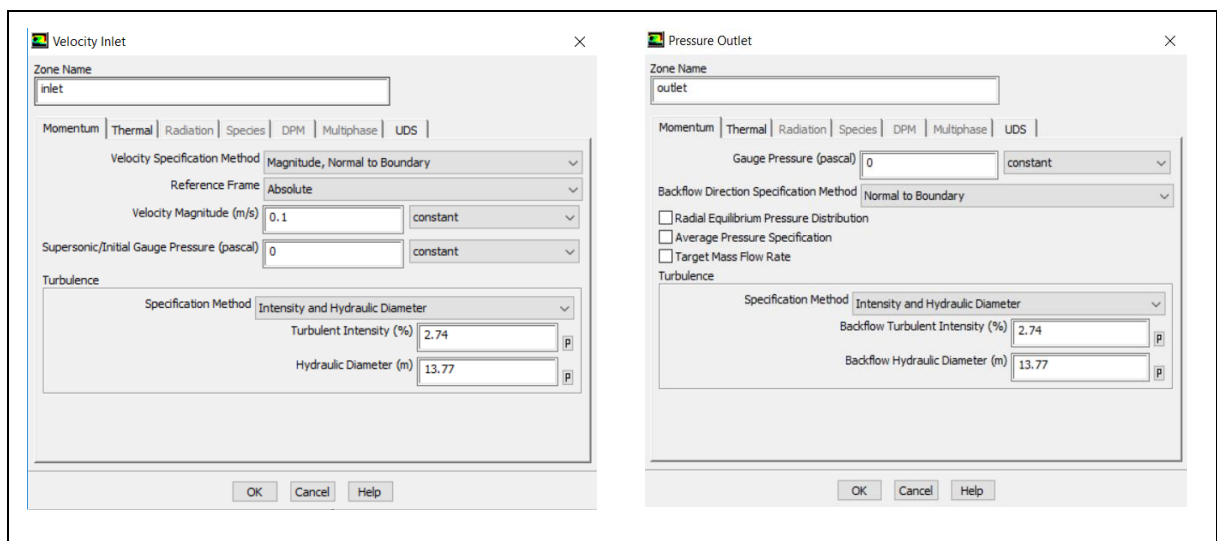


Ilustración 5-34. Condición de contorno entrada y salida

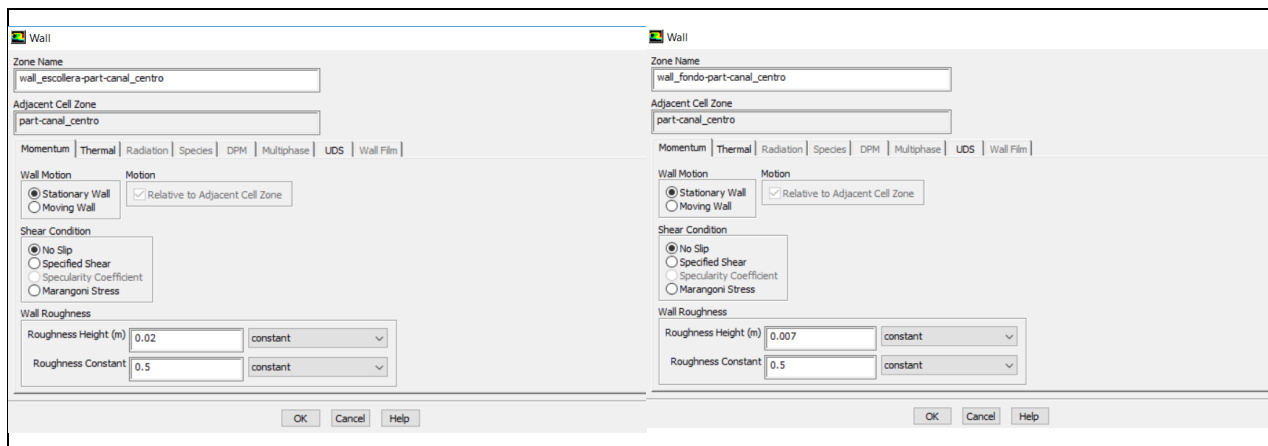


Ilustración 5-35. Condición de contorno

## 5.7. Validación de los resultados

El empleo de técnicas de dinámica de fluidos computacional proporciona una solución teórica de las simulaciones realizadas, teniendo que en cuenta las distintas simplificaciones que se han empleado.

No todos los resultados que proporcionan las técnicas CFD son fiables, puesto que depende, entre otras cosas, de la precisión de la malla generada, de los modelos introducidos, etc.

Para dar como válidos los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- Valor de los residuos escalados inferior a  $10e-3$ . Los residuos escalados son la suma de los residuos de todas las ecuaciones, los cuales se van almacenando al final de cada iteración.
- Control del valor de variables conocidas. Las variables empleadas han sido: presión en la entrada, velocidad del flujo en la salida, balance entre la cantidad de flujo a la entrada y a la salida. Hasta que dichas variables no se estabilicen, la solución no se considerará válida.
- Control del valor  $y^+$ .
- Calibración de la malla sin uso de agitadores mediante el valor de la pérdida de carga en el canal.

Se han realizado numerosas simulaciones, por lo que en el capítulo correspondiente a los resultados solo se mostrará la validación una única vez, entendiéndose que todos los resultados que se van a mostrar han seguido los mismos pasos de validación.

## 5.8. Agitadores

Realizado el estudio de mercado de agitadores en el capítulo correspondiente a la solución a emplear, se pasa a describir el modelado de estos elementos en Ansys Fluent.

Los agitadores pueden modelarse en Ansys Fluent de distintas formas encontrándose todas ellas en el apartado correspondiente a *cell zone conditions* que ofrece el software.

- Fijar un valor (*Fixed Value*). Los agitadores se simulan fijando una velocidad. Es el caso que se empleó en el estudio anterior a este.
- Término fuente (*Source Term*). Permite introducir un empuje para caracterizarlos. En este caso también se están tratando como un valor constante.
- Condición tipo *fan* (*3D Fan Zone*). Es el método que permite introducir parámetros más reales del agitador.

Uno de los objetivos del estudio es introducir los agitadores con esta condición tipo *fan*. Ofrece como principal ventaja que el resultado se acerca a lo que se podría obtener mediante simulaciones en las que se incluyen los álabes del ventilador, sin ser necesario introducir geometrías complejas más allá de la del propio agitador que se describirá a continuación.

Uno de los requisitos a cumplir es que la forma de los agitadores sea toroidal. El radio de los álabes (*tip radius*) y del cubo del que parten estos (*hub radius*) se reflejan mediante el radio exterior e interior, respectivamente. El espesor (*thickness*), las coordenadas del centro (*fan origin*), la cara de entrada del agitador (*inlet fan zone*) la cual debe ser de tipo interior y el punto de inflexión (*inflection point*) son parámetros geométricos más a introducir, representando el último de ellos la relación entre la longitud del álabe (b) y la distancia desde el radio interior al punto de mayor velocidad tangencial (a). De este último parámetro no se tiene dato, por lo que se dejará en valor por defecto de 0.83.

Requisitos a cumplir para su uso:

- Forma toroidal de los agitadores.
- Todas las caras de la geometría del agitador han de definirse de tipo interior en las condiciones de contorno.

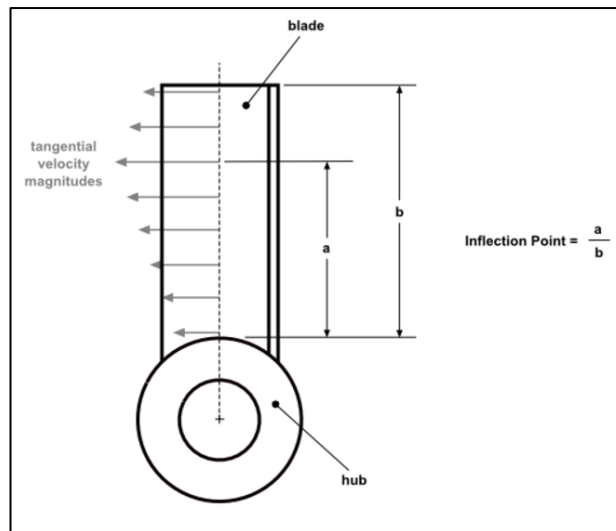


Ilustración 5-36. Representación de los parámetros geométricos del agitador

Fuente: [15]

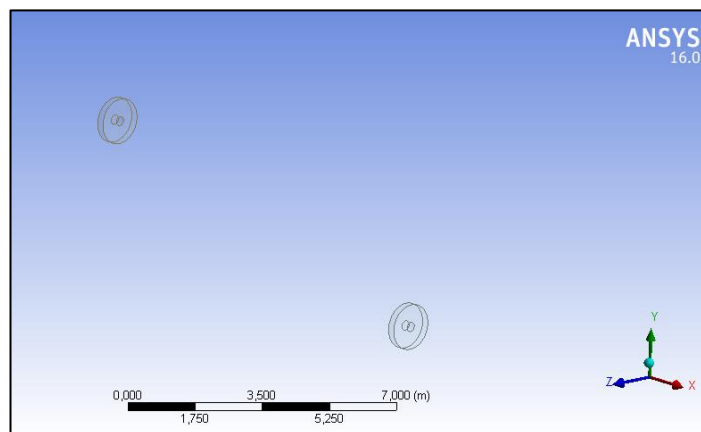


Ilustración 5-37. Diseño de la geometría de los agitadores



Además de la geometría, hay que incluir otros parámetros característicos entre los que se encuentran la velocidad de rotación (*operating angular velocity*) y su dirección (*rotational direction*), los límites de caudal (opcional) y la presión del agitador. Este último puede darse mediante un valor constante o introducir una curva característica (curva H-Q).

También se piden unos valores correspondientes a valores de prueba (*test angular velocity*), considerando éstos del mismo valor que los de operación.

La condición tipo *fan* tiene las siguientes limitaciones:

- No puede emplearse con el modelo multifásico euleriano.
- Es necesario activar la ecuación de energía al introducir una curva H-Q.

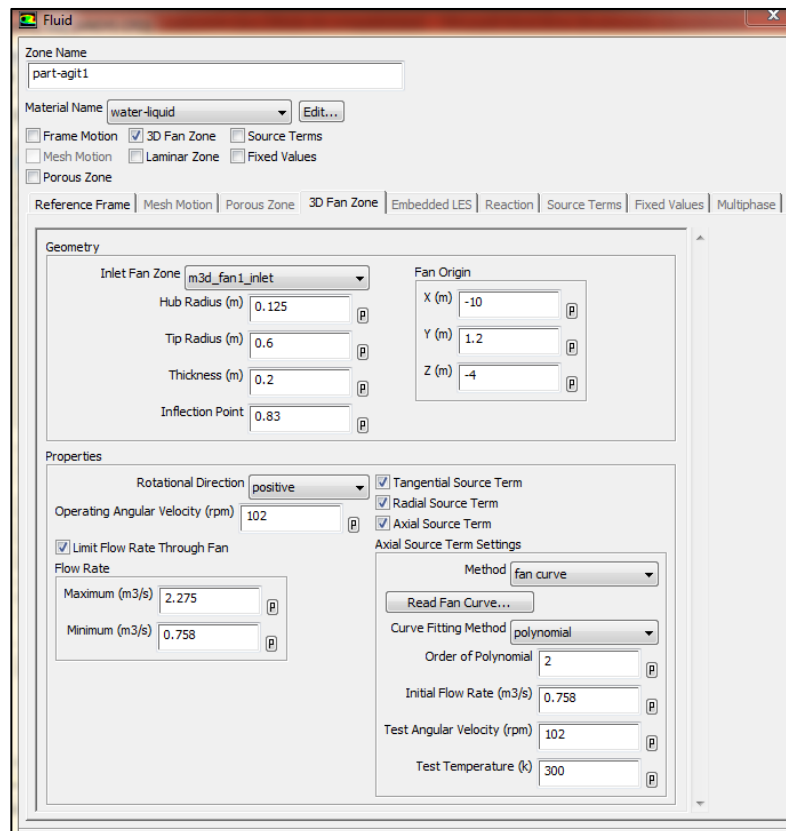


Ilustración 5-38. Parámetros de los agitadores

Para poder cumplir que todas las caras del agitador sean de tipo interior, es necesario nombrarlas, al igual que se hizo con las superficies de las condiciones de contorno.

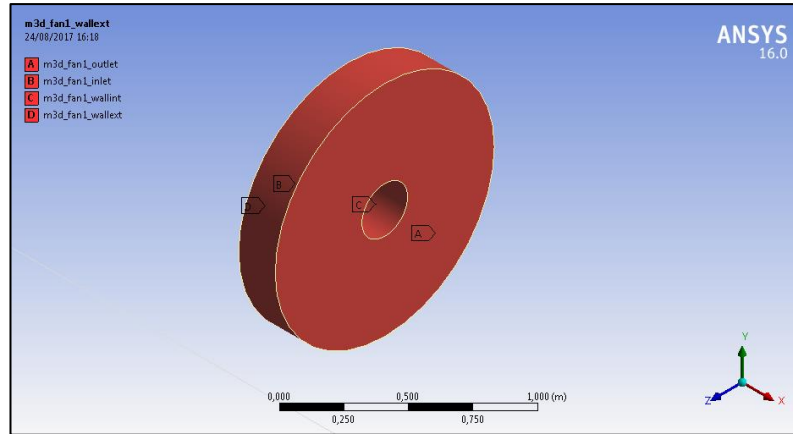


Ilustración 5-39. Nomenclatura de las caras del agitador

Debido al coste computacional que supone cada una de las simulaciones, la elección del agitador óptimo se va a realizar probando dos agitadores de los obtenidos en el estudio de fabricantes, siendo estos los de menor tamaño al corresponderse con los que menos potencia consumen. De este modo, se busca también la eficiencia económica.

Realmente, durante el desarrollo del estudio se han realizado pruebas con más agitadores, pero al haber resultado efectivo uno de los mostrados en la Tabla 5-8, se ha decidido profundizar más en él.

Las características de los agitadores empleados son las siguientes:

Tabla 5-8. Agitadores empleados

Agitador	Diámetro (m)	Potencia (kW)	Velocidad de giro (rpm)
1	0.9	2.4	134
2	1.2	3	102

El tipo de curva H-Q empleada se muestra en el anexo 1.

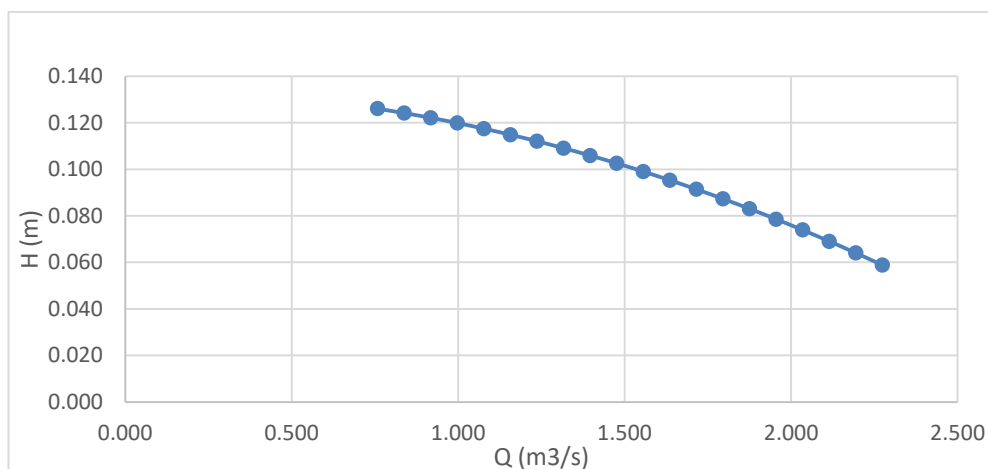


Ilustración 5-40. Curva H-Q para agitador de 0.9 m de diámetro

## 5.9. Opciones del solver

Estas opciones también controlan la precisión y convergencia de los resultados.

Hay dos tipos de solvers disponibles en Fluent:

- Basado en presión.
- Basado en densidad.

En este caso se va a utilizar el basado en presión, aplicable a un amplio rango de regímenes de flujo, desde flujos incompresibles a baja velocidad hasta flujos compresibles de alta velocidad. Utiliza la cantidad de movimiento y las presiones como variables principales. Además, requiere menor memoria que el basado en densidad y ofrece mayor flexibilidad en el proceso de resolución.

Cada una de las variables para resolver el modelo se calcula en el centro de las celdas, y deben ser interpoladas a las caras de los volúmenes de control. La precisión de esta interpolación viene determinada por los métodos de solución (en inglés, *solution methods*). El método empleado para cada una de las variables se presenta a continuación:

- Acoplamiento presión-velocidad: *SIMPLE*. Es la opción por defecto. Se trata de una opción robusta y que se puede emplear en la mayoría de flujos. Al estar tratando un flujo estacionario no muy complejo se ha elegido esta opción.
- Gradientes: *Least-Squares Cell-Based*. Es un método preciso.
- Presión: *Standard*. Es el método por defecto.
- Resto de variables: *Second-Order Upwind*. La convergencia es más lenta que si se usa el método de primer orden, sin embargo, genera un aumento de precisión. El proceso a seguir ha consistido en usar el primer orden para las primeras iteraciones, para posteriormente usar el segundo orden.

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se muestra en el presente capítulo los resultados obtenidos.

El procedimiento de resolución ha sido el siguiente:

- Pruebas con el programa en un canal de sección cuadrada y 100 metros de longitud para probar el funcionamiento del software y los distintos modelos.
- Pruebas en la geometría del estudio sin agitadores, con el objetivo de calibrar la malla.
- Comprobación de las conclusiones alcanzadas en el anterior estudio.
- Pruebas con agitadores en canal de 200 metros, debido al coste computacional. Estas pruebas han servido para obtener qué disposición de los agitadores puede considerarse efectiva.
- Prueba en la geometría en estudio con las conclusiones obtenidas en las simulaciones de 200 metros.

### 6.1. Calibración del modelo sin agitadores

Para comprobar si el modelo es adecuado, una de las validaciones a realizar es comparar la pérdida de carga calculada en la simulación con la pérdida de carga teórica.

Otro de los aspectos a considerar en este apartado es la comprobación de los resultados obtenidos con los del estudio anterior. Esto viene motivado por el hecho de que la malla no es la misma, además de haber considerado otras diferencias en el modelo.

#### 6.1.1. Pérdida de carga teórica del canal

La pérdida de carga teórica se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = f \frac{L}{D_H} \rho_w \frac{v^2}{2} \quad (6-1)$$

Donde, además de los parámetros ya conocidos:

- $f$ : factor de fricción (depende del material)

El valor del factor de fricción se obtiene a partir del Ábaco de Moody. Para su cálculo se necesita el valor de la rugosidad relativa del material y del número de Reynolds.

$$Rugosidad\ relativa = \frac{Rugosidad\ absoluta}{D_H} \quad (6-2)$$

Donde, el valor de la rugosidad absoluta depende del material, y aparece definido en el apartado correspondiente a las condiciones de contorno (Tabla 5-7).

Tabla 6-1. Valores de rugosidad

Material	Rugosidad absoluta (m)	Diámetro hidráulico (m)	Rugosidad relativa
Escollera	0.02	13.77	0.00145
Fondo	0.07	13.77	0.00051

Teniendo en cuenta un valor del número de Reynolds de 1349832.44 y el diagrama de Moody (Ilustración 6-1) se obtiene los siguientes coeficientes de fricción y pérdidas de carga.

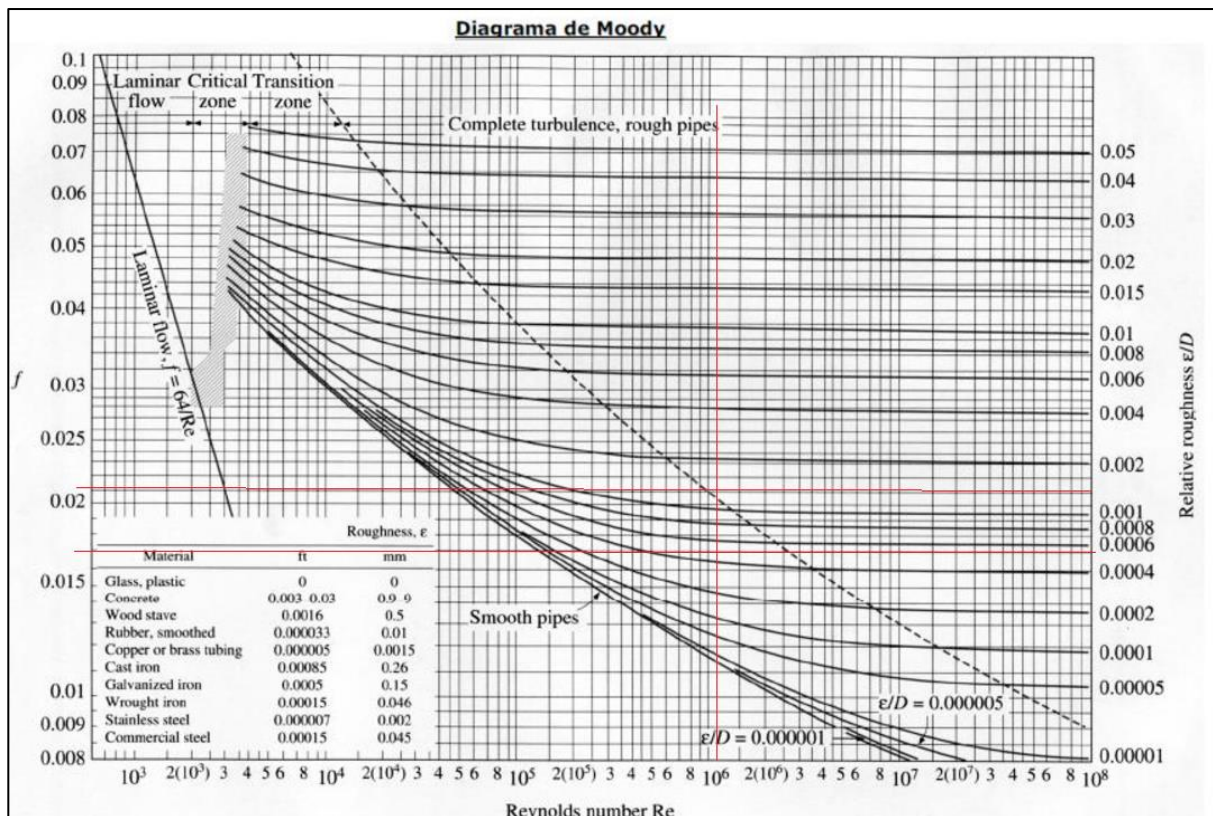


Ilustración 6-1. Diagrama de Moody

Tabla 6-2. Pérdida de carga

Material	$f$	$\Delta P$ (Pa)
Escollera	0.021	7.3
Fondo	0.017	5.9

Obtenidos estos valores de pérdida de carga, se considerará válido el modelo si se encuentra dentro del rango establecido por ambos materiales, puesto que la sección del canal está compuesta por los dos.

Un valor más concreto de la pérdida de carga podría obtenerse considerando el primer tramo de 660 metros con un factor de fricción correspondiente a 0.017, por ser predominante en la sección la zona sin escollera y, un segundo tramo de 340 metros con un factor de fricción de 0.021, por ser predominante la zona con escollera. Teniendo en cuenta esto, se obtiene un valor de pérdida de carga teórica de 6.67 Pa.

### 6.1.2. Comprobación de conclusiones de estudio anterior

En el estudio previo a este se establecieron dos conclusiones principales:

- Los agitadores son efectivos para el problema que se pretende solucionar.
- Los agitadores son efectivos para un tipo determinado de partículas.

En cuanto al primero de los puntos comentados, cuando se presenten los resultados con agitadores se verá el efecto que éstos tienen sobre las partículas.

Por otro lado, en el estudio previo se consideraron cuatro tipo de partículas:

Tabla 6-3. Partículas consideradas en estudio previo

Partícula	$d_{50}$ (mm)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	0.01	1500
2	0.05	1900
3	0.1	2200
4	0.5	2600

La conclusión que se obtuvo fue que solamente las partículas de tipo 1 y 2 avanzaban en suspensión lo suficiente en el canal como para alcanzar la zona de los agitadores y notar su efecto.

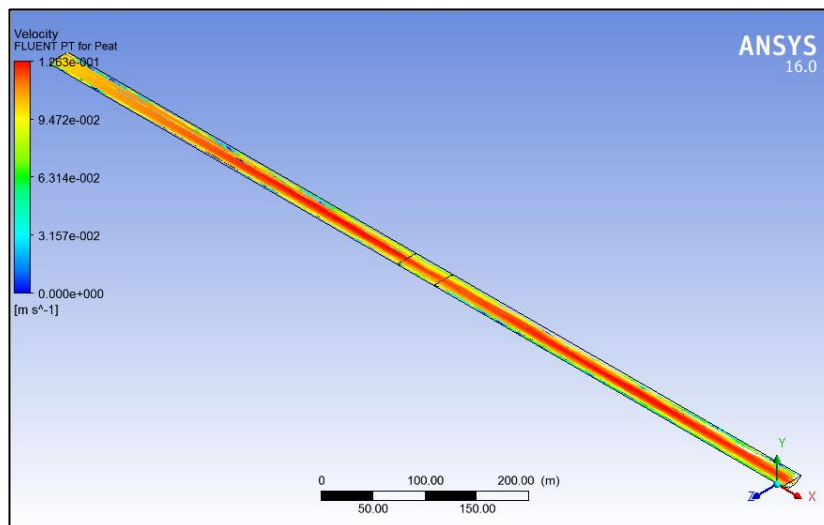


Ilustración 6-2. Trayectoria de partículas tipo 1

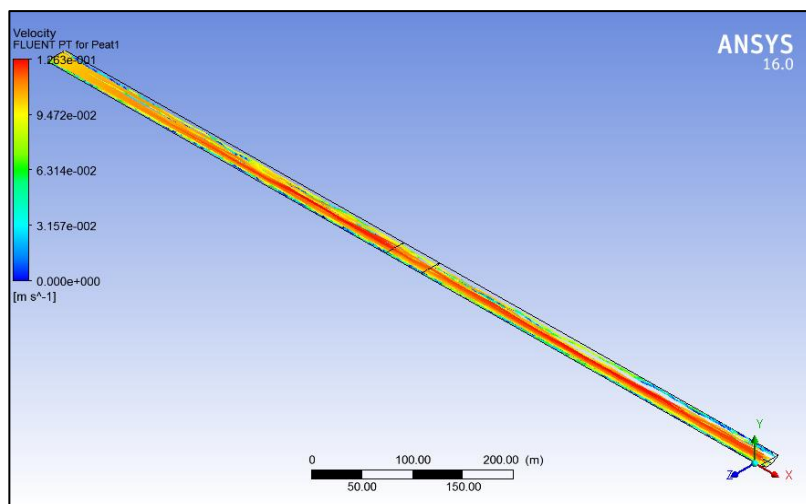


Ilustración 6-3. Trayectoria partículas tipo 2

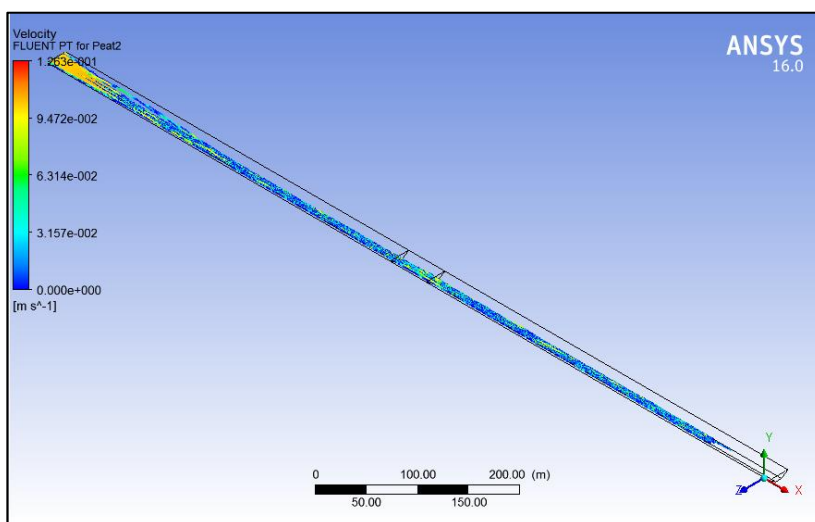


Ilustración 6-4. Trayectoria partículas tipo 3

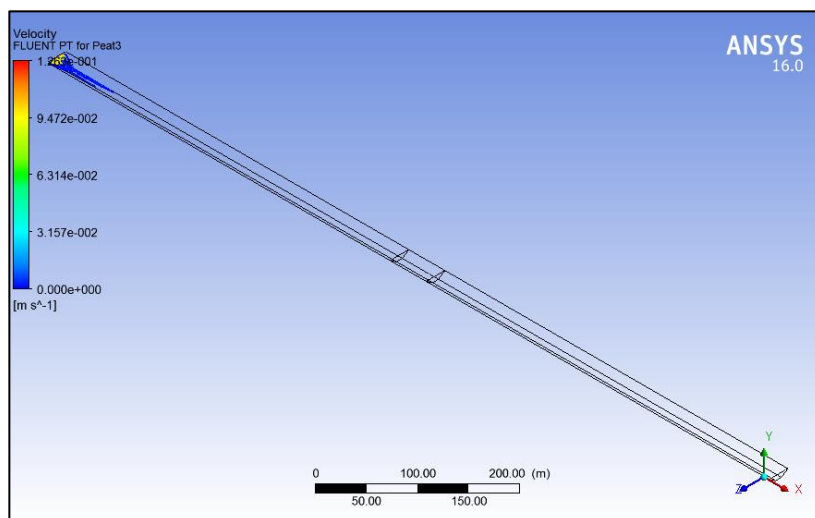


Ilustración 6-5. Trayectoria partículas tipo 4

Como puede visualizarse en las imágenes 6-2 a 6-5, las partículas tipo 3 y 4 no avanzan es suspensión hasta la zona en la que se encuentran los agitadores, por lo que en el estudio actual solamente se consideran las de tipo 1 y 2.

### 6.1.3. Resultados de la simulación sin agitadores

Revisado lo anterior y conocida la pérdida de carga teórica admisible, se exponen a continuación los resultados obtenidos de la simulación sin hacer uso de los agitadores.

#### 6.1.3.1. Solución lagrangiana

Se muestra a continuación la solución lagrangiana haciendo uso de la fase sólida que se indica en la Tabla 5-3.

En las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos:

- Trayectoria de las partículas.

Las partículas, cuando no están los agitadores, siguen una trayectoria casi rectilínea desde el inicio del canal hasta que se depositan. Los dos tipos de partículas consideradas viajan desde el inicio hasta casi el final del canal, siendo éste el lugar en el que se depositan.

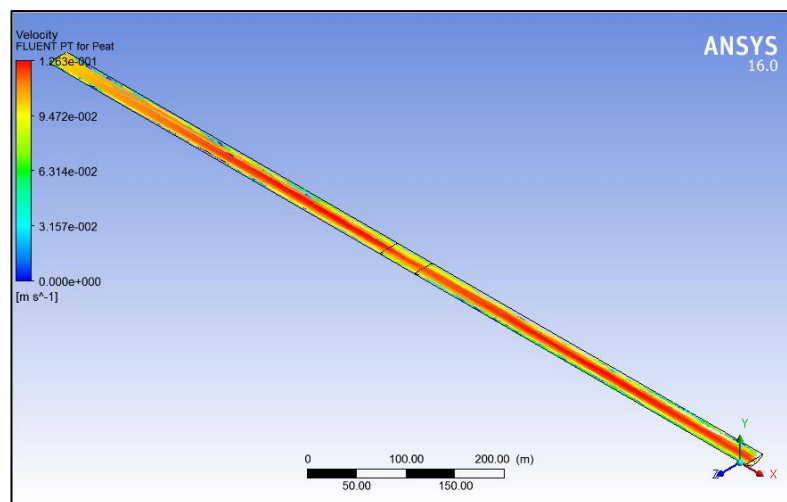


Ilustración 6-6. Trayectoria partículas tipo 1

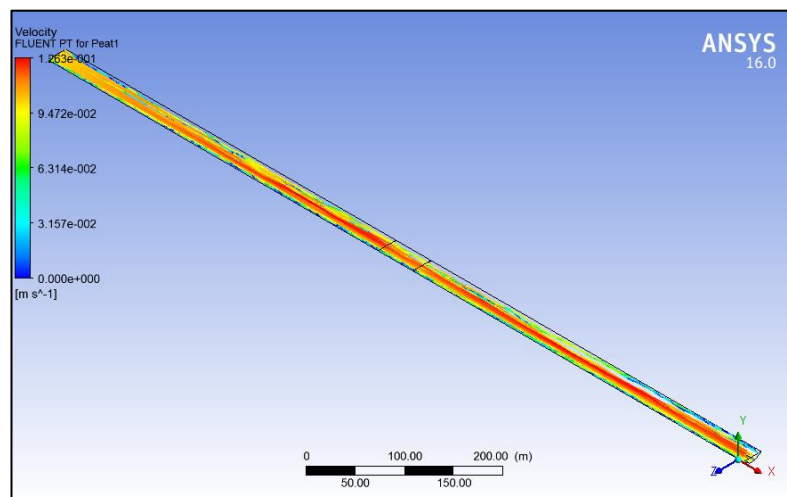


Ilustración 6-7. Trayectoria partículas tipo 2



- Residuos escalados.

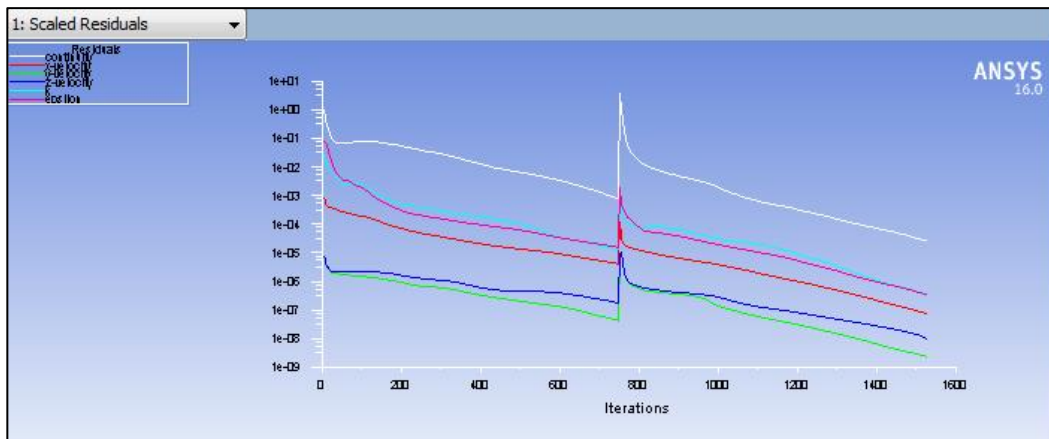


Ilustración 6-8. Residuos escalados

El valor de los residuos se encuentra en un rango inferior al establecido.

- Presión en la entrada, correspondiente con la pérdida de carga.

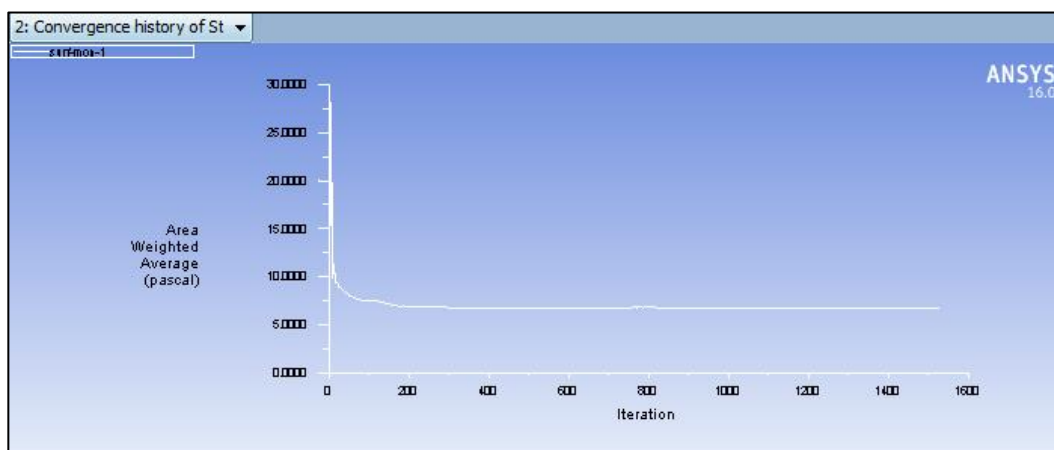


Ilustración 6-9. Presión en la entrada del canal

Area-Weighted Average Static Pressure	(pascal)
inlet	6.7740868

Ilustración 6-10. Valor de la presión en la entrada

La pérdida de carga obtenida en la simulación es de 6.77 Pa, siendo la teórica de 6.67 Pa, lo cual es un buen indicador de que el modelo es apropiado.

- Velocidad en la salida.

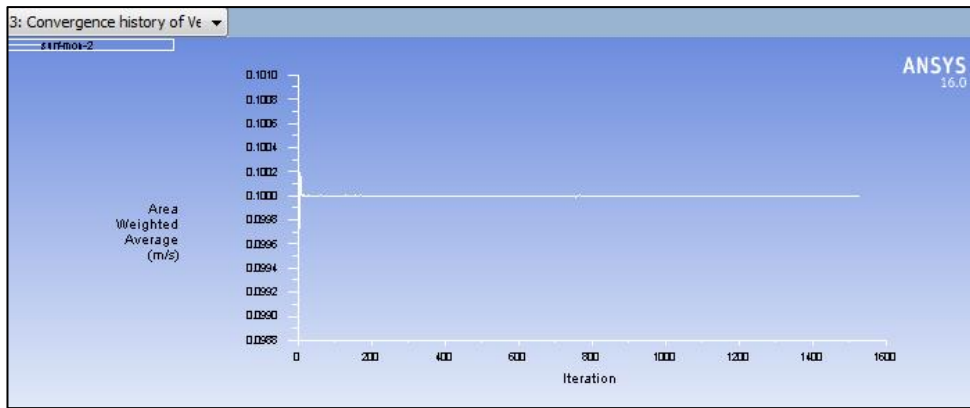


Ilustración 6-11. Velocidad en la salida

- Balance de caudales

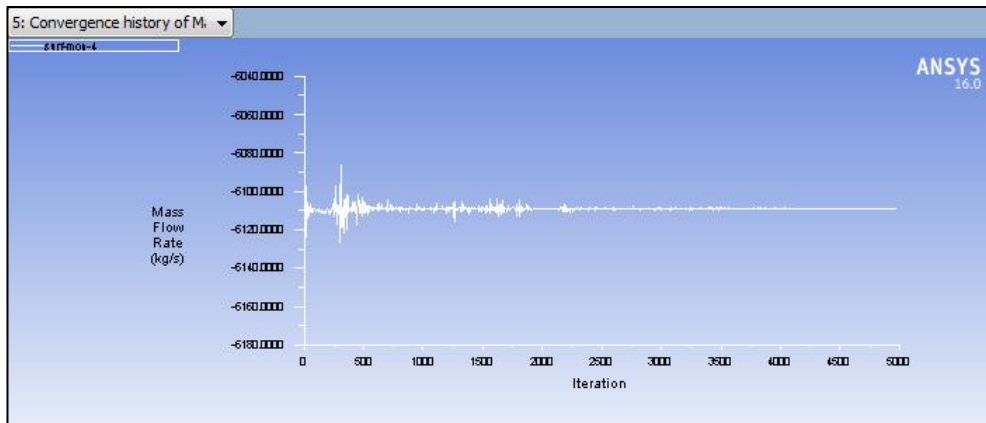


Ilustración 6-12. Caudal en la salida

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	10181.64
Mass Flow Rate	(kg/s)
outlet	-10181.64

Ilustración 6-13. Balance de caudales

- Control sobre el parámetro  $y^+$ .

Todos los valores de  $y^+$  se encuentran en el rango establecido de 30 a 300.

Area-Weighted Average Wall Yplus	
wall_escollera-part-canal_centro	129.75839
wall_escollera-part-canal_final_1	116.81444
wall_escollera-part-canal_final_2	120.98671
wall_escollera-part-canal_inicio	122.54225
wall_fondo-part-canal_centro	109.20504
wall_fondo-part-canal_final_1	106.35173
wall_fondo-part-canal_final_2	107.98967
wall_fondo-part-canal_inicio	104.0222
wall_lateral-part-canal_centro	92.067897
wall_lateral-part-canal_final_1	80.411122
wall_lateral-part-canal_inicio	82.034025
<b>Net</b>	<b>107.78188</b>

Ilustración 6-14. Valores de  $y^+$ 

### 6.1.3.2. Resolución mediante UDF

Como aparece reflejado anteriormente, la resolución mediante UDF incluye como novedad la posibilidad de resuspensión de partículas desde el fondo.

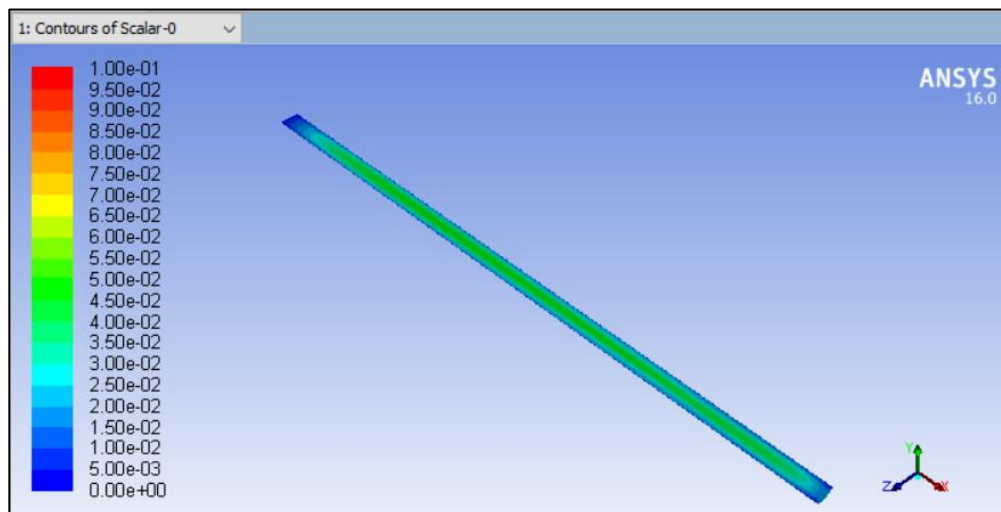


Ilustración 6-15. Concentración de sedimento en el canal sin agitadores

Como se aprecia en la Ilustración 6-15, la concentración a lo largo del canal aumenta respecto a la concentración que tiene en su entrada. Esto es debido a la resuspensión desde el fondo. Se observa cómo las partículas viajan a lo largo de todo el canal, hasta llega al final, al igual que se observaba en la simulación lagrangiana sin agitadores (Ilustración 6-6 e Ilustración 6-7).

## 6.2. Modelo con agitadores

En el presente apartado se incluyen las soluciones obtenidas al introducir los agitadores. Para encontrar la mejor posición de éstos, se han realizado simulaciones en un canal de 200 metros haciendo uso del método lagrangiano, con el objetivo de encontrar la posición que genera la recirculación de partículas más adecuada.

Una vez obtenida esta posición, se ha simulado en el canal completo mediante el modelo lagrangiano y UDF.

### 6.2.1. Pruebas para encontrar ubicación óptima

Debido al coste computacional de cada simulación en el canal completo, se ha buscado la posición más adecuada de los agitadores en pruebas con un canal de 200 metros.

Estas pruebas se han realizado para dos tipos de agitadores.

Teniendo en cuenta que el origen de coordenadas se ha establecido justamente en el centro del canal, como aparece reflejado en el apartado correspondiente a la geometría, las ubicaciones de los agitadores probadas han sido las siguientes:

Tabla 6-4. Posiciones probadas de los agitadores

Prueba	Agitador	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1	-10	$\phi$	-3
	2	10	$\phi$	3
2	1	-10	$\phi$	-4
	2	10	$\phi$	4
3	1	-10	$\phi$	-2.5
	2	10	$\phi$	2.5
4	1	-10	2	-4.75
	2	10	2	4.75
5	1	-10	2	-4
	2	10	2	4
6	1	-10	2	-3
	2	10	2	3
7	1	-15	$\phi$	-4
	2	15	$\phi$	4
8	1	-7.5	$\phi$	-4
	2	7.5	$\phi$	4

Siendo  $\phi$  el diámetro del agitador probado.

Estas pruebas se han llevado a cabo para los agitadores mostrados en la Tabla 5-8, y, a continuación, se muestran los resultados de las trayectorias obtenidas.

En la posición longitudinal se han probado a una distancia entre agitadores de 15, 20 y 30 metros (Valor X).

En la separación transversal se han probado a distancias entre agitadores desde 5 a 9.5 metros (Valor Z).

En la posición altitudinal se han probado a una distancia igual a su diámetro y a 2 metros. (Valor Y).

- Para el agitador de 0.9 metros de diámetro.

Los resultados obtenidos para este diámetro no han sido exitosos, por lo que la combinación de la potencia y diámetro probados no dan buen rendimiento. Se decide probar con diámetros superiores, puesto que en ellos se observa buen rendimiento, en lugar de estudiar un aumento de la potencia de éste, ya que este aumento la igualaría con la del siguiente agitador probado.

Se incluye una imagen del resultado obtenido para la prueba 1 de la Tabla 6-4 para este diámetro de

agitador.

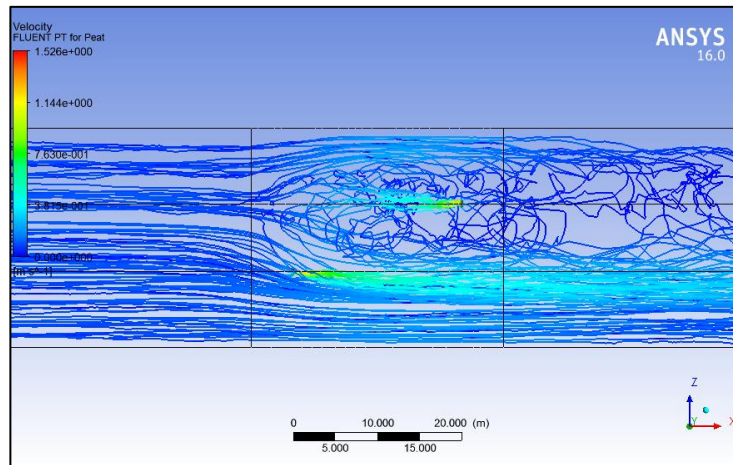


Ilustración 6-16. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 1, agitador  $\phi=0.9$  m

Solamente se produce la recirculación de algunas partículas, lo cual impide que se reduzca en gran medida la concentración aguas abajo de los agitadores.

- Para el agitador de 1.2 metros de diámetro.

Para este agitador se han obtenido mejores resultados. Si el rendimiento obtenido no hubiera sido bueno, se tendría que haber probado con otro tipo de agitador.

Se incluyen a continuación la trayectoria de las partículas de las pruebas que mejores resultados han dado.

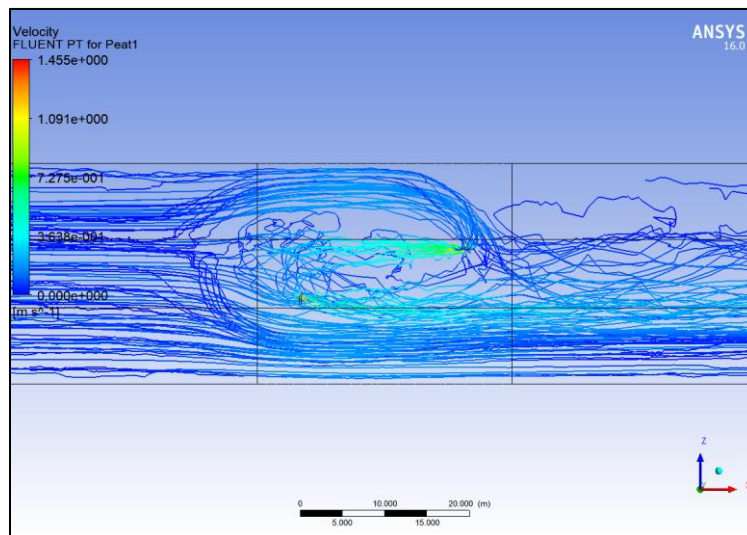


Ilustración 6-17. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 1, agitador  $\phi=1.2$  m

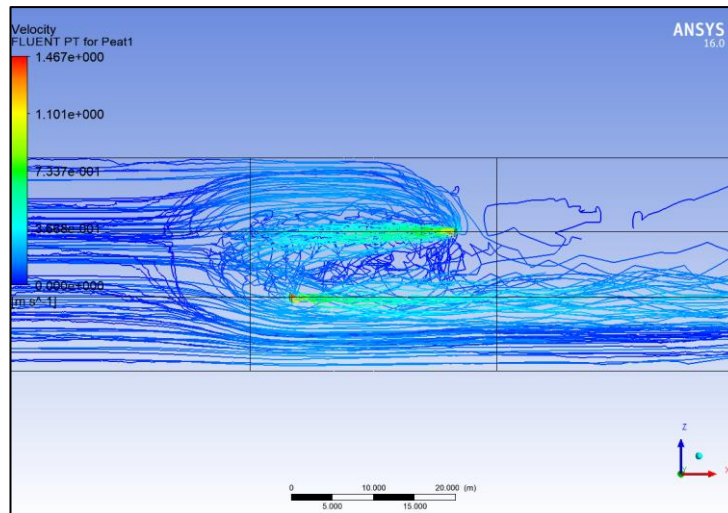


Ilustración 6-18. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 2, agitador  $\phi=1.2$  m

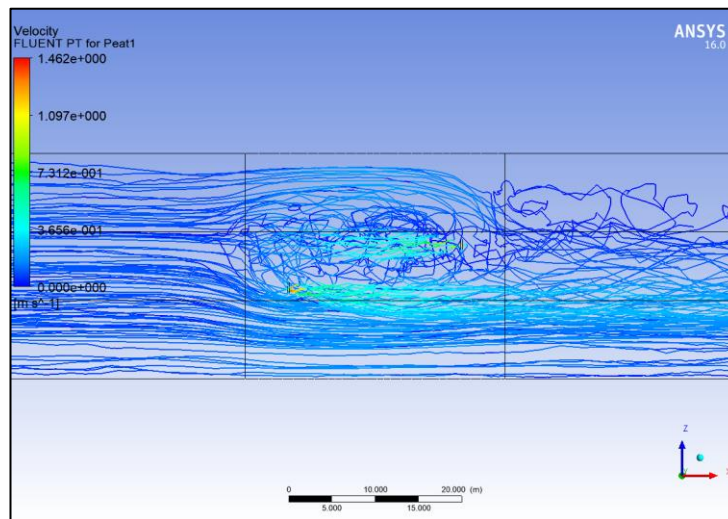


Ilustración 6-19. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 3, agitador  $\phi=1.2$  m

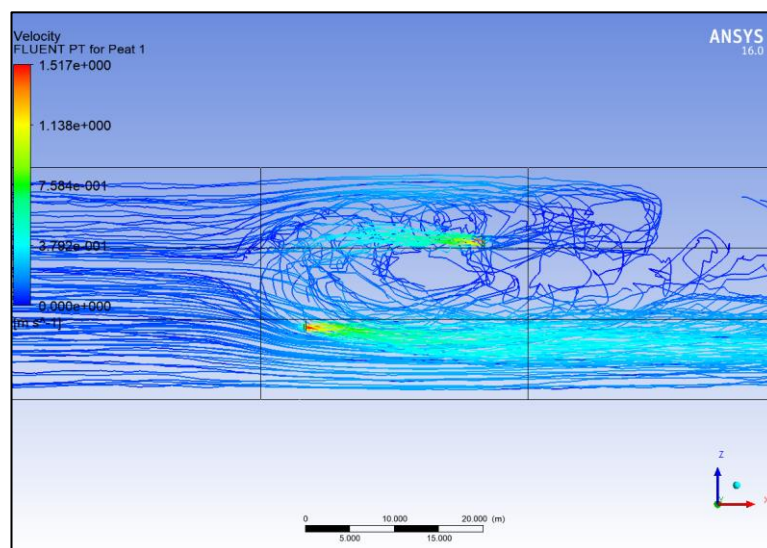


Ilustración 6-20. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 4, agitador  $\phi=1.2$  m



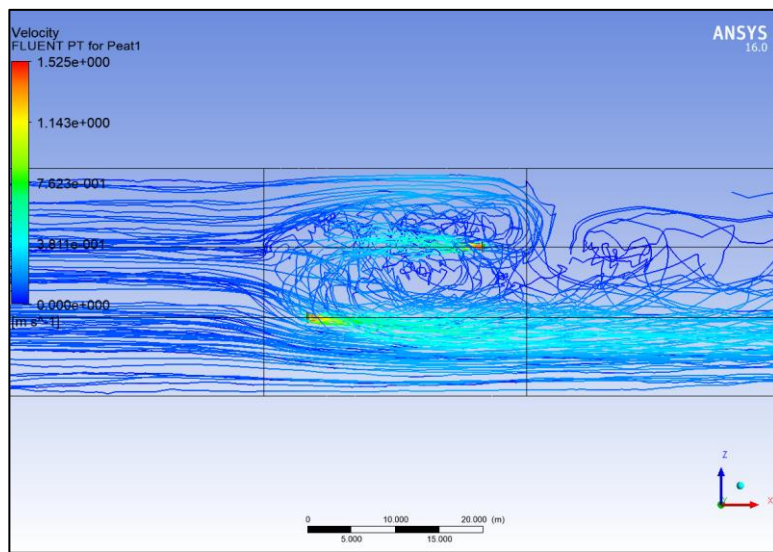


Ilustración 6-21. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 5, agitador  $\phi=1.2$  m

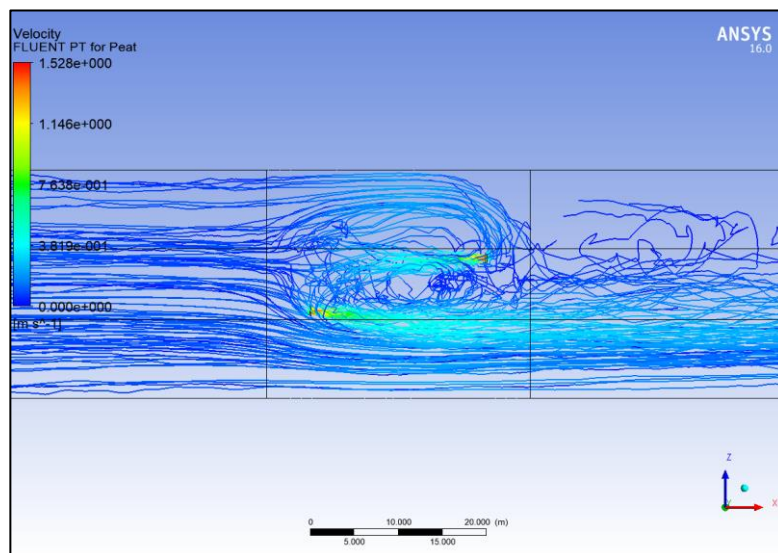


Ilustración 6-22. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 6, agitador  $\phi=1.2$  m

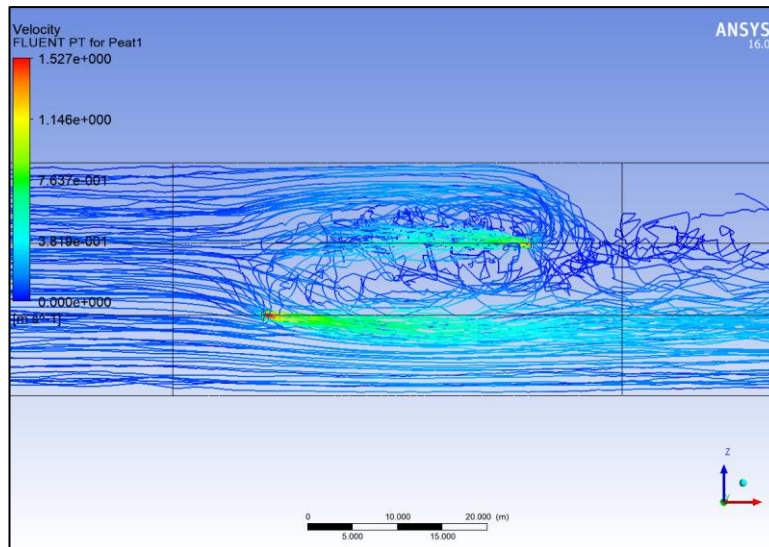


Ilustración 6-23. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 7, agitador  $\phi=1.2$  m

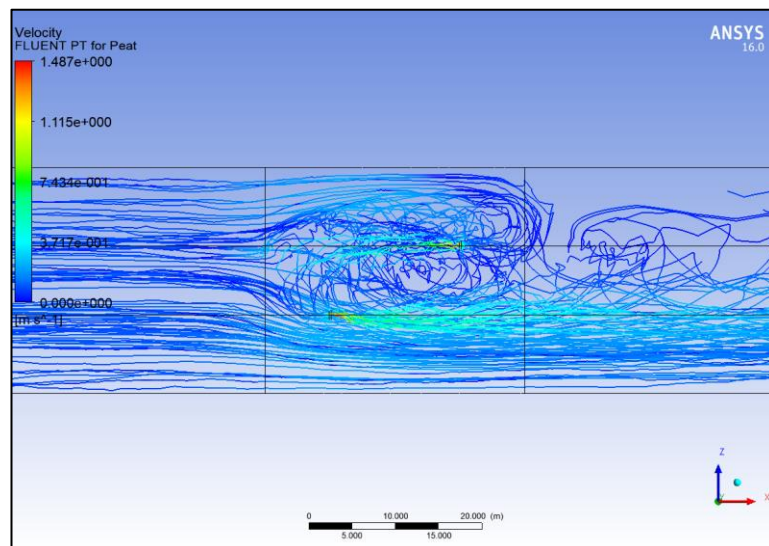


Ilustración 6-24. Trayectoria partículas 1 y 2, prueba 8, agitador  $\phi=1.2$  m

La efectividad de cada una de las pruebas realizadas se ha llevado a cabo mediante un balance entre las partículas que entran a la zona entre agitadores y las que salen. De esta forma, se considerará más efectiva aquella prueba en la que más partículas terminen su trayectoria entre los agitadores.

$$Efectividad = \frac{\text{Partículas que entran} - \text{Partículas que salen}}{\text{Partículas que entran}} \quad (6-3)$$

Siendo la zona de agitación el volumen de control del que entran y salen las partículas.



Tabla 6-5. Cálculo de la efectividad de los agitadores probados

Diámetro (m)	Prueba	Total partículas	Entrada	Salida	Efectividad
No agit	0	2270	2270	2270	0
1.2	1	2460	2460	1673	0.32
1.2	2	2460	2460	1082	0.56
1.2	3	2270	2270	1907	0.16
1.2	4	2270	2270	1725	0.24
1.2	5	2270	2270	1634	0.28
1.2	6	2270	2270	1544	0.32
1.2	7	2236	2236	1431	0.36
1.2	8	2270	2270	1634	0.28
0.9	1	2270	2270	1998	0.12

Puede observarse de la tabla anterior que la prueba más efectiva es la prueba 2 del agitador de 1.2 metros, lo cual es fácilmente apreciable en las ilustraciones mostradas.

Para el agitador de diámetro 0.9 metros no se ha calculado ningún rendimiento además del de la prueba 1, ya que durante la realización de las pruebas se apreciaba su poca efectividad.

Para comprobar la modificación del rendimiento del agitador de 1.2 metros en función de la variación de la posición se han realizado algunas pruebas más además de las mostradas. Un resumen de dichas pruebas y las anteriores se muestra en las tablas siguientes, donde X es la separación longitudinal, Y la separación del lecho y Z la separación transversal.

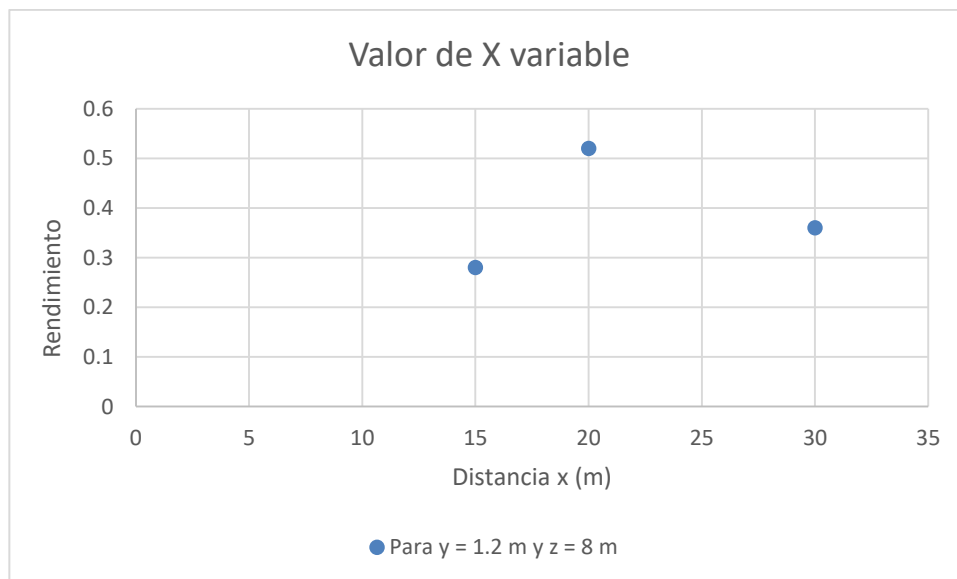


Ilustración 6-25. Rendimiento en función de la separación longitudinal

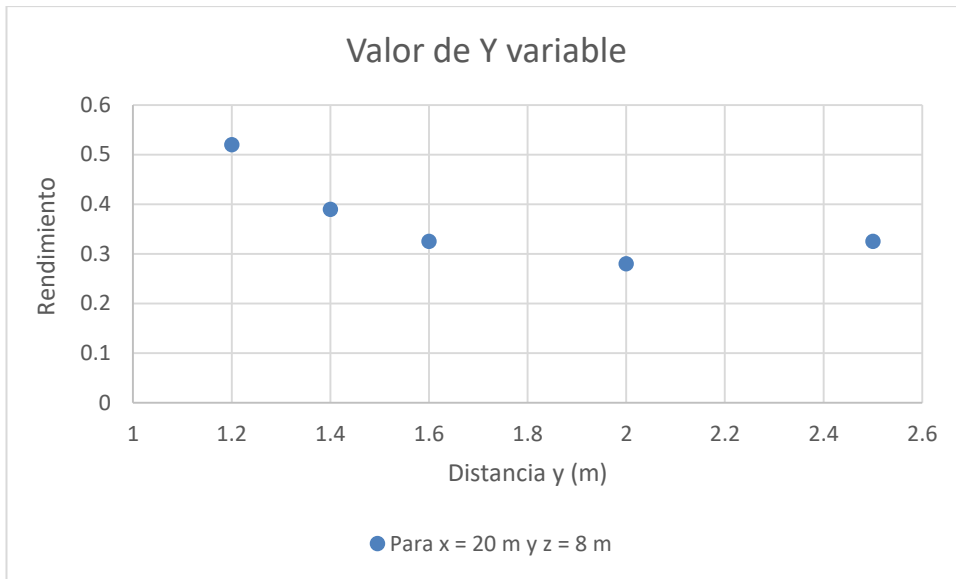


Ilustración 6-26. Rendimiento en función de la separación respecto al lecho

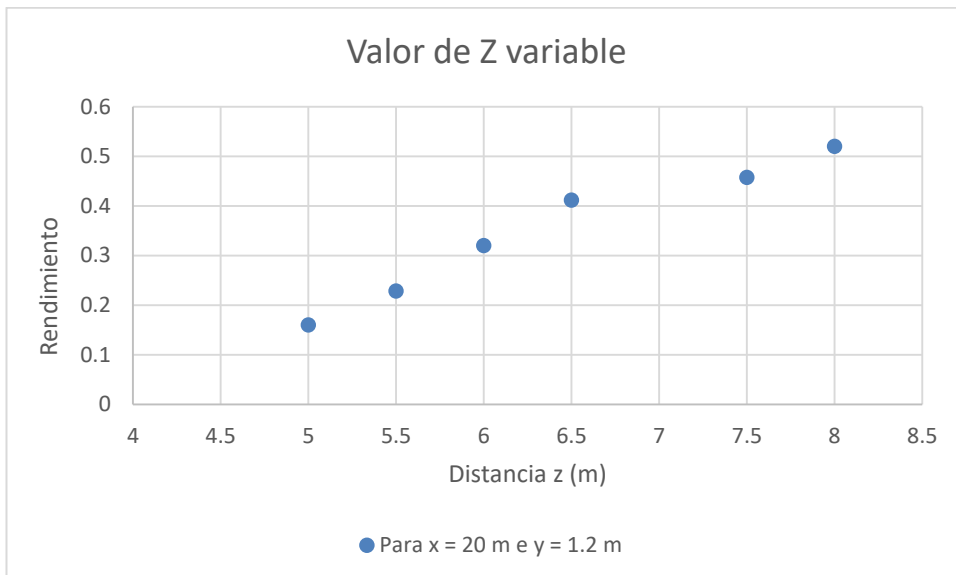


Ilustración 6-27. Rendimiento en función de la separación transversal

Tras la realización de estas pruebas se concluye que una buena localización de los dispositivos aceleradores de corriente puede ser la de una separación longitudinal de unos 20 metros, una separación transversal de 8 metros y una localización vertical igual a su diámetro, teniendo en cuenta que se ha considerado como efectivo el agitador de 1.2 metros de diámetro.

Para comprender lo que ocurre en la zona entre los agitadores, se va a hacer uso de la representación del contorno de la velocidad absoluta en distintos planos paralelos al lecho. Estas velocidades se corresponden con la simulación que se ha considerado como más efectiva.

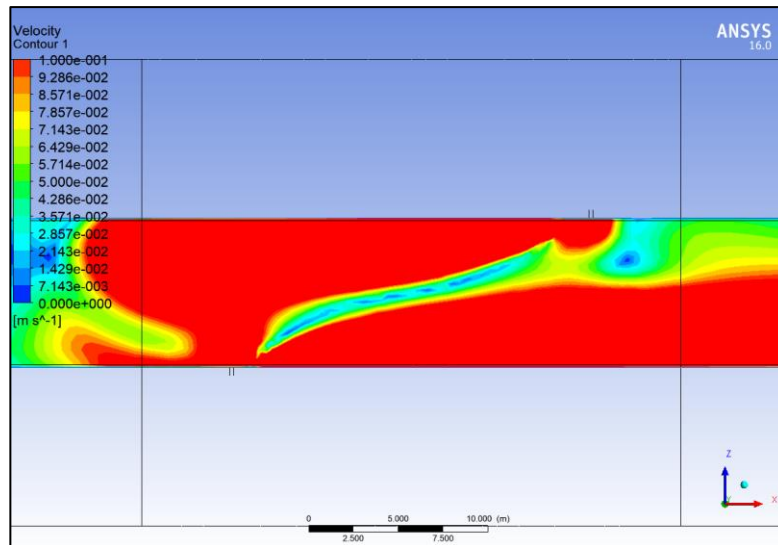


Ilustración 6-28. Contorno de velocidades en plano  $y = 0.1$  metros

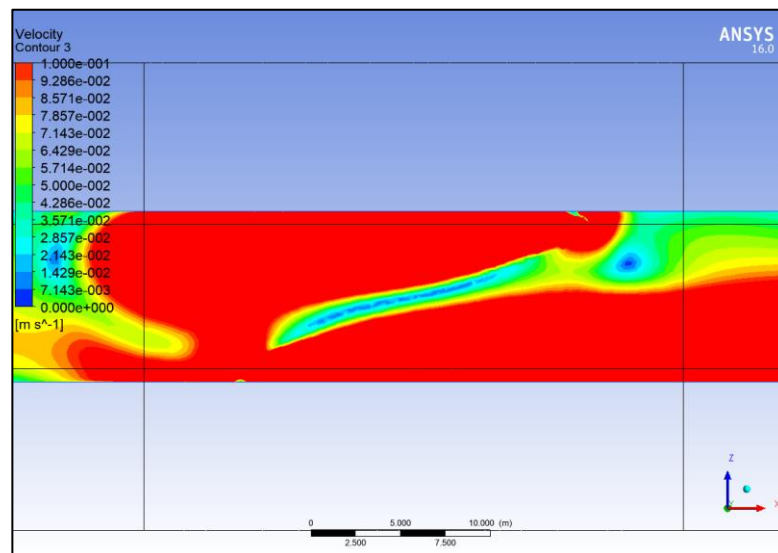


Ilustración 6-29. Contorno de velocidades en plano  $y = 0.5$  metros

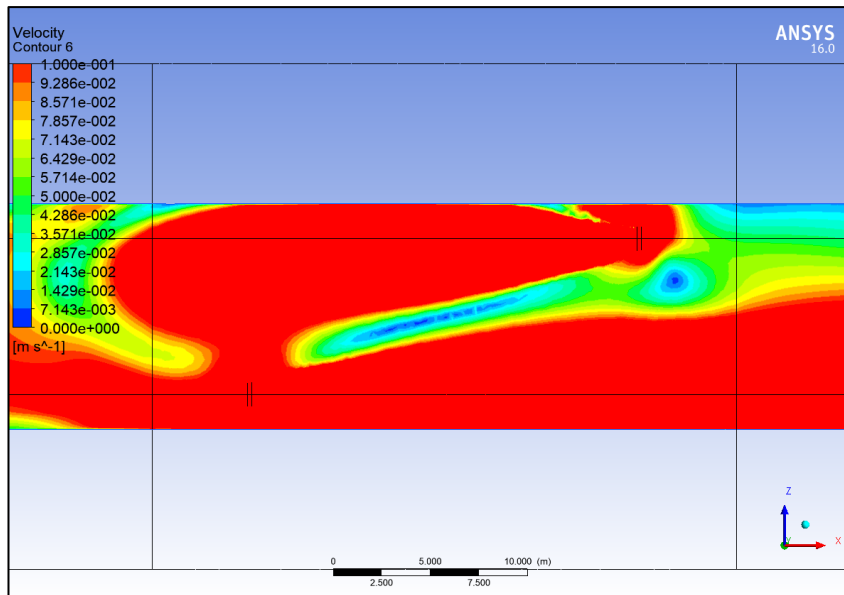


Ilustración 6-30. Contorno de velocidades en plano  $y = 1.2$  metros

En las ilustraciones anteriores se observa la generación de zonas favorables a la decantación de partículas en las zonas internas entre los dos agitadores donde el valor de la velocidad es muy próximo a cero. Estas zonas favorables para la sedimentación son consecuencia de la recirculación generada por los agitadores, la cual produce zonas de baja velocidad en el centro de dicha recirculación.

Otro aspecto que se visualiza en estas imágenes de contorno de velocidades es que tras la zona de agitación, buena parte del canal se mantiene con una velocidad menor a la velocidad de entrada de partículas, por lo que las partículas que logren superar la zona de agitación se mantendrán en el lado del canal con mayor velocidad.

A modo de comparación, se incluye a continuación el contorno de velocidades para la prueba 3 del mismo agitador, la cual se diferencia de la elegida en que los agitadores se separan transversalmente 5 metros en lugar de 8.

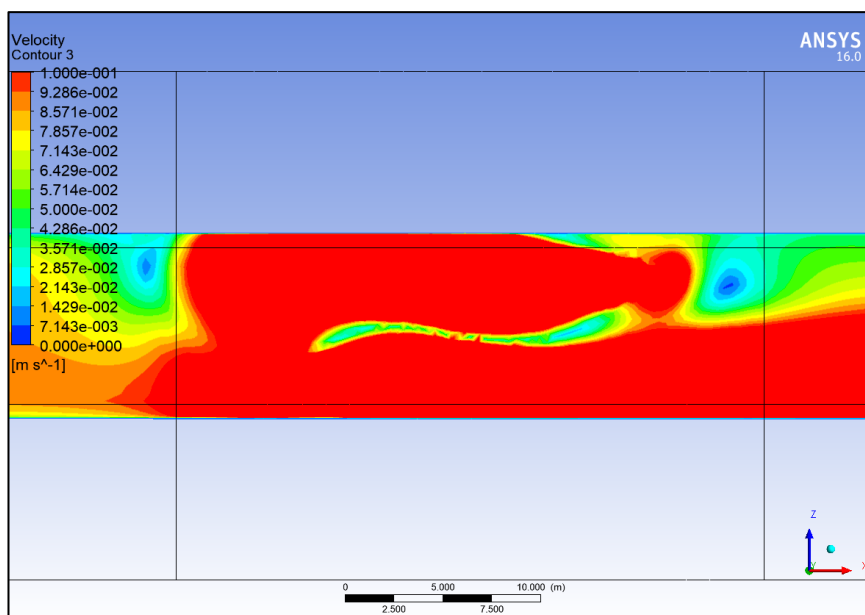


Ilustración 6-31. Contorno de velocidades en el plano  $y = 0.5$  metros

Se puede observar en la ilustración anterior que no son tan claras las zonas favorables de sedimentación como

en el caso óptimo elegido, lo cual se traduce en una efectividad menor. No se alcanzan velocidades tan bajas, lo cual permite que un mayor número de partículas salgan de la zona de agitación.

## 6.2.2. Pruebas en canal completo

De las simulaciones expuestas en el apartado anterior se puede concluir que la más efectiva en cuanto a recirculación de partículas está entre la prueba 1 y prueba 2 para el diámetro de 1.2 metros.

Para la simulación del canal completo se ha considerado la ubicación especificada en la prueba 2.

### 6.2.2.1. Modelo lagrangiano

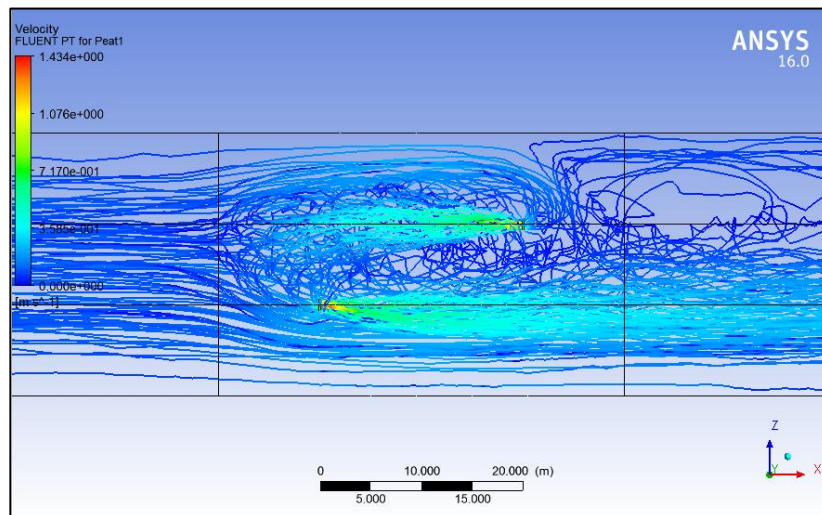


Ilustración 6-32. Trayectoria partículas en canal completo

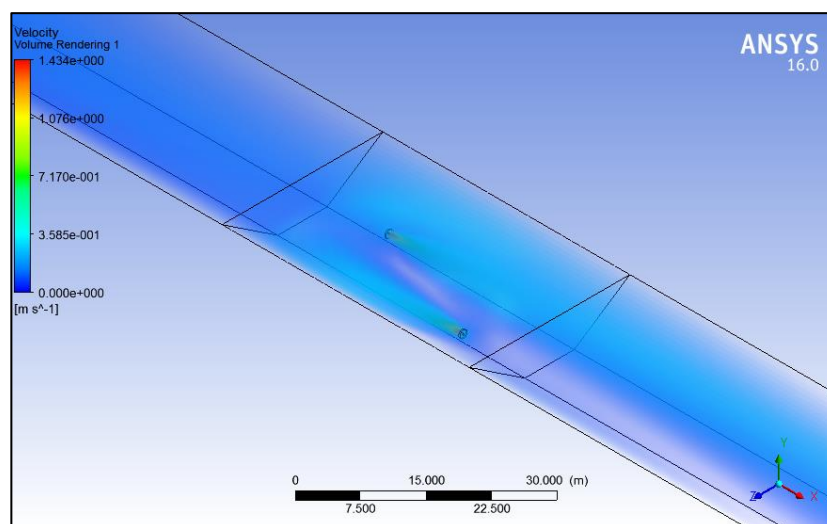


Ilustración 6-33. Velocidad generada por agitadores

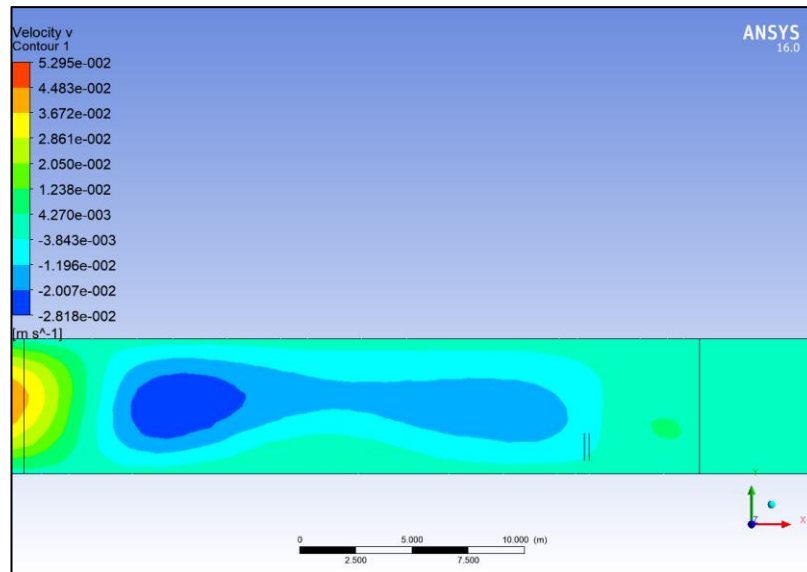


Ilustración 6-34. Velocidad según eje y en plano  $z = 0$

En la Ilustración 6-34, puede observarse la velocidad de sedimentación en la zona entre agitadores. La velocidad es negativa, puesto que las partículas sedimentan en sentido negativo del eje  $y$  y es mayor que en el resto del canal.

Esta última imagen es fundamental en el estudio, puesto que muestra el objetivo inicial que se perseguía con el uso de los agitadores, favorecer la zona de sedimentación entre los agitadores.

### 6.2.2.2. UDF

Se muestra a continuación el resultado para la concentración que se ha obtenido mediante el uso de la UDF.

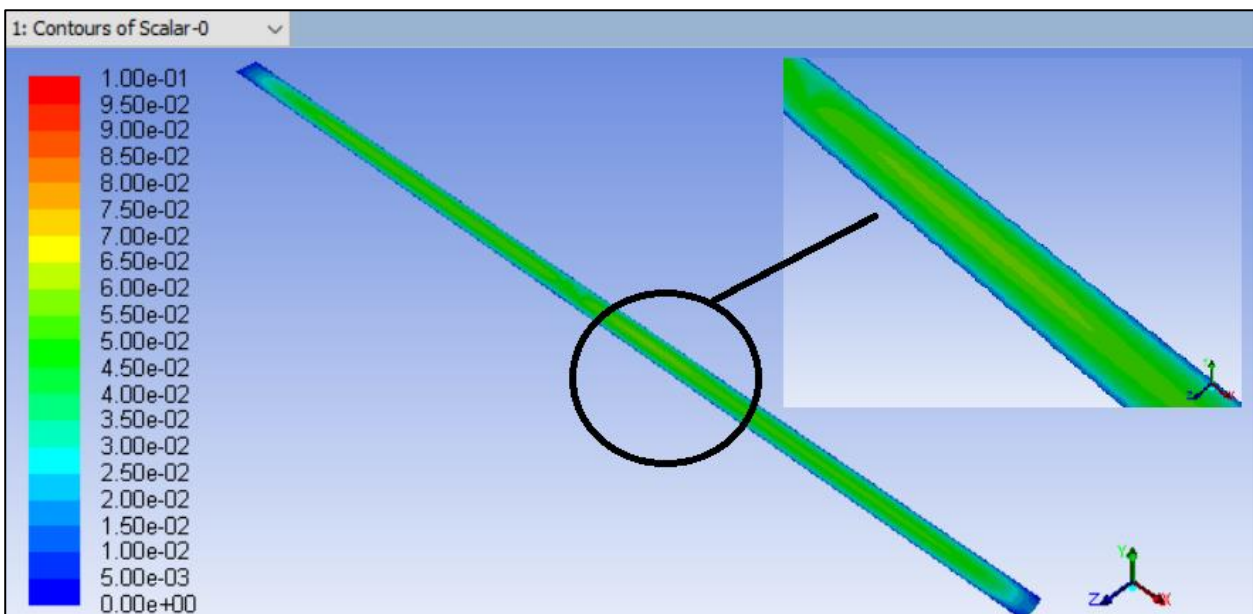


Ilustración 6-35. Concentración de sólidos en canal completo con agitadores

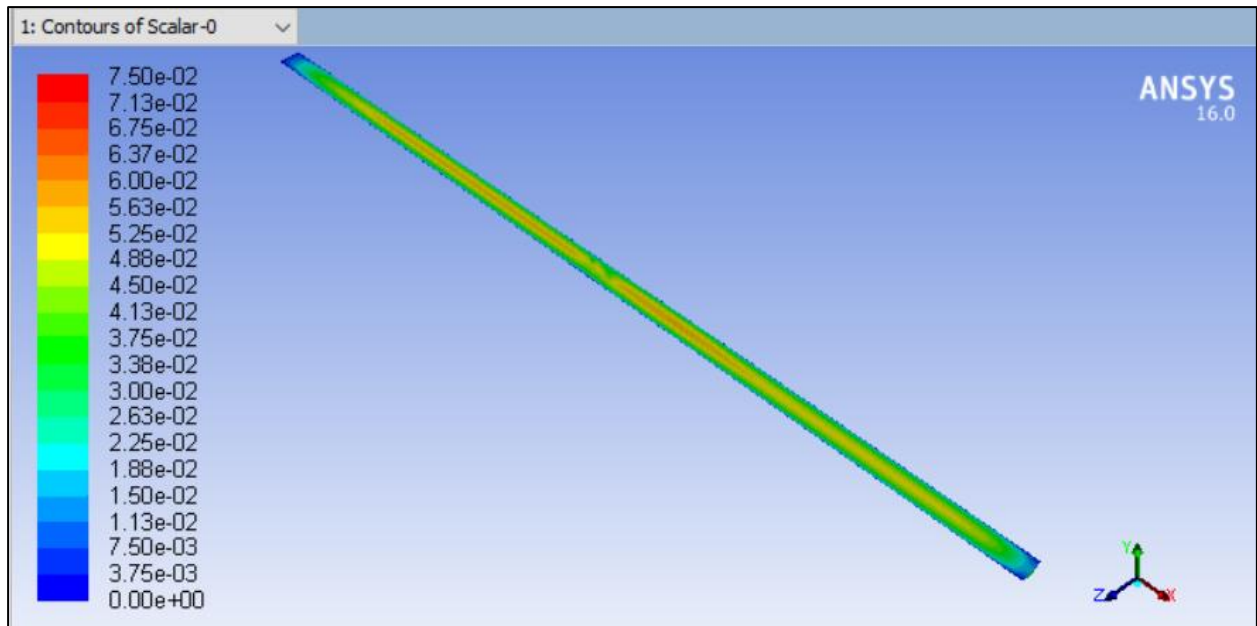


Ilustración 6-36. Concentración de sólidos en canal completo con agitadores (distinta escala)

En la Ilustración 6-35 e Ilustración 6-36, puede comprobarse el notorio efecto que tiene el empleo de los agitadores usados sobre la concentración del canal. Al igual que en la simulación de la UDF sin agitadores, la concentración aumenta a lo largo del canal, pero en este caso se observa cómo la concentración aumenta justamente en la zona entre los dispositivos.

### 6.2.3. Simulaciones con la avenida atenuándose

Todos los resultados anteriormente mostrados se han realizado para un caudal de avenida de 10 m<sup>3</sup>/s. Se ha decidido comprobar si los agitadores serían efectivos aún con caudales inferiores al punta.

Para ello, sin variar la fracción volumétrica, se ha realizado la simulación lagrangiana para un caudal de 6 m<sup>3</sup>/s y para 3 m<sup>3</sup>/s, variando únicamente la condición de contorno de entrada del canal.

- Q = 6 m<sup>3</sup>/s

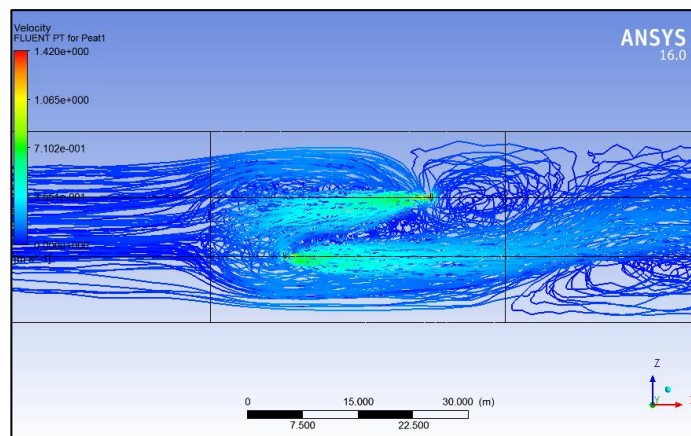


Ilustración 6-37. Trayectoria de las partículas para Q=6 m<sup>3</sup>/s



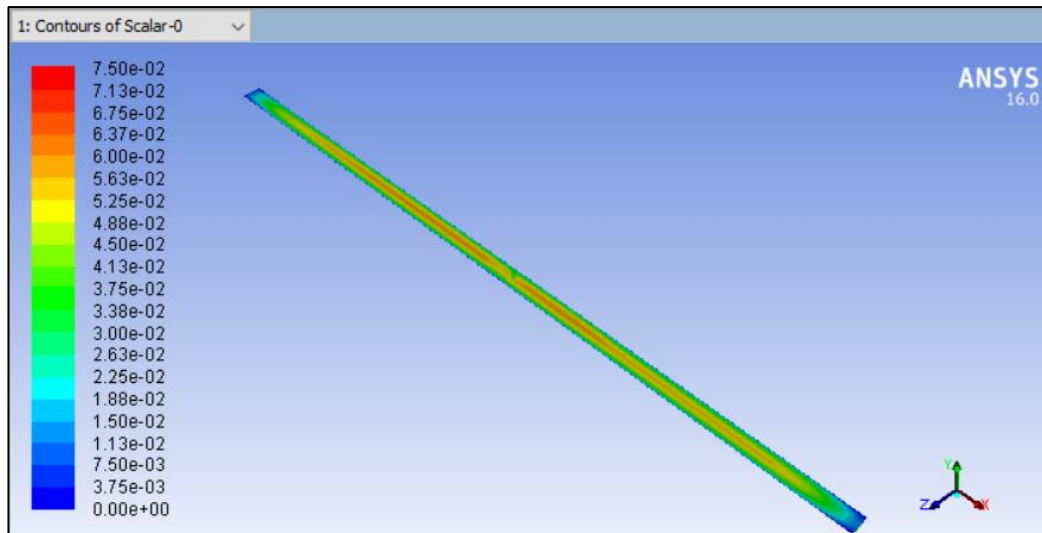


Ilustración 6-38. Simulación mediante UDF para  $Q = 6 \text{ m}^3/\text{s}$

-  $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$

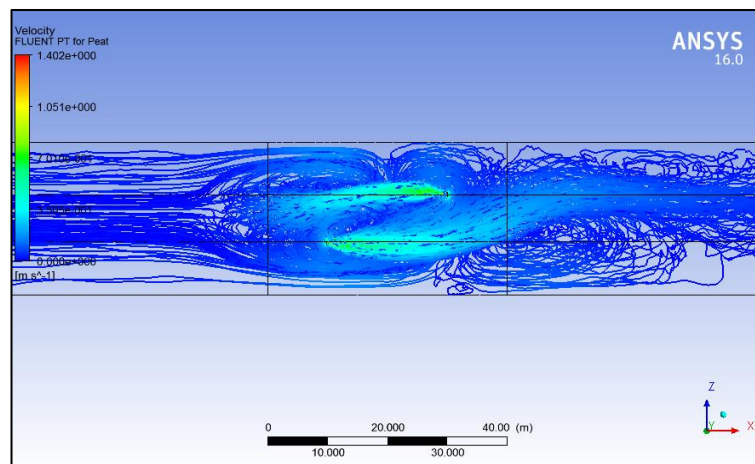


Ilustración 6-39. Trayectoria de las partículas para  $Q=3 \text{ m}^3/\text{s}$

### 6.3. Implementación mediante el uso de toberas

Una vez realizadas todas las simulaciones mostradas, y alguna más en la que no se han obtenido los resultados esperados, se ha propuesto si es posible la mejora de los resultados mediante el uso de toberas.

Las toberas son chapas metálicas que se colocan alrededor del agitador, buscando una mejora de la recirculación de partículas.

Esta implementación se ha estudiado haciendo uso del modelo lagrangiano, concretamente para el agitador de diámetro 0.9 metros, del que no se obtuvieron buenos resultados en las pruebas anteriores. Es decir, se ha buscado si es posible una mejora de los resultados obtenidos para un tipo de agitador que ha parecido ser menos efectivo.



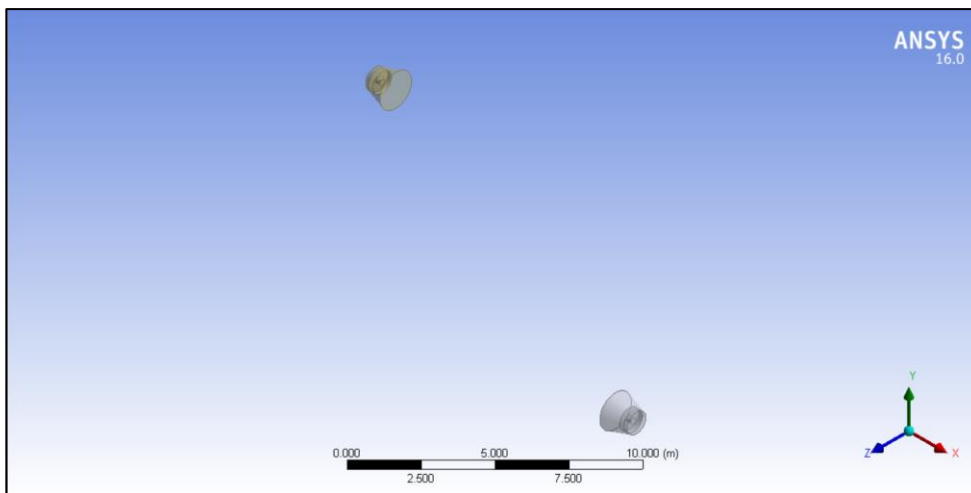


Ilustración 6-40. Geometría de las toberas

En la Ilustración 6-40 puede visualizarse la geometría de las toberas. Éstas en concreto tienen la base menor de 0.9 metros, la mayor de 1.5 metros y una longitud de 1 metro. Esto se traduce en un ángulo de apertura o de divergencia de 16.7°.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en esta simulación.

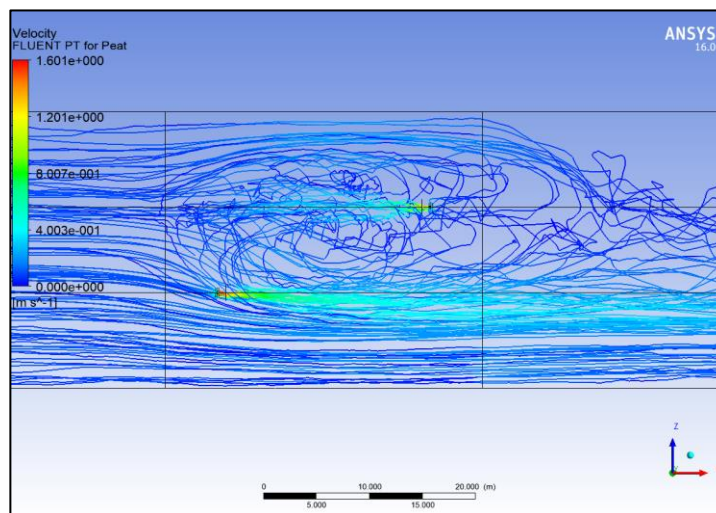


Ilustración 6-41. Trayectoria partículas 1 y 2 con uso de toberas

Esta última imagen hay que compararla con la Ilustración 6-16, puesto que se corresponde con las mismas características de agitador y de ubicación.

Tabla 6-6. Rendimiento agitador con tobera

<b>Díámetro (m)</b>	<b>Prueba</b>	<b>Total partículas</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>	<b>Rendimiento</b>
0.9	1	2270	2270	1998	0.12
0.9	Tobera	1640	1640	1246	0.24

## 7. CONCLUSIONES

Al igual que en cualquier estudio de investigación, una vez mostrados los resultados, es necesario plantear las conclusiones que se han obtenido, así como su correspondencia con lo esperado al inicio de las pruebas.

En primer lugar, comentar que, los agitadores siguen mostrándose eficaces en el objetivo de reducir la concentración de llegada a las cántaras y concentrando las partículas entre ellos, a pesar de haberlos simulado con otras condiciones distintas a las del estudio anterior. Aunque se hayan realizado varias hipótesis sobre la curva característica, el punto de funcionamiento de los dispositivos que se han decidido utilizar en las simulaciones se encuentra dentro del tramo de curva elegido, ya que, el programa de cálculo no ha mostrado ningún aviso sobre que se están empleando los valores que se han establecido como límites, como sí ha ocurrido con otros agitadores probados durante el estudio. Este es el motivo por lo que se establecieron límites de funcionamiento al especificar las características de los agitadores en Ansys Fluent, para así controlar que las condiciones del problema se encuentran dentro del rango de funcionamiento establecido. Esto puede traducirse en que los agitadores disponibles en mercado son efectivos para la solución del problema, sin necesidad de usar los de mayor potencia, lo cual generaría un mayor consumo energético.

En cuanto al tipo de agitador, se puede establecer el de 1.2 metros de diámetro como efectivo siempre que se coloque con una distancia longitudinal entre ellos próxima a los 20 metros, de tal forma que se permita a las partículas depositarse entre ellos; una altura de colocación próxima a su diámetro; y una separación transversal de unos 8 metros, para que se pueda generar la recirculación de partículas adecuada. Se puede comprobar en las figuras correspondientes a las simulaciones (Ilustración 6-16 - Ilustración 6-24) y en el cálculo de las eficiencias que no todas las ubicaciones generan los mismos resultados.

De este posicionamiento hay que observar que la distancia a la que son efectivos los agitadores es mayor que la distancia que se expuso anteriormente como recomendada por los fabricantes. Incluso colocándolos con una distancia entre ellos de 30 metros siguen siendo efectivos. Si la distancia es menor de 20 metros, como por ejemplo los 15 metros probados, algunas partículas salen debilitadas de la zona de agitación depositándose después de los agitadores, y no entre ellos.

En las simulaciones realizadas para caudales inferiores se observa una recirculación distinta a la generada en la de 10 m<sup>3</sup>/s. Pueden visualizarse que la concentración en la prueba UDF realizada aumenta en la zona previa a los agitadores. Esto se debe a que para caudales inferiores al punta las partículas se depositan a lo largo del canal, antes de llegar a la zona de las cántaras. En este caso no se han calculado eficiencias, puesto que el volumen de control sería distinto al de las demás simulaciones debido a que las partículas se depositan en zonas distintas.

El último tipo de simulaciones llevadas a cabo se han realizado haciendo uso de toberas, buscando si puede aumentarse el rendimiento de los agitadores. Comparando los resultados de la Ilustración 6-16 y la Ilustración 6-41, puede concluirse que sí mejoran el comportamiento, sin embargo, habría que estudiar su efecto con otro tipo de agitadores. En este caso, se han probado distintos ángulos de divergencia de la tobera, habiendo resultado el mostrado como efectivo, concretamente se obtiene una efectividad del doble, según lo mostrado en la Tabla 6-6.

Por último, hay que tener en cuenta que el empleo de esta solución para la mejora de la operatividad del canal conlleva también un plan de retirada de partículas depositadas en la zona entre los agitadores. Lo cual reduce el plan de actuación sobre el canal a los 20 metros entre los dispositivos y a parte de la zona previa a esta, ya que como se ha observado en la simulación mediante la UDF, se produce también un aumento de la concentración en los metros previos a la zona de agitación.

Como conclusión final, y habiendo llegado a un agitador comercial como efectivo, se podrían considerar las siguientes ideas para futuros trabajos enfocados en esta línea de investigación:

- En primer lugar, los modelos empleados no tienen en cuenta el transporte de fondo, por lo que podría ser interesante modelar este comportamiento del transporte de sedimentos para ver qué tipo de comportamiento tienen ante el uso de agitadores.

- Aunque en las simulaciones llevadas a cabo se ha llegado a un ángulo de divergencia efectivo, también sería interesante realizar un mayor número de pruebas haciendo uso de toberas, puesto que se ha comprobado que mejoran la eficacia en la resolución del problema, pero no cómo varía en función del ángulo de apertura. Las pruebas aquí realizadas con toberas buscaban comprobar si mejoraba la eficiencia de un agitador poco efectivo sin ellas. Sería interesante comprobar su efecto en simulaciones en las que el agitador sin tobera muestre una eficiencia mayor.
- El mercado de agitadores es muy amplio, habiendo considerado en este estudio fundamentalmente dos tipos de ellos, debido a las limitaciones del coste computacional que supone cada una de las pruebas realizadas.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] NAVARRO ORTIZ, E., *Estudio de soluciones frente a la decantación de lodos en las instalaciones de bombeo y turbinado en el curso medio y bajo del Guadalquivir*, Universidad de Sevilla, 2016.
- [2] GRAF, W. H., *Fluvial hydraulics: flow and transport processes in channels of simple geometry*, Chichester, 1998.
- [3] MARTÍN VIDE, J. P., *Ingeniería de ríos*, Barcelona, 2006.
- [4] MEYER, R. E., *Introduction to mathematical fluid dynamics*, Nueva York: Dover, 1982.
- [5] DÁVILA MARTÍN, J., *Apuntes sobre dinámica de pequeñas partículas en flujos no uniformes*, Universidad de Sevilla, 2017.
- [6] FERNÁNDEZ MORALES, A., *Apuntes sobre modelo de transporte de sedimento*, Universidad de Sevilla, 2017.
- [7] MORENO AREVALOS, V.M., *Optimización de la succión de sólidos sumergidos utilizando bombas centrífugas con velocidad variable*, Universidad Politécnica de Madrid, 2012.
- [8] CHAMORRO SOSA, G., *Apuntes de curso de Obras Marítimas*, Universidad de Sevilla, 2015.
- [9] Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA). Junta de Andalucía: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía [consulta: 27 mayo 2017]. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- [10] Agitadores sumergibles Sulzer. Sulzer: agitadores sumergibles [consulta: 26 abril 2017]. Disponible en: <http://www.sulzer.com/es/Products-and-Services/Agitators-Dynamic-and-Submersible-Mixers/Submersible-Mixers>
- [11] Agitadores sumergibles Wilo. Wilo: agitadores sumergibles [consulta: 26 abril 2017]. Disponible en: <http://www.sdm-sistemas.com/es/agitar/agitadores-sumergibles>
- [12] Agitadores sumergibles Flygt. Flygt: agitadores sumergibles [consulta: 26 abril 2017]. Disponible en: <http://www.xylemwatersolutions.com/scs/spain/es-es/prensa/Eventos/Eficienciaenergetica/Documents/AGITADORES%20SUMERGIBLES.pdf>
- [13] Red Saica Guadalquivir. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir [consulta: 27 abril 2017]. Disponible en: <http://www.chguadalquivir.es/calidad-de-las-aguas>
- [14] ANSYS Inc, *Fluent 15.0 Theory Guide*, U.S.A., 2013.
- [15] ANSYS Inc, *Fluent 15.0 Users Guide*, U.S.A., 2013.
- [16] ANSYS Inc, *Fluent 15.0 UDF Manual*, U.S.A., 2013.
- [17] Roughness length. Wikipedia: roughness length [consulta: 6 mayo 2017]. Disponible en: [https://en.wikipedia.org/wiki/Roughness\\_length](https://en.wikipedia.org/wiki/Roughness_length)
- [18] Embalse del Arenoso. Datos de embalses [consulta: 1 mayo 2017]
- [19] Modelos de viscosidad del agua en función de la concentración [consulta: 8 mayo 2017]. Disponible en: <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/553/c5.pdf;jsessionid=C85F8F3A84DFD267AB0FB475AC774065?sequence=4>
- [20] Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, *Estudio de la Evolución de la turbidez en el*

*Guadalquivir a través de las estaciones SAICA desde 2007 hasta 2012, 2012.*

[21] Bombas centrífugas. Aplicación, sistemas, principios fundamentales y selección. Monografías. [consulta: 4 mayo 2017] . Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos36/bombas-centrifugas/bombas-centrifugas2.shtml>

[22] KESSLER, M. *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es?*. [consulta: 1 agosto 2017]. Disponible en: <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>

# ANEXO I. MODELO DE CURVA H-Q

---

cell zone id

18 !CELL\_ID

Pressure(Pa) Flowrate(m3/s)

1236.299 0.758

1218.034 0.838

1197.943 0.918

1176.025 0.998

1152.281 1.078

1126.710 1.157

1099.313 1.237

1070.089 1.317

1039.039 1.397

1006.162 1.477

971.459 1.557

934.930 1.636

896.574 1.716

856.391 1.796

814.382 1.876

770.546 1.956

724.884 2.035

677.396 2.115

628.081 2.195

576.940 2.275

## ANEXO II. MODELO UDF

```

#include "udf.h"
/*Hay que definir UDS para la concentración [kg sedimento/kg agua] */
/*Se van a guardar algunos términos creados en memoria mediante UDM*/
/* Se definen las constantes: G ( m/s2), wj (m/s), gs (t/m3), d50 (mm)*/
/* En función de la injection que estemos considerando, hay que cambiar wj y ps */
#define G 9.81
#define wj 0.000307
#define gs 1.70
#define d50 0.03

/*Fuente para la ecuación de sedimento*/
DEFINE_SOURCE(C_source,c,t,ds,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;
    C_CENTROID(x,c,t);
    source = C_R(c,t)*wj*C_UDSI_G(c,t,0)[1];
    ds[eqn] = 0;
    C_UDMI(c,t,0) = C_R(c,t)*wj*C_UDSI_G(c,t,0)[1];
    return source;
}

/*Fuente para la ecuación del momento en y*/
DEFINE_SOURCE(Ymon_source,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;
    C_CENTROID(x,c,t);
    source = -(gs-1.00)*C_R(c,t)*G*C_UDSI(c,t,0);
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c,t,1) = -(gs-1.00)*C_R(c,t)*G*C_UDSI(c,t,0);
    return source;
}

```

```

/*Fuente de la energía cinética turbulenta (k)*/
DEFINE_SOURCE(k_source,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;
    C_CENTROID(x,c,t);
    source = (gs-1.0)*(C_MU_T(c,t)/1.0)*G*C_UDSI_G(c,t,0)[1];
    dS[eqn] = 0;
    C_UDMI(c,t,2) = (gs-1.0)*(C_MU_T(c,t)/1.0)*G*C_UDSI_G(c,t,0)[1];
    return source;
}

/*Fuente para la ecuación de la tasa de disipación (epsilon)*/
DEFINE_SOURCE(epsilon_source,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    real source;
    real k1;
    real k2;
    real k3;
    real C3eps;
    C_CENTROID(x,c,t);
    k1 = (gs-1.0)*(C_MU_T(c,t)/1.0)*G*C_UDSI_G(c,t,0)[1];
    k2 = (C_V(c,t)*C_V(c,t))/(C_U(c,t)*C_U(c,t)+C_W(c,t)*C_W(c,t)+0.00001);
    k3 = pow(k2,0.5);
    C3eps = tanh(k3);
    source = C3eps*k1;
    dS[eqn]=0;
    C_UDMI(c,t,3) = C3eps*k1;
    return source;
}

/*Difusividad*/
DEFINE_DIFFUSIVITY(Cdiff,c,t,i)
{
    real mu_t = C_MU_T(c,t);

```



```

real sigma_t = 1;
return mu_t / sigma_t;
}

/*Viscosidad*/
DEFINE_PROPERTY(viscosidad_concentracion,c,t)
{
real mu_r;
real mu_1;
real mu_2;
real mu_3;
real conc;
conc = C_UDSI(c,t,0);
mu_1 = 0.001;
mu_2 = 0.00404527222+0.00304527222*(conc-0.70)/0.69;
mu_3 = 0.00327*pow(10.0,0.132*conc);
if (conc<=0.01)
mu_r = mu_1;
else
if (conc<=0.70)
mu_r = mu_2;
else
mu_r = mu_3;
C_UDMI(c,t,4) = mu_r;
return mu_r;
}

/*Cálculo del cortante*/
DEFINE_ADJUST(wall_shear_calc_fondo_inicio,dom)
{
Domain *domain = Get_Domain(1);
Thread *ft, *ct;
face_t f;
cell_t c;
real ts_force[ND_ND];
real area[ND_ND];
real tau;

```

```

int wall_id=33;
ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
begin_f_loop(f,ft)
{
  c=F_C0(f,ft);
  ct=THREAD_T0(ft);
  F_AREA(area,f,ft);
  N3V_V(ts_force,=,F_STORAGE_R_N3V(f,ft,SV_WALL_SHEAR));
  tau=NV_MAG(ts_force)/NV_MAG(area);
  C_UDMI(c,ct,5)=tau;
}
end_f_loop(f,ft);
}

```

/\*Perfil de concentracion de sedimento sobre el lecho (condición de contorno)\*/

```

DEFINE_PROFILE(perfil_conc_lecho_fondo_inicio,thread,position)
{
  Domain *domain = Get_Domain(1);
  Thread *ft, *ct;
  face_t f;
  cell_t c;
  real tension_shields;
  real tau_bed;
  real k4;
  real v_corte;
  real Re_granular;
  real mu;
  int wall_id = 33;
  ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
  begin_f_loop(f,ft)
  {
    c = F_C0(f,ft);
    ct = THREAD_T0(ft);
    tau_bed = C_UDMI(c,ct,5);
    tension_shields = tau_bed/(G*(gs-1.0)*d50); /*0.01 = 1000 (densidad agua)*0.00001m (d50)*/
    C_UDMI(c,ct,6) = tension_shields;
    k4 = tau_bed/1000;
    mu = C_UDMI(c,ct,4);
  }
}

```

```

v_corte = pow(k4,0.5);
Re_granular = v_corte*d50/mu;
C_UDMI(c,ct,7) = Re_granular;
if (tension_shields < 0.25)
  F_PROFILE(f,thread,position) = 0.0;
else if (tension_shields < 0.75)
  F_PROFILE(f,thread,position) = 0.60*(tension_shields-0.25);
else
  F_PROFILE(f,thread,position) = 0.30;
}
end_f_loop(f,t)
}

/*Cálculo del cortante*/
DEFINE_ADJUST(wall_shear_calc_fondo_centro,dom)
{
  Domain *domain = Get_Domain(1);
  Thread *ft, *ct;
  face_t f;
  cell_t c;
  real ts_force[ND_ND];
  real area[ND_ND];
  real tau;
  int wall_id=35;
  ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
  begin_f_loop(f,ft)
  {
    c=F_C0(f,ft);
    ct=THREAD_T0(ft);
    F_AREA(area,f,ft);
    N3V_V(ts_force,=,F_STORAGE_R_N3V(f,ft,SV_WALL_SHEAR));
    tau=N3V_MAG(ts_force)/N3V_MAG(area);
    C_UDMI(c,ct,8)=tau;
  }
  end_f_loop(f,ft);
}

```

```

/*Perfil de concentracion de sedimento sobre el lecho (condición de contorno)*/
DEFINE_PROFILE(perfil_conc_lecho_fondo_centro,thread,position)
{
    Domain *domain = Get_Domain(1);
    Thread *ft, *ct;
    face_t f;
    cell_t c;
    real tension_shields;
    real tau_bed;
    real k4;
    real v_corte;
    real Re_granular;
    real mu;
    int wall_id = 35;
    ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
    begin_f_loop(f,ft)
    {
        c = F_C0(f,ft);
        ct = THREAD_T0(ft);
        tau_bed = C_UDMI(c,ct,8);
        tension_shields = tau_bed/(G*(gs-1.0)*d50); /*0.01 = 1000 (densidad agua)*0.00001m (d50)*/
        C_UDMI(c,ct,9) = tension_shields;
        k4 = tau_bed/1000;
        mu = C_UDMI(c,ct,4);
        v_corte = pow(k4,0.5);
        Re_granular = v_corte*d50/mu;
        C_UDMI(c,ct,10) = Re_granular;
        if (tension_shields < 0.25)
            F_PROFILE(f,thread,position) = 0.0;
        else if (tension_shields < 0.75)
            F_PROFILE(f,thread,position) = 0.60*(tension_shields-0.25);
        else
            F_PROFILE(f,thread,position) = 0.30;
    }
    end_f_loop(f,t)
}

/*Cálculo del cortante*/

```

```

DEFINE_ADJUST(wall_shear_calc_final_1,dom)
{
  Domain *domain = Get_Domain(1);
  Thread *ft, *ct;
  face_t f;
  cell_t c;
  real ts_force[ND_ND];
  real area[ND_ND];
  real tau;
  int wall_id=32;
  ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
  begin_f_loop(f,ft)
  {
    c=F_C0(f,ft);
    ct=THREAD_T0(ft);
    F_AREA(area,f,ft);
    N3V_V(ts_force,=,F_STORAGE_R_N3V(f,ft,SV_WALL_SHEAR));
    tau=NVMAG(ts_force)/NVMAG(area);
    C_UDMI(c,ct,11)=tau;
  }
  end_f_loop(f,ft);
}

/*Perfil de concentracion de sedimento sobre el lecho (condición de contorno)*/
DEFINE_PROFILE(perfil_conc_lecho_final_1,thread,position)
{
  Domain *domain = Get_Domain(1);
  Thread *ft, *ct;
  face_t f;
  cell_t c;
  real tension_shields;
  real tau_bed;
  real k4;
  real v_corte;
  real Re_granular;
  real mu;
  int wall_id = 32;

```

```

ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
begin_f_loop(f,ft)
{
  c = F_C0(f,ft);
  ct = THREAD_T0(ft);
  tau_bed = C_UDMI(c,ct,11);
  tension_shields = tau_bed/(G*(gs-1.0)*d50); /*0.01 = 1000 (densidad agua)*0.00001m (d50)*/
  C_UDMI(c,ct,12) = tension_shields;
  k4 = tau_bed/1000;
  mu = C_UDMI(c,ct,4);
  v_corte = pow(k4,0.5);
  Re_granular = v_corte*d50/mu;
  C_UDMI(c,ct,13) = Re_granular;
  if (tension_shields < 0.25)
    F_PROFILE(f,thread,position) = 0.0;
  else if (tension_shields < 0.75)
    F_PROFILE(f,thread,position) = 0.60*(tension_shields-0.25);
  else
    F_PROFILE(f,thread,position) = 0.30;
}
end_f_loop(f,t)
}

```

/\*Cálculo del cortante\*/

```

DEFINE_ADJUST(wall_shear_calc_final_2,dom)
{
  Domain *domain = Get_Domain(1);
  Thread *ft, *ct;
  face_t f;
  cell_t c;
  real ts_force[ND_ND];
  real area[ND_ND];
  real tau;
  int wall_id=34;
  ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
  begin_f_loop(f,ft)
  {
    c=F_C0(f,ft);

```

```

    ct=THREAD_T0(ft);
    F_AREA(area,f,ft);
    N3V_V(ts_force,=,F_STORAGE_R_N3V(f,ft,SV_WALL_SHEAR));
    tau=NV_MAG(ts_force)/NV_MAG(area);
    C_UDMI(c,ct,14)=tau;
}
end_f_loop(f,ft);
}

/*Perfil de concentracion de sedimento sobre el lecho (condición de contorno)*/
DEFINE_PROFILE(perfil_conc_lecho_final_2,thread,position)
{
    Domain *domain = Get_Domain(1);
    Thread *ft, *ct;
    face_t f;
    cell_t c;
    real tension_shields;
    real tau_bed;
    real k4;
    real v_corte;
    real Re_granular;
    real mu;
    int wall_id = 34;
    ft = Lookup_Thread(domain,wall_id);
    begin_f_loop(f,ft)
    {
        c = F_C0(f,ft);
        ct = THREAD_T0(ft);
        tau_bed = C_UDMI(c,ct,14);
        tension_shields = tau_bed/(G*(gs-1.0)*d50); /*0.01 = 1000 (densidad agua)*0.00001m (d50)*/
        C_UDMI(c,ct,15) = tension_shields;
        k4 = tau_bed/1000;
        mu = C_UDMI(c,ct,4);
        v_corte = pow(k4,0.5);
        Re_granular = v_corte*d50/mu;
        C_UDMI(c,ct,15) = Re_granular;
        if (tension_shields < 0.25)
            F_PROFILE(f,thread,position) = 0.0;
    }
}

```

```
else if (tension_shields < 0.75)
    F_PROFILE(f,thread,position) = 0.60*(tension_shields-0.25);
else
    F_PROFILE(f,thread,position) = 0.30;
}
end_f_loop(f,t)
}
```