ÍNDICE

Capítulo 1 5

Resumen 6

Abstract 7

Agradecimientos 8

Introducción 9

Motivación 11

Objetivos 12

Capítulo2 13

2.1 Descripción del área de estudio: Vallcebre 14

2.1.1 Contexto 14

2.1.2 Geología 15

2.1.3 Suelos y granulometría 16

2.1.4 Flora 17

2.1.5 Climatología y precipitación 17

2.1.6 Transporte de sedimentos 18

2.2 Cal Rodó 20

2.2.1 Características geométricas del aforador 20

2.2.2 Características de la instrumentación del aforador 22

2.2.3.1 Calado 23

2.2.3.2 Concentración de sedimento en suspensión 24

2.2.3.3 Velocidad 26

2.2.3.4 Caudal 28

2.2.3.5 Datos obtenidos 35

2.3 Modelo analítico 36

2.3.1 Definición ____ 36

2.3.2. Modelo analítico agua cargada con sedimento → agua clara ____ 38

2.3.3 Modelo analítico agua clara → agua cargada con sedimento ____ 40

2.3.4 Análisis del modelo genérico considerando el ancho de la sección y la ecuación de Chézy ____ 41

2.3.5 Análisis de modelo genérico por unidad de ancho ____ 42

2.3.6 Resultados del modelo ____ 43

2.3.7 Limitaciones del modelo ____ 44

2.4 Caracterización del canal ____ 45

2.41 Definición ____ 45

2.4.2 Descripción de las instalaciones ____ 45

2.4.2.1 Canal ____ 46

2.4.2.2 Bombas ____ 46

2.4.2.3 Depósitos ____ 47

2.4.2.4 Depósito de decantación ____ 47

2.4.2.5 Panel de control ____ 48

2.4.2.6 Caudal ____ 49

2.4.2.7 Pendiente ____ 53

2.4.2.8 Compuertas ____ 56

2.4.2.9 Calado ____ 58

2.4.2.10 Tiempo máximo de uso ____ 61

2.4.3 Conclusiones de las limitaciones del canal ____ 62

2.4.4 Propuestas de mejora para el canal ____ 62

Capítulo 3 ____ 66

Resultados ____ 67

3.1 Experimentación en el canal de laboratorio ____ 67

3.1.1 Plan de trabajo ____ 67

3.1.2 Ensayo con agua sin carga de sedimentos en suspensión ____ 71

3.1.2.1 Valores del número de Froude en el canal ____ 71

3.1.2.2 Coeficiente de Manning en el canal 67

3.1.3 Ensayo con material en suspensión en el canal de laboratorio 72

3.1.3.1 Estudio previo a los ensayos con sedimento en canal 73

3.1.3.2 Caracterización de la instrumentación en el canal 77

3.1.3.3 Descripción del ensayo 79

3.1.3.4 Resultados del ensayo 80

3.2 Resultados caso real Vallcebre 86

3.2.1 Introducción 86

3.2.2 Análisis de una crecida 87

3.2.3 Análisis de los datos de Vallcebre 90

3.2.4 Análisis de los instrumentos instalados 91

3.3 Resultados con el modelo analítico 92

3.3.1 Funcionamiento del modelo 93

3.3.2 Ecuaciones de estudio 95

3.3.3. Resultados con la ecuación polinómica de Vallcebre 97

3.3.4 Resultados con la ecuación potencial de Vallcebre 98

3.3.5 Resultados con la ecuación de Chézy 100

3.4 Comprobación de la reversibilidad del modelo analítico 104

3.5 Comparativa entre la ecuación potencial y la polinómica de Vallcebre 106

Capítulo 4 107

Discusión 107

4.1 Discusión resultados del canal 107

4.1.1. Influencia del sedimento sobre el agua 107

4.1.2 Perfil longitudinal 110

4.1.3 Formas de fondo 111

4.2 Discusión resultados del modelo 112

4.2.1 Comparación de las ecuaciones características de Cal rodó 113

4.2.2 Corrección de los resultados del modelo inicial 114

4.2.3 Análisis de las gráficas del modelo analítico 116

4.2.4. Ecuaciones características de Cal Rodó 117

4.2.5 Ecuación de Chézy 118

4.2.6 Verificación con los datos del laboratorio 121

4.2.7 Verificación del modelo con la bibliografía 122

Capítulo 5 124

Conclusión 125

Capítulo 6 129

Referencias bibliográficas 130

Capítulo 7 133

Listado de ilustraciones 134

Listado de figuras 135

Listado de tablas 138

Anexos Documento independiente

Capítulo 1

RESUMEN

Título: Transporte en suspensión en una cuenca pirenaica degradada

Autor: Carlos Pineda Hernández

Tutor: Juan Pedro Martín Vide

El transporte de sedimentos en los ríos es un tema complejo y de gran importancia en la sociedad ya que sus efectos en algunos casos son devastadores como por ejemplo las grandes riadas en las poblaciones de la costa o los debris flow que suceden en lugares más montañosos. Por este motivo es importante realizar un estudioso cuidadoso teniendo en cuenta que el transporte de sedimento se puede dividir en dos tipos: el transporte de fondo y el transporte en suspensión.

Este trabajo se ha centrado en el estudio del transporte en suspensión, concretamente la influencia del sedimento en suspensión, y se ha realizado siguiendo tres líneas de trabajo cuyos resultados se han comparado al final del mismo con la finalidad de responder a la pregunta: ¿qué influencia tiene la presencia de sedimento en suspensión en un flujo de agua clara?

Además de plantearse el objetivo de responder a esta pregunta, en este documento también se intentado alcanzar otros objetivos menores relacionados con las distintas líneas de trabajo que nos ayudarían a responder a la pregunta original.

Las líneas de trabajo que se han seguido han sido:

- Estudio de los datos de un caso real de una cuenca mediterránea de alta montaña
- Ensayo en el laboratorio comparando datos con sedimento y sin sedimento
- Implementación de un modelo analítico para determinar la influencia del sedimento

Como ya se ha comentado, para cada una de las líneas de investigación se han marcado una serie de objetivos:

- estudio en el canal del laboratorio, el objetivo que se desea alcanzar es doble: por un lado se pretende realizar su caracterización detallando sus propiedades físicas así como su funcionamiento y sus limitaciones; y por otro lado, se desea ensayar con agua cargada con sedimento en suspensión y con agua clara para poder comparar a posteriori los resultados y ver la influencia que tiene la presencia del sedimento.
- Respecto al modelo analítico el objetivo que se pretende alcanzar también es doble: por un lado se quiere determinar qué limitaciones que presenta y acotar la importancia que tienen las hipótesis que se realizan para su formulación; y por otro lado, se quiere evaluar el modelo con los datos obtenidos en el canal así como con datos que se obtengan de la bibliografía.
- De cara al caso real de Vallcebre, como en los puntos anteriores, también se pretende alcanzar dos objetivos: entender mejor el comportamiento hidráulico del aforador, así como de la instrumentación que hay instalada en él (concretamente el sistema doppler de medición de la velocidad Starflow); y también dar respuesta a aquellas incógnitas que se puedan plantear al tratar los datos.

Tras analizar los datos obtenidos y comparándolos entre ellos se ha llegado a conclusiones muy interesantes como son que la presencia de sedimento en suspensión, a pesar de que en diversas bibliografías se cita que tiene tendencia a frenar el flujo y su calado, en los ensayos que se han realizado en el canal de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona resulta que para calados pequeños y concentraciones de hasta 15 g/l el fluido se acelera y su calado se reduce.

ABSTRACT

Title: Transport in suspension in a watershed degraded Pyrenees
Author: Carlos Hernández Pineda
Tutor: Juan Pedro Martín Vide

Sediment transport in rivers is complex and has an important role in society because its effects are devastating in some cases such as major floods in the coastal towns or the debris flow that occur in mountainous places. It is therefore important to conduct a thorough study taking into account that the sediment transport can be divided into two types: bedload transport and suspended transport. This work has focused on the study of transport in suspension, particularly the influence of suspended sediment, and has been developed along three lines of work whose results have been compared at the end in order to answer the question: what influence does the presence of suspended sediment in a stream of clear water?

In addition to consider the aim of answering this question, this paper also attempted to achieve other objectives under the various related lines of work that would help us answer the original question. Working lines that have followed have been:

- Study of data from a real case of a high mountain Mediterranean
- Laboratory test comparing data with and without sediment
- Implementing an analytic model to determine the influence of sediment

As already mentioned, for each of the lines of research have made a number of objectives:

- channel study of the laboratory, the objective to be achieved is twofold: first characterization is sought details of their physical properties and their operation and limitations, and secondly, you want to rehearse with sediment-laden water in suspension and clear water to compare retrospectively the results and see the influence of the presence of sediment.
- Regarding the analytical model the objective to be achieved is also twofold: on one hand we want to determine what constraints, limit the importance of the assumptions being made to its formulation and on the other hand, is to evaluate the model with data obtained in the channel as well as data obtained from the literature.
- Looking Vallcebre real case, as in the above, also has two objectives: to better understand the hydraulic behavior of the flume and instrumentation that is installed on it (namely the Doppler system for measuring the speed starflower), and to respond to those unknowns that may arise when dealing with data.

After analyzing the data obtained and compared between them has reached very interesting conclusions are that the presence of suspended sediment, though in different bibliographies cited that it tends to slow the flow and depth, on trials have been made in the channel of the Faculty of Geology, University of Barcelona is that for small drafts and concentrations of up to 15 g / l the fluid is accelerated and its depth is reduced.

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que se merecen estar en este apartado y espero no dejarme a ninguna.

Mi primer agradecimiento a las dos personas que han hecho posible la elaboración de esta tesina porque sin ellas, este documento no existiría: mi más eterno agradecimiento al Doctor Juan Pedro Martín Vide tutor de esta tesina, que con sus explicaciones ha dado luz y ha guiado por el camino correcto la elaboración de este documento; y al Doctor Guillaume Nord que con sus reuniones los jueves ha hecho que la elaboración del texto fuese más agradable y amena. Gracias a los dos por cogerme de las manos y enseñarme a caminar por senderos tan complejos como son los de la hidráulica. Senderos complicados y llenos de piedras pero que son más fáciles de recorrer cuando tienes a tu lado a dos grandes personas como vosotros. Así mismo, me gustaría agradecer el apoyo del Doctor Ferran Colombo en la elaboración de los ensayos en el canal de la UB, ya que siempre estuvo dispuesto a ayudarnos y su experiencia fue de gran ayuda.

Mi agradecimiento más sincero y emotivo a toda mi familia porque ellos son los que de verdad han vivido el día a día de mis últimos 6 años estudiando Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Son sólo ellos los que saben lo que me ha costado, lo que me he esforzado y lo que he luchado por llegar donde estoy. Son ellos los que en mis momentos debilidad me abrazaban y me animaban a seguir un poco más porque ya quedaba muy poco y un último esfuerzo siempre es bueno. Ellos han llorado conmigo con los suspensos, del mismo modo que han llorado, esta vez de alegría, con los aprobados. Muchas gracias mami, papi, Lluís, Jordi, Sònia, abuelita, abuelito, tíos y primos.

No me gustaría finalizar este escrito de agradecimiento sin agradecer a todos mis compañeros de promoción las fantásticas horas que me han brindado en estos 6 años: momentos de alegría, momentos de tensión, momentos tristes… simples momentos que hemos vivido juntos y que permanecen en el recuerdo. Gracias amigos.

Para acabar me gustaría escribir una frase que me ha acompañado durante mis años de carrera y seguro que lo hará en el futuro cuando ejerza de ingeniero.

"Aprender es como ir contra corriente, cuando dejas de hacerlo, retrocedes", Briten

INTRODUCCIÓN

La hidráulica de los ríos es una disciplina que engloba diversos campos de estudio que a pesar de estar íntimamente ligados por un conector común que es el propio río, son a la vez muy heterogéneos.

Son muchos investigadores que llevan años estudiándola pero aún y así, son muchos los aspectos que se desconocen ya sea por su complejidad a la hora de estudiarlos por falta de datos, o bien porque son temas novedosos que aún no se han estudiado con el suficiente detalle. Un ejemplo que hasta el momento se ha desarrollado escasamente y que se pretende estudiar en el presente documento es el transporte de sedimento en el cauce de un río y la influencia de éste en las propiedades hidráulicas del flujo.

El transporte de sedimento por un río puede clasificarse atendiendo a dos criterios: según el modo de transporte y según el origen del material [1]. Según el modo de transporte, el sedimento puede ser transportado en suspensión, suspendido gracias a la turbulencia del flujo, o bien por el fondo, rodando o saltando. Ambos modos de transporte no se comportan de manera independiente sino que partículas transportadas por el fondo pueden pasar a ser transportadas en suspensión y a la inversa. Según el origen del material, los sedimentos se pueden clasificar en material procedente de la cuenca que suele ser muy fino y suele ser transportado en suspensión y material con origen en el lecho del río y que dependiendo del tamaño del mismo puede transportarse en suspensión o por el fondo.

El transporte de fondo es un punto de la hidráulica de los ríos en que muchos investigadores han invertido su tiempo de estudio obteniendo conclusiones importantes tal y como se puede leer en la bibliografía especializada, en cambio, el estudio del transporte en suspensión está mucho menos desarrollado y por ello el interés en realizar este trabajo. El umbral entre ambos modos de transporte no es fácil de determinar a la práctica como podría parecer a priori: suele decirse que por el fondo viajan las partículas más gruesas mientras que el material más fino es transportado en suspensión. Sin embargo, la diferencia fundamental se basa en las fuerzas actuantes que producen y mantienen cada tipo de transporte [1] [2] [3] [4].

La falta de estudios relacionados con el transporte en suspensión tratado de forma independiente al transporte de fondo ha dado lugar al presente documento, que servirá como documento de partida de una tesis doctoral, y en el que como primera aproximación, se pretende determinar cuál es la influencia del material en suspensión en la hidráulica de un río. Por ello, se ha optado por realizar el trabajo con la hipótesis de que no habrá presencia de transporte de fondo y se considera que es un buen punto de partida ya que como concluye Chien y Wan [4]:

- el peso específico de la mezcla de agua más sedimentos es mayor que para el agua sola, por lo que la fuerza de arrastre en la dirección del flujo es mayor y también la flotabilidad haciendo prácticamente nulo el transporte de fondo.
- La viscosidad de la mezcla mencionada es mayor que para agua sola y por lo tanto, la velocidad de caída será menor.
- La capacidad de transporte de fondo en fluidos hiperconcentrados es mayor que en agua clara.

Del mismo modo, hay un acuerdo general [4] [5] [6] en que el aumento de la concentración de material fino que inicialmente aumenta el transporte de fondo, pueda provocar que las partículas que inicialmente se desplazaban por el fondo pasen a transportarse en suspensión debido a la disminución de la velocidad de caída de las partículas provocada por las elevadas densidades de la mezcla.

También existe concordancia entre diversos autores [5] [6] [7] sobre el aumento del transporte de sedimentos en suspensión con el crecimiento de la concentración en suspensión de material fino, es decir, que a medida que la cantidad de sedimentos finos en suspensión es mayor, más fácilmente puede el flujo transportar más sedimentos tal y como muestran los ensayos de Wan y Sheng (1974) [5]. Por lo tanto, se considera que la hipótesis realizada puede ser acertada tal y como se justifica en los párrafos anteriores.

Por otro lado, a lo largo de esta tesina, como ya se ha citado, se pretende ver qué influencias tiene el sedimento en un flujo principalmente en dos aspectos: el calado y la velocidad del flujo. Para ello, se analizarán flujos con características similares y con la única diferencia de que uno estará cargado con material en suspensión, y en cambio el otro será sin carga (agua clara). Sobre este tema hay gran variedad de opiniones y los autores no se acaban de poner de acuerdo sobre cuál es la influencia real del sedimento y el porqué de la misma. Por ejemplo, se sabe que en los fenómenos torrenciales tanto de La Galera [8] como de Las Arenas [9] la influencia que tuvo el sedimento en suspensión fue la de aumentar de forma muy importante el calado generando grandes inundaciones, en cambio, en los ensayos de laboratorio realizados por Rickermann [7] la presencia del sedimento en suspensión hace que el calado disminuya en algunos casos pero en otros aumente dependiendo de la concentración del flujo. Por lo tanto, a simple vista podría parecer que es la concentración la que rige los fenómenos del flujo pero documentándose, se puede observar que éstos también pueden depender del calado, del caudal, de la velocidad o de las características de la sección o tramo de estudio.

Una vez explicado cuál es la finalidad de este documento y habiendo hecho una breve introducción del tema, ahora es necesario detallar cómo se pretende desarrollar para alcanzar los objetivos marcados. La presente tesina para dar respuesta a la pregunta formulada de que cuál es la influencia del sedimento en suspensión, se apoyará en tres grandes pilares o líneas de investigación:

1. Experimentación en un canal de laboratorio haciendo ensayos en dos situaciones distintas: una sin carga y otra con carga de sedimento variando en ésta última situación la concentración de sedimento de forma gradual para ver su influencia. Los resultados obtenidos en ambas situaciones se compararán extrayendo conclusiones interesantes sobre la influencia por presencia de sedimento.
2. Implementación de un modelo analítico basado en la conservación de la cantidad de movimiento que determina la influencia del sedimento en un flujo.
3. Estudio y análisis de los datos de un caso real: Vallcebre, que es una cuenca situada en el prepirineo catalán y que el “Institut Jaume Almera” del CSIC lleva estudiando desde hace más de 20 años ya que es una de las principales fuentes de sedimento del río Llobregat antes de la presa de La Baells.

MOTIVACIÓN

Llegando al final del sendero que ha sido la realización de la carrera de Ingeniería Técnica Superior de Caminos, Canales y Puertos, uno se vuelve atrás para contemplar todas las piedras del camino en las que tropezó, pero también, todas aquellas bellas imágenes y momentos que ha vivido intensamente acompañado de otros caminantes que tenían el mismo destino. A estas alturas del viaje uno ya es conocedor de cuáles son sus preferencias respecto a un futuro próximo y, por lo tanto, sabe en qué dirección remar.

La tesina de especialidad es una experiencia que tiene la finalidad de confirmar que la dirección en la que se desea remar es la acertada, o por el contrario, mostrar al caminante que el camino que sigue no es el correcto para alcanzar sus objetivos futuros.

El autor de la presente tesina, antes de escoger la temática, hizo lo que se redacta en los párrafos anteriores: se volvió atrás mirando sus propias huellas en el polvo del camino y vio que de las muchas temáticas que se habían tratado durante el transcurso del paseo, la hidráulica de ríos destacaba sobre el resto y entonces se dio cuenta que le gustaría remar en esa dirección.

Son muchos y muy diversos los temas que se pueden estudiar en la disciplina de la hidráulica pero después de una conversación con Juan Pedro Martín Vide, tutor de la tesina, se optó por estudiar el campo del transporte de sedimentos en suspensión ya que son pocos los estudios realizados sobre éste, comparados con los del transporte de fondo, y muy dispares sus conclusiones. Por este motivo se consideró que podría ser interesante obtener nuestras propias conclusiones a partir de un ensayo en laboratorio y del análisis de un modelo analítico.

Una vez decidida la dirección en que se remaría, documentándose con libros, artículos y estudios relacionados con el tema, uno se da cuenta que el transporte de sedimentos es una de las principales causas de actuaciones en los ríos o en sus zonas anexas: es, indirectamente, el sedimento transportado el que produce el desplazamiento de los meandros en los ríos, o también el que se origina problemas en las infraestructuras existentes como se detalla en los estudios de La Galera [8] y de Las Arenas [9], ríos catalanes muy complejos que en situaciones de crecida transportan una elevada carga de sedimentos y provocan en un periodo temporal corto daños muy importantes en las estructuras y en las personas.

La gran repercusión que tiene sobre la sociedad y la economía el transporte de sedimentos, animan a investigar y a conocer más sobre el fenómeno; y si es posible, y se puede colaborar realizando un estudio sobre el tema que sirva para entender mejor el fenómeno o que sea la base de un estudio futuro más completo y detallado, ya habrá valido la pena el esfuerzo y el tiempo invertido en su elaboración.

OBJETIVOS

Como ya se ha comentado en la introducción, con la presente tesina se pretende realizar un estudio sobre el transporte en suspensión en un flujo considerando que no existe transporte de fondo, con el fin de poder responder a la pregunta: ¿qué influencia tiene la presencia de sedimento en suspensión en un flujo de agua clara? Además de dar respuesta a esta pregunta, también se han planteado otros objetivos menores relacionados con cada uno de los pilares sobre los que se apoya la explicación, ya que estos pilares no son sólo de apoyo, sino que tienen sus propias preguntas a las cuales se intentará dar respuesta a lo largo del documento:

- Respecto al estudio en el canal del laboratorio, el objetivo que se desea alcanzar es doble: por un lado se pretende realizar su caracterización detallando sus propiedades físicas así como su funcionamiento y sus limitaciones; y por otro lado, se desea ensayar con agua cargada con sedimento en suspensión y con agua clara para poder comparar a posteriori los resultados y ver la influencia que tiene la presencia del sedimento.
- Respecto al modelo analítico el objetivo que se pretende alcanzar también es doble: por un lado se quiere determinar qué limitaciones que presenta y acotar la importancia que tienen las hipótesis que se realizan para su formulación; y por otro lado, se quiere evaluar el modelo con los datos obtenidos en el canal así como con datos que se obtengan de la bibliografía.
- De cara al caso real de Vallcebre, como en los puntos anteriores, también se pretende alcanzar dos objetivos: entender mejor el comportamiento hidráulico del aforador, así como de la instrumentación que hay instalada en él (concretamente el sistema doppler de medición de la velocidad Starflow); y también dar respuesta a aquellas incógnitas que se puedan plantear al tratar los datos.

Capítulo 2

METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio: Vallcebre

El primer pilar en el que se basa el presente estudio para alcanzar los objetivos planteados es el análisis y estudio de los datos de un caso real: Vallcebre.

2.1.1 Contexto

Vallcebre es una cuenca que el Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera' (CSIC) lleva estudiando desde hace más de 20 años y que fue escogida para el seguimiento de las zonas cárcavas o badlands[1], como también, por su contribución al suministro de sedimentos, ya que fue identificada como la principal zona fuente de sedimentos de la cuenca del alto Llobregat antes del embalse de la Baells [10] [11].

La cuenca de estudio está situada en la cabecera del río Llobregat en el prepirineo catalán a 42°12N, 1°49E, que corresponde a la comarca del Berguedà, y a una altitud de entre 1.100 y 1.650 metros. La precipitación media anual es de unos 925mm y la temperatura media a 1.440m es de 7.3ºC [12]. Las bajas temperaturas durante todo el año hacen que se produzca un número considerable de heladas, llegando a producirse aproximadamente 100 días al año [13].

La dinámica de sedimentos en las cuencas de Vallcebre está fuertemente dominada por la presencia de áreas de badlands las cuales experimentan fuertes discontinuidades espaciales y temporales en la producción y conducción de sedimentos desde la roca arcillosa hasta la salida de las cuencas: la roca madre se meteoriza en invierno a causa de las frecuentes heladas erosionándose en verano debido a los chaparrones de elevada intensidad pero de poca duración, lo que origina que los sedimentos se depositan temporalmente en los cauces, de donde son evacuados durante las grandes crecidas de finales de otoño.

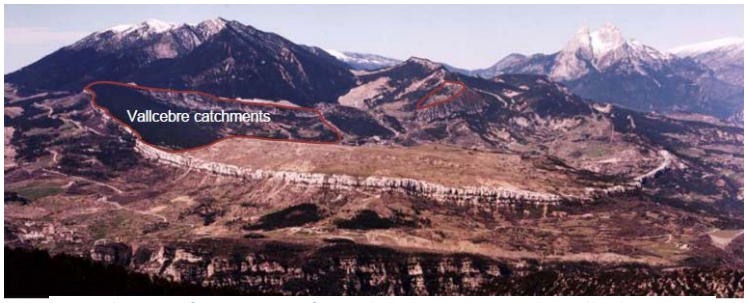


Ilustración 1. Situación real de las cuencas de Vallcebre.

Las crecidas de finales de otoño son producidas por precipitaciones copiosas de intensidad moderada durante los periodos húmedos, cuando una gran parte de la cuenca contribuye a la escorrentía por estar saturada, mientras que en verano, cuando el sedimento es erosionado de las fuentes, la cuenca está seca y toda la escorrentía procede únicamente de los badlands ya que éstos son impermeables.

El suministro de sedimento por las cuencas muestra una elevada variabilidad interanual, con diferencias de hasta de dos órdenes de magnitud: los años más secos son los que producen menos sedimentos, mientras que los años de mayor producción de sedimento no son los años más húmedos, sino los años con mayores sucesos.

[1] Terrenos de formas suaves y de aspecto seco formados por rocas sedimentarias y suelos ricos en arcilla, que han sido fuertemente erosionados por las acciones del viento y del agua.

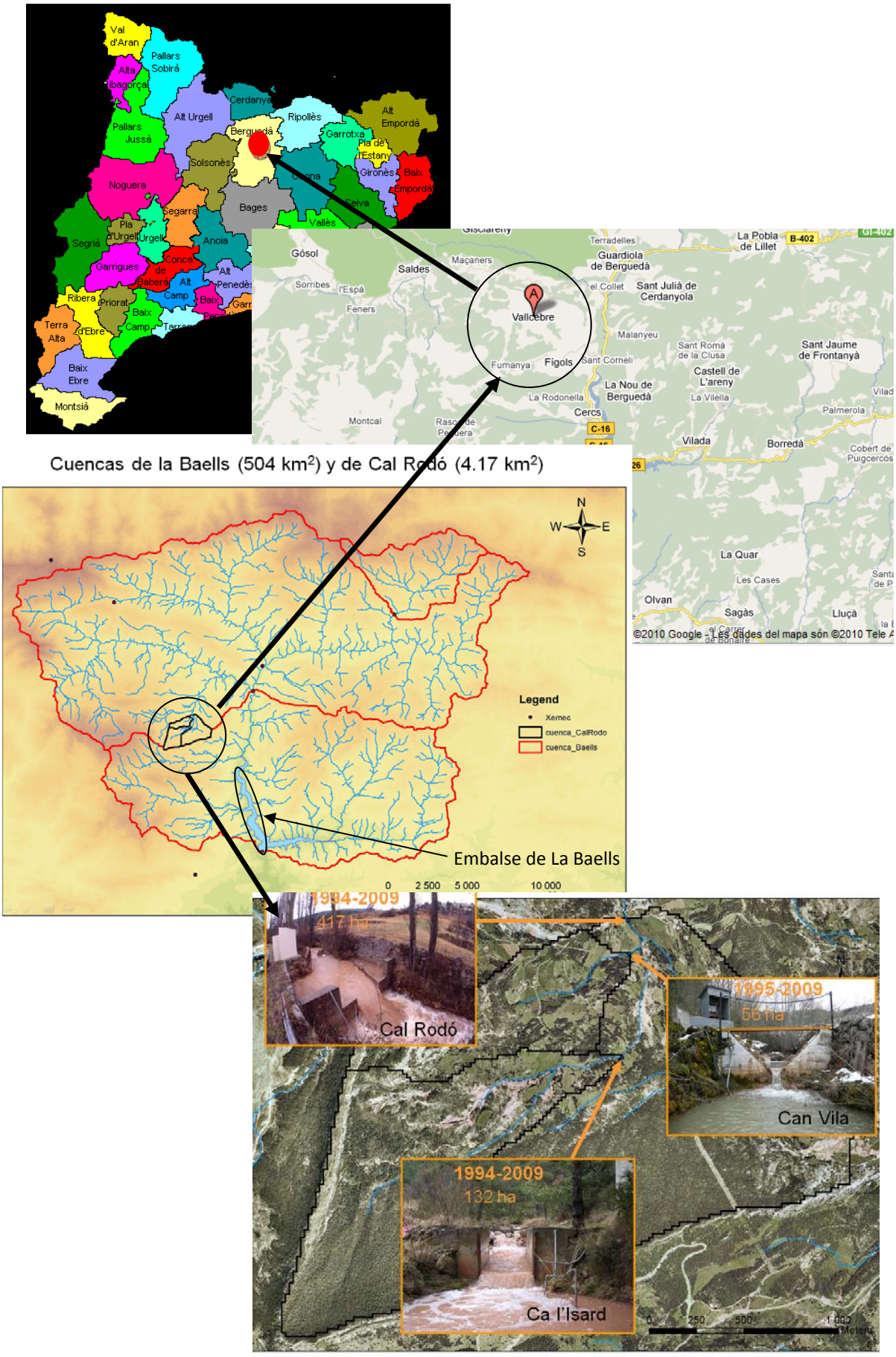


Ilustración 2. Detalle de la situación de Vallcebre. Desde una visión más genérica hasta la ubicación exacta de las tres cuencas estudiadas pasando por su localización dentro de la cuenca de la Baells.

2.1.2 Geología

La litología de esta zona es una formación continental de facies *Garumnense*, atribuida al Cretácico terminal [14], dominada por lutitas rojas con abundante esmectita que favorecen los movimientos de masa y la erosión por arroyada concentrada principalmente en los badlands que no llegan a ocupar más del 3% de la cuenca pero juegan un papel muy importante en la producción de sedimento.

Los badlands, considerados como terrenos característicos de ambientes áridos, también están presentes en ambientes húmedos donde la pendiente topográfica, la debilidad de la litología y la intensidad de las precipitaciones, factores todos ellos frecuentes en ambientes mediterráneos, coexisten. Por lo tanto, éstos [15] se desarrollan en zonas de carácter montañoso, con precipitaciones anuales de más de 700 mm, y con frecuentes chaparrones tormentosos de verano. En estos ambientes hay suficiente agua disponible para el desarrollo de una vegetación protectora permanente, pero su crecimiento está más bloqueado por las propias tasas de erosión que por la falta de agua [16] [17].

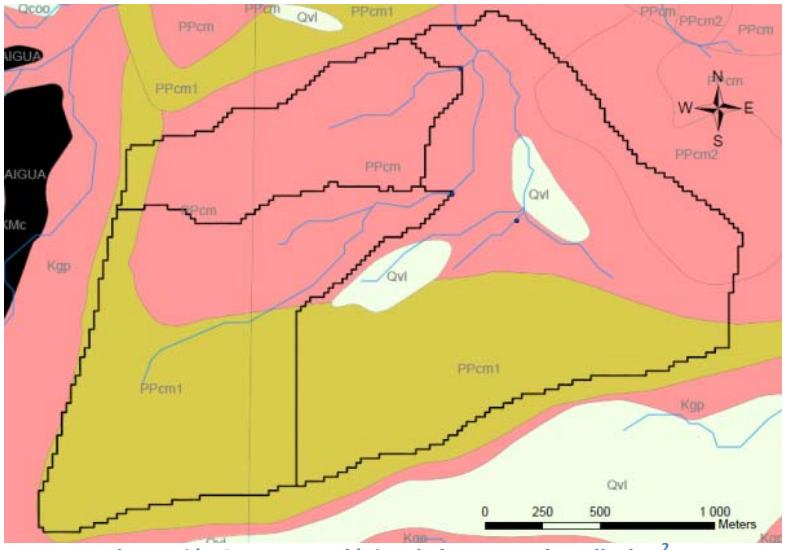


Ilustración 3. Mapa geológico de la cuenca de Vallcebre[2]

PPcm1	Calcáreas micríticas con microcódium. Facies Garumnianas. Calcáreas de Vallcebre. Danià
PPcm2	Calcáreas com microcódium. Paleoceno. Danià
Qvl	Clasts angulosos, arenas y limos. Depósitos aluviales antiguos degradados. Plestocè-Holocè

Tabla 1. Legenda ICC mapa geológico.

2.1.3 Suelos y granulometría

La granulometría de los sedimentos en suspensión que transporta el río es de media 0.016µm.
Los espesores de los suelos en la cuenca de estudio varían de forma considerable dependiendo de la litología, la geomorfología y por la construcción de terrazas destinadas a la agricultura. Por ejemplo, las áreas de caliza están cubiertas por suelos con espesores del orden de los 40 cm, mientras que en las laderas sobre rocas arcillosas éstos son superiores a los 80 cm. En cambio, en las terrazas agrícolas los espesores son de potencias mayores a 3 metros.
Las capas más superficiales de los suelos tienen características limosas pero presentan gran capacidad de infiltración debido a su estructura con alto contenido en materia orgánica (media 12%), y presumiblemente, también por las labores agrarias relativamente recientes [18]. El hecho que durante

[2] Fuente: Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). http://www.icc.es/

el verano se formen una serie de grietas en el suelo debido al contenido de arcillas esmectitas (cerca del 10%) es otra razón por la cual la capacidad de infiltración es elevada. Por otro lado, la conductividad hidráulica del terreno disminuye rápidamente con la profundidad, induciendo a la formación a poca profundidad de acuíferos semi-permanentes, a pesar de los grandes gradientes topográficos de la zona [19].

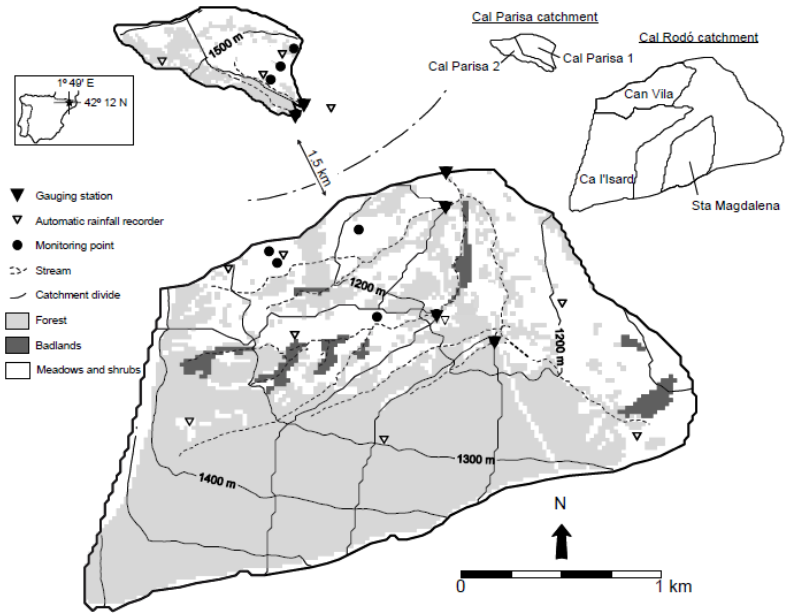


Ilustración 4. Mapa topográfico con detalles de los puntos de toma de datos de la cuenca de Vallcebre.

2.1.4 Flora

La mayor parte de las tierras son de pendiente poco pronunciada, sobre todo en las solanas, ya que fueron desforestadas y aterrazadas para la agricultura en el pasado; actualmente casi no hay actividad agrícola y la mayor parte de los antiguos campos de cultivo se usan como pastizales o están siendo recolonizados espontáneamente por pinedas, por lo que las formaciones vegetales más comunes son pastizales mesófilos y bosques de Pinus sylvestris.

2.1.5 Climatología y precipitación

Las temperaturas medias mensuales registradas en la última década van desde valores máximos de 15°C en Julio a mínimos de 1°C en Enero. A pesar de que la mínima está por encima de los 0°C, la temperatura del aire a 1.5 metros de altura (altura del instrumento de medición) fue en poco más de 100 días negativa. Del mismo modo, analizando los datos medidos en el suelo, se determinó que se produjeron unos 130 ciclos de congelación-descongelación en la zona norte cuya congelación llegó hasta profundidades de 55cm; mientras que en la zona sur se produjeron 112 ciclos llegando a profundidades de hasta 25cm.

Por otro lado, la medición de la precipitación se realiza mediante una red de pluviómetros de balancín de 0,2 mm de resolución, conectados con colectores de datos que registran el momento de cada vuelco. Además, también se dispone de una estación meteorológica automática permanente [13] [17].

2.1.6 Transporte de sedimentos

El estudio del transporte de sedimentos fue uno de los objetivos principales que se marcaron al escoger Vallcebre como área de estudio, ya que es la principal fuente de sedimentos del Llobregat antes del embalse de la Baells. Las primeras observaciones sobre tasas de erosión se realizaron mediante bolsas de plástico y estacas metálicas [10] [20]. Posteriormente se realizaron experimentos de simulación de lluvia durante 3 años [13] utilizando el simulador portátil ligero [21] y también, durante tres años, se realizaron medidas del sedimento suministrado por una parcela de límites naturales o microcuenca elemental de 1.430 m^2 mediante divisores de escorrentía [22] [22] [23].

Una de las conclusiones del trabajo realizado hasta el momento es que en el transporte de sedimentos los ciclos de congelación-descongelación tienen un papel fundamental en la meteorización de la roca ya que hacen que en invierno el suelo sea esponjoso y de baja densidad con una capacidad de infiltración que depende fuertemente de la humedad; con el paso de los meses, el suelo se va compactando al mismo tiempo que se regulariza la infiltración y aumenta su erodibilidad hasta llegar a verano, estación en que se vuelven a producir cambios importantes al disminuir apreciablemente la erodibilidad. Por último, en otoño se dan las menores tasas de infiltración, al mismo tiempo que la erosión se hace más efectiva. [24] [25] [26].

Observando las fuentes de material erosionable, se ha determinado que la mayor parte de los sedimentos vienen de los badlands, así como de algunas fuentes secundarias como son los márgenes y lechos de los torrentes, algunas incisiones locales y movimientos en masa.

Para realizar el seguimiento del transporte de sedimento en suspensión, en 1990 la cuenca de Vallcebre con una extensión total de 4,17 km^2 se decidió subdividir en tres subcuencas instrumentadas:

- **Can Vila**, cuya extensión es de 0,56 km^2, es una subcuenca con pequeñas áreas erosionadas (0,9% de la superficie total) que no tienen la morfología típica acarcavada y en la que se instaló una estación de aforo triangular con sensor de nivel y temperatura del agua, un turbidímetro que permite la medición de sólidos en suspensión hasta unos 7 g/l, y un muestreador automático ISCO. Todos los equipos están conectados con un colector de DT de Data Electronics que controla el muestreador en función del nivel del agua.

Ilustración 5. Estación de aforo Cal Vila con una sección de control triangular.

- **Ca l'Isard,** con una extensión de 1,32 km^2, es la subcuenca con mayor presencia de áreas de badlands (4,5% de la superficie) y, como en Cal Vila, se instaló una estación de aforos que en este caso es un vertedero rectangular auto-limpiante de cemento que está dotado con la misma instrumentación descrita para Can Vila, además de un sensor ultrasonidos que permite la medición de concentraciones de sedimento en suspensión hasta unos 240 g/l.

Ilustración 6. Estación de aforo Cal l'Isard con una sección de control rectangular.

- **Cal Rodó,** con una extensión de 4,17 km^2 y una presencia moderada de áreas de badlands (2,8%), es la cuenca principal que contiene a las dos anteriores. Dispone de una estación de aforo que es un vertedero de cemento auto-limpiante rectangular de sección escalonada y en la que los instrumentos, que se explicarán en detalle en próximos apartados, son análogos a los descritos para la estación de Ca l'Isard.

Ilustración 7. Estación de aforo Cal Rodó con una sección de control rectangular y escalonada.

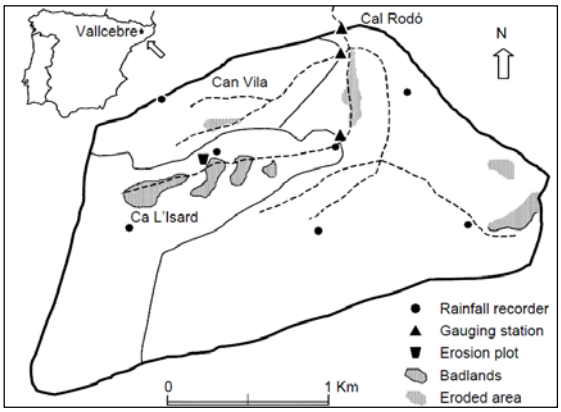


Ilustración 8. Detalle de la ubicación de los badlands y áreas erosionadas.

Analizando los resultados para el periodo 1994-1999, se concluye que el transporte total en suspensión estimado en Ca l'Isard fue de 3.700 Mg, mientras que en la estación de Cal Rodó, que incluye la anterior, fue solamente de 2.900 Mg [17].

En Vallcebre, no sólo se ha estudiado el transporte en suspensión sino que también se estudió el transporte por carga de fondo el cual actualmente no se sigue estudiando ya que las medidas que se tomaron en 1995 permitieron estimarlo en menos del 1% del transporte en suspensión [22], es decir se considera despreciable. Además, se comprobó que el transporte de fondo sólo sucede de forma esporádica en avenidas importantes.

2.2 Cal Rodó

El estudio se ha centrado únicamente en el aforador de Cal rodó que está situado a la salida de la cuenca y por lo tanto, por él pasa todo el caudal y todo el sedimento transportado que se lleva midiendo de forma continua desde 1994 y los resultados de los cuales van desde 0.1 a 10000l/s y de 0 a 100 g/l respectivamente. Así mismo, se puede afirmar que la máxima relación $\frac{Q_s}{Q}$ que se da en la cuenca estudiada es menor al 5%.

2.2.1 Características geométricas del aforador

La estación de aforo de Cal Rodó es de hormigón auto-limpiante y está formada por dos secciones rectangulares escalonadas en dos niveles con anchos distintos: la primera sección tiene una altura de 0.8 m y un ancho de 1.8m y la segunda una altura de 0.9m y un ancho de 3.6m. (ver detalle en figura 1).

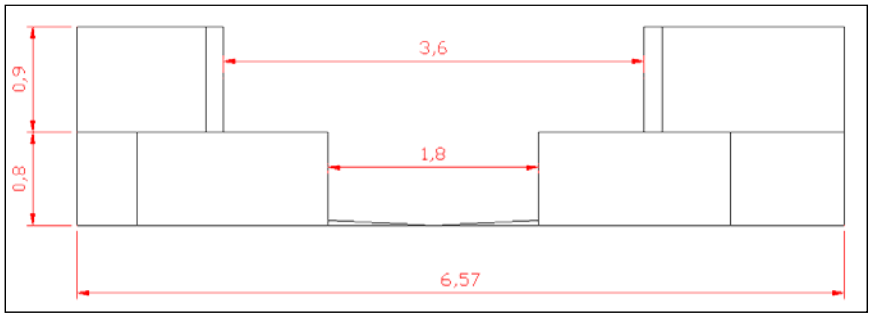


Figura 1. Perfil transversal del aforador visto desde aguas arriba

Como se observa en la figura 2, se trata de un aforador de longitud 5.37m donde en la sección aguas arriba, para los primeros 0.8 metros de altura, el ancho es de 5.08m pero disminuye a medida que se acerca al punto de desagüe situado aguas abajo. En cambio, para los siguientes 0.9 m de altura, el ancho de 6.56 m es constante a lo largo de la estructura menos en el punto de desagüe donde se reduce rápidamente a 3.6m.

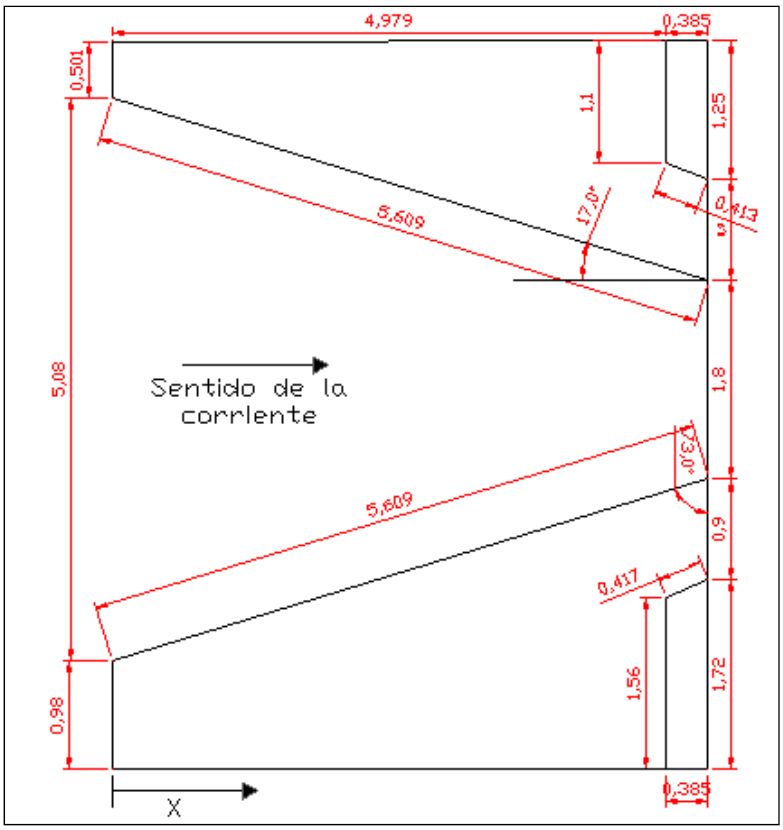


Figura 2. Planta del aforador de Cal Rodó

Como ya se ha comentado, el ancho del aforador para los primeros 0.8 metros de altura disminuye aguas abajo por lo que conocerlo en distintos puntos del aforador será útil de cara a futuros cálculos, por consiguiente, es interesante determinar la relación entre el ancho y una posición respecto a un punto de referencia conocido, que en este caso será el extremo más aguas arriba del aforador. Para determinar esta relación, se aplicará trigonometría básica.

Los contornos laterales del aforador para alturas menores a 0.8 metros tienen una longitud de 5.61 metros y forman un ángulo con el sentido de la corriente de 17°. Por lo tanto, la pendiente longitudinal de ambos contornos aplicando m = tgα es la misma y su valor es 0,31.

Entonces, la expresión que relaciona el ancho de una sección con su posición respecto a un punto situado en el extremo más aguas arriba del aforador es:

$$B(x) = 5{,}08 - 2 \cdot m \cdot x \rightarrow B(x) = 5{,}08 - 06112 \cdot x \ (m) \qquad h \leq 0.8m$$

$$B(x) = \begin{cases} 6.56 \text{ m}, \ x \in [0, 4.98) \\ \\ 3.6 \text{ m}, \ x \in (4.98, 5.36) \end{cases} \qquad h > 0.8m \qquad (1)$$

Siendo:

B(x) el ancho de una sección situada a x metros del punto más aguas arriba del aforador.

m la pendiente longitudinal de los laterales del aforador.

x la posición respecto el punto más aguas arriba del aforador.

h es la altura medida desde el fondo de la estructura.

2.2.2 Características de la instrumentación del aforador

El aforador de Cal rodó está dotado de diferentes instrumentos de medición: para poder determinar el calado, la velocidad del agua y la concentración de material en suspensión de ésta.

En la ilustración 9 y en la figura 3 se detallan las posiciones de todos los instrumentos los cuales se explicarán en los apartados siguientes.

Ilustración 9. Detalle de la instrumentación y de su posición

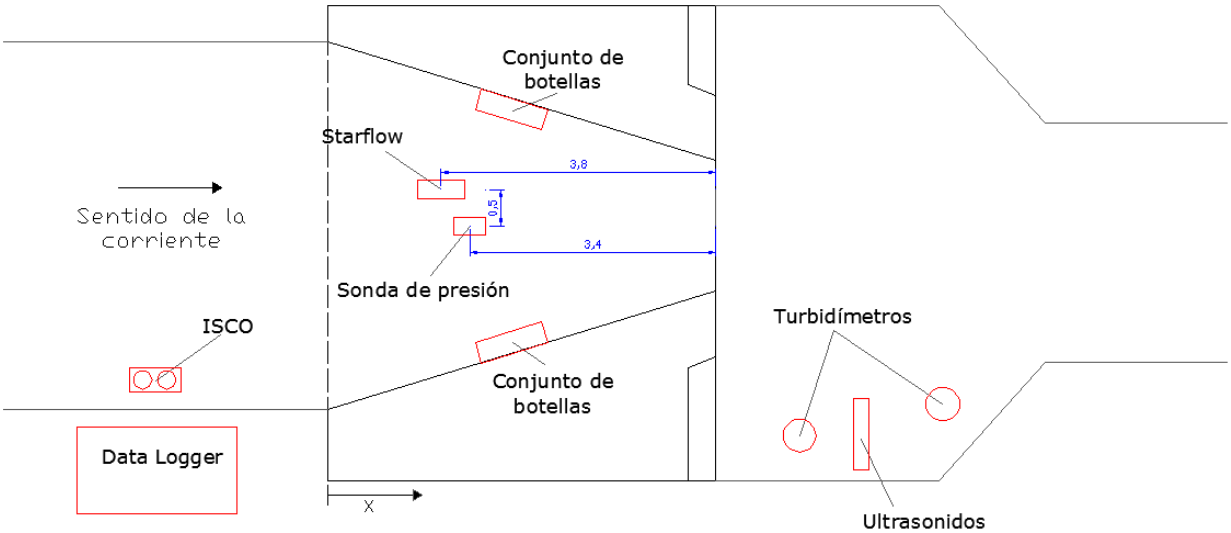


Figura 3. Planta del aforador con la ubicación de toda la instrumentación

Todos los instrumentos detallados en las figuras anteriores, están conectados al data logger que tiene la finalidad de reunir las mediciones de las distintas variables que se obtienen de los instrumentos en función de la hora del suceso, permitiendo realizar una mejor visualización y comparación de los distintos datos.

2.2.3.1 Calado

La medición del calado se realiza de dos formas distintas: por medida directa con ayuda de una regla graduada colocada en uno de los laterales del vertedero y mediante la presión de forma indirecta. Las sondas piezo-resistivas-eléctricas de presión aportan como dato un voltaje que aplicando una relación de calibración se halla el calado.

La relación que se aplica a las sondas de presión se debe ajustar de forma periódica y es:

$$h_i = a \cdot V_i + b \quad (2)$$

Siendo $a = \frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i - V)(h_i - h)}{\sum_i (V_i - V)^2}$ y b = h-a·V

Donde a y b son parámetros que deben ajustarse con cierta periodicidad.
h_i es el nivel de la regla localizada en el lateral del vertedero.
V_i es cada uno de los valores de voltaje que mide la sonda de presión.
V es la media de los valores de V_i en n observaciones.
h es la media de los valores de h_i en las n observaciones.

En Cal Rodó hay instaladas dos sondas de presión:

- La *sonda de presión "río"* está situada en el lecho del río junto a una piedra unos 20 metros aguas arriba del aforador y sus mediciones se comparan con las que se realizan en el aforador y así se puede determinar si hay cambios en la lámina libre de agua por la presencia de la infraestructura y a su vez, nos permite encontrar la pendiente piezométrica del río en este tramo.
  Las limitaciones que presenta este sistema de medida es que sólo toma datos cuando se presentan calados superiores a 30cm. Actualmente no está en servicio.

- La sonda de presión "aforador" está situada en el eje del río sobre la solera de la estructura a 3.4 metros de la sección de control. Como el turbidímetro anterior, realiza las mediciones en mV y mediante la ecuación (1) calibrada adecuadamente se realiza la conversión para obtener el calado. La toma de datos la realiza cada veinte minutos en condiciones normales y cada dos minutos en caso de avenida[4].
  La limitación que presentan estos sistemas es que para valores altos de concentración los resultados que se obtienen se han de corregir debido a que el peso específico de la mezcla es mayor que el del agua.

Hay que tener en cuenta que el funcionamiento de los instrumentos que miden la presión se fundamenta en calcular el peso de la columna de agua que hay sobre ellos. Por lo tanto, si en el agua

[3] Ecuación de calibración de Guillaume Nord para la sonda de presión determinada a partir de datos experimentales. Se determinan los parámetros haciendo la diferencia de éstos con la media y dividiendo el sumatorio por los mínimos cuadráticos del voltaje.
[4] Se considera avenida cuando el calado que mide la sonda de presión es superior a 10 cm.

hay sedimentos en suspensión, el peso del agua cargada será mayor que el peso del agua limpia, por lo que dará un valor de altura de lámina mayor al real. Por ello, como resulta que miden γ'H, para saber la altura real se tendrá que dividir el valor obtenido por γ'. Si no se hacen las correcciones oportunas, se sobreestimará el calado.

2.2.3.2 Concentración de sedimento en suspensión

La concentración se mide de dos formas diferentes: directamente mediante la toma de muestras y de forma indirecta a partir de la turbiedad del agua.

Sistemas de medición directa

En este aforador hay instalados varios sistemas de medición directa:

- *Conjunto de botellas* situadas a distinto nivel las unas de las otras y que está colocado a ambos lados del aforador. Su funcionamiento consiste en que las distintas botellas se van llenando de agua y sedimento a medida que el nivel del río llega hasta la cota donde está ubicado el tubo de entrada de cada una. Sus finalidades son principalmente tres:
    - Proporcionar información para poder hacer un perfil de concentraciones de las avenidas
    - Proporcionar información sobre la altura de la avenida gracias a saber hasta que botella hay sedimentos y agua
    - Conocer la concentración de sedimento en las crecidas.

  Las limitaciones que presenta este sistema es que parte de la hipótesis que afirma que una vez se ha llenado la botella con agua y sedimento ya no entra más sedimento ni se produce renovación del agua, determinando de este modo la concentración como la relación entre el sedimento y el volumen de agua. Resulta que una vez comprobados los resultados y comparándolos con los otros sistemas, se observa que la hipótesis de partida no se cumple y lo que realmente se obtiene es el valor del sedimento acumulado en la avenida. Luego, no sabemos la cantidad de sedimento para cada instante ni tampoco el periodo de tiempo en el que se ha producido el llenado de las botellas.

  En la figura 4 se puede observar el *conjunto de botellas.*

Figura 4. Detalle del *conjunto de botellas*

- Sistema de medición *Isco* formado por un contenedor de muestras y dos sistemas de succión colocados en el río a una cierta altura cuya función es la de absorber, como si fueran aspiradoras, el agua y el sedimento en suspensión presentes en un momento dado. La succión la realiza de forma discontinua cada cierto tiempo en situaciones de avenida y lo almacena en el contenedor como muestra identificada con fecha y hora. Por lo tanto, gracias a este sistema se puede conocer la concentración en g/l, así como la granulometría del sedimento que se transporta en un cierto instante de tiempo.

  Las concentraciones determinadas por este sistema se consideran correctas y sirven de referencia de cara a comparar con los resultados de los demás instrumentos. El problema de este sistema es que para optimizar los recursos, ya que el número de muestras que pueden captar es finita, éstos se activan sólo en determinadas situaciones, por lo tanto, no se tienen datos que permitan la comparación para todos los instantes de tiempo.

  Las limitaciones que presenta este sistema son diversas: una de ellas es que el número de muestras que puede captar es finito; otra es que a partir de cierta granulometría los sistemas de succión no absorben correctamente todas las partículas.

  Para el caso particular de Cal Rodó, los dos sistemas de succión están colocados a la misma altura y eso puede generar alteraciones en los resultados de uno sobre el otro. Además, si se colocasen a diferentes alturas se podría realizar un perfil de concentraciones mejorando así la caracterización del transporte de sedimentos de la cuenca.

Sistemas para medir la turbiedad

- Ultrasonidos

  La medición por ultrasonidos se basa en un emisor que emite una señal y un receptor que la recibe, y según las variaciones de frecuencia entre la onda emitida y la recibida, se obtiene un valor en mV que a partir de un ábaco de calibración permite determinar la concentración existente en el fluido.

  Los rangos de medida de este sistema van desde 20 g/l hasta 70g/l y toma datos cada 20 minutos en condiciones normales y en caso de avenida los toma cada 2 minutos.

  En el caso de estudio, la ubicación del ultrasonidos aguas abajo del aforador y próximo al salto de agua de éste puede producir errores de medida con las burbujas de aire que se generan por la turbulencia del agua.

- Turbidímetros:
  Otra forma de medir la concentración es a partir de *turbidímetros*, por ello, en Cal Rodó hay dos instrumentos colocados en el mismo punto que el ultrasonidos pero sus rangos de captación son diferentes.
  - Turbidímetro OBS cuya misión es determinar la turbiedad y que, como ya sucedía en los otros instrumentos, devuelve los resultados en mV que se han de convertir a g/l de concentración de sedimentos mediante un ábaco de calibración previamente confeccionado.

El rango de aplicabilidad del OBS es reducido: entre 0 y 7 g/l si se trata con materiales muy finos y llega hasta 25 g/l para materiales mayores.

Los problemas que presenta este sistema son principalmente dos: uno intrínseco al aparato que es que la calibración es compleja porque depende de la granulometría del material que haya en el flujo y en el caso de un río ésta no se puede conocer a priori. El otro problema es debido a su posición en Cal Rodó ya que los dos turbidímetros y el ultrasonidos están colocados en el mismo punto y eso puede generar interferencia entre ellos.

- Turbidímetro 2 que tiene un rango de captación comprendido entre 0 y 70 g/l. En este caso, los resultados los da en ppm y como se hacía en los casos anteriores, mediante un ábaco de calibración predefinido previamente se determina la concentración.

  Los problemas que presenta este sistema son dos: uno propio del aparato y es que sólo dispone de una memoria interna para registrar los datos, por lo que cada vez que se desea descargar la información es necesario extraerlo de su posición. Y el otro es la ubicación, que como ya se ha comentado, al estar varios sistemas tan cerca pueden influirse los unos con los otros.

Ambos turbidímetros, como sucedía con el ultrasonidos, toman datos cada 20 minutos en condiciones normales y en caso de avenida los toman cada 2 minutos

Un aspecto importante a comentar es que los instrumentos que miden la turbiedad están ubicados en una zona que tiene poca renovación del agua para caudales pequeños. En cambio, para caudales mayores, la recirculación que se produce es importante y por lo tanto, el mezclado es uniforme. Se considera necesario tener en cuenta esta información a la hora de trabajar con el registro de datos.

2.2.3.3 Velocidad

La velocidad es una magnitud importante de cara a caracterizar un flujo ya que da información de cómo fluye el fluido y a su vez, indirectamente también puede dar la caracterización sobre al calado, el ancho o el propio caudal a partir de la relación que existe entre ellos.

En Cal Rodó se optó por la instalación del Starflow 6526D que es un sistema de medida continuo basado en el efecto Doppler y que está dotado de un emisor y un receptor de sonidos, una sonda de presión para determinar el calado y un termómetro que mide la temperatura del agua. Su funcionamiento consiste en que el emisor emite un sonido a una frecuencia fija y éste rebota contra las diferentes partículas que transporta el agua como son las burbujas de aire, el sedimento o las ondas superficiales cambiando la frecuencia y es captado por el receptor que genera un perfil de velocidades a partir del cual automáticamente calcula la velocidad media del fluido.

Este instrumento está en la solera del aforador a 3.8 m de la sección de control y desplazado 0.5m a la izquierda5 del eje del río ya que es en este punto donde las velocidades son mayores debido a las características del río.

El Starflow emite el haz sonoro con una inclinación de 30º respecto la horizontal y con un ancho aproximado de 10º tal y como se indica la figura 5.

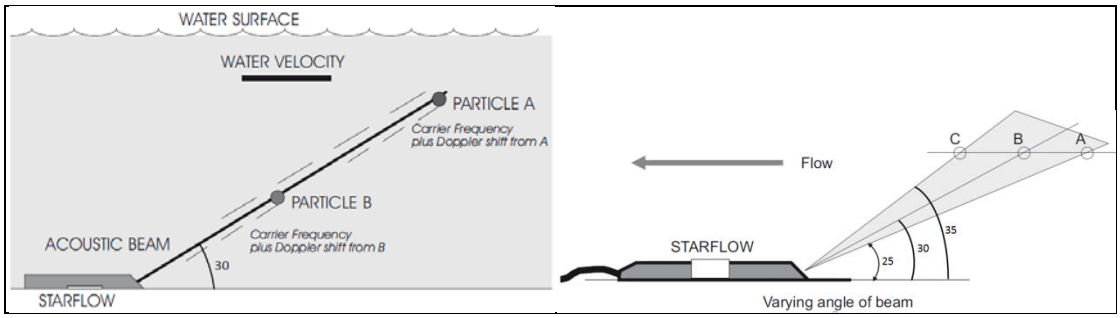


Figura 5. Detalle del rango de medición del Starflow

La medida de la velocidad mediante el sonido está relacionada directamente con la velocidad de éste en el agua que varía según la temperatura, por ello, según la temperatura del agua es necesario aplicar un coeficiente corrector aportado por el propio fabricante.

Una ventaja importante del Starflow es que no necesita de calibración inicial ni tampoco del uso de ábacos para convertir los resultados, ya que éste los da en las unidades propias de la medida.

Los problemas y limitaciones que presenta este instrumento se detallan a continuación:

1. Como ya se ha comentado, el funcionamiento del Starflow consiste en emitir una señal que rebota en las partículas que se desplazan solidarias con el agua y calcular su velocidad. El problema surge cuando las partículas presentes en el fluido no se desplazan solidariamente con éste sino que se desplazan a velocidades diferentes como sucede por ejemplo por la presencia de peces, de partículas de gran tamaño en suspensión o de partículas que se desplazan por saltación por el fondo entre otros muchos. La presencia de estos cuerpos genera medidas puntuales inesperadas que deberían obviarse, pero como el instrumento hace la media de forma automática considerando todos los valores, resulta que la media no es del todo correcta.

2. Otro de los problemas que presenta es su "campo de detección", es decir, el rango de calados hasta donde llega a medir. Según el manual facilitado por el fabricante, el "campo de detección" del Starflow se extiende al menos la longitud de un metro del haz sonoro en agua limpia y un poco menos en agua con sedimento[26]. Como ya se ha comentado, el haz forma un ángulo de 30º con la horizontal, por lo que, el calado al cual llega al menos el haz sonoro es de 0.5 m en agua limpia y menos en agua con sedimento.

3. Esta es una limitación a tener en cuenta si se trabaja con calados importantes o con cargas de sedimentos considerables ya que no se sabe hasta qué calado mide el instrumento, por lo que si hay una avenida cargada con sedimento no se sabe si detecta todo el perfil de velocidades, o por el contrario, sólo detecta las velocidades de los primeros centímetros. Conocer la altura

[5] Cuando se hable de la posición en el río o en el canal, la dirección de referencia es el sentido de la corriente.

hasta donde se producen las medidas es importante ya que en el caso en que sólo considere los primeros centímetros de calado, estará infravalorando la velocidad media de la avenida.

4. Otra limitación que presenta son sus rangos de aplicabilidad en el caso de la velocidad que va desde un mínimo de 2.1cm/s hasta un máximo de 450cm/s y en el caso del calado que va desde un mínimo de 7 cm hasta un máximo sin especificar.

5. El Starflow es un sistema que debe colocarse en el fondo del río o del aforador y eso hace que el material transportado por el fondo pueda impactar contra él o pueda cubrirlo con sedimentos dejándolo inoperativo. Del mismo modo, puede suceder que se sitúe un objeto justo delante del emisor impidiendo la emisión del haz sonoro y por lo tanto, impidiendo la toma de datos. Estos hechos hacen que el instrumento descrito requiera de un mantenimiento y revisión adecuados y periódicos de cara a su correcto funcionamiento.

Según el artículo leído de la bibliografía[27] en el que se realiza una evaluación-comparación entre el sistema de medidas Starflow y el ADFM, se concluye que el Starflow da unos valores de velocidad media 24 por ciento superiores a la realidad en todos los ensayos. Esta coherencia en el error indica que el Starflow necesita de una calibración específica previa para la zona de estudio en función de las corrientes y los calados. Del mismo modo, otra conclusión que se extrae del documento es que la calidad del agua, el transporte de sedimentos y las condiciones hidráulicas del sonido pueden afectar al rendimiento del instrumento, por lo tanto, es información que se tendrá que tener en cuenta al trabajar con este instrumento.

Como sucedía también con los instrumentos ya explicados, la toma de datos se realiza cada veinte minutos en condiciones normales y cada dos minutos en caso de avenida.

2.2.3.4 Caudal

Los aforadores se diseñan con la finalidad de conocer, mediante una relación empírica entre calado y caudal conocida con el nombre de ecuación de desagüe, el caudal que fluye a través de ellos una vez conocido el calado.

El aforador de Cal Rodó no tiene una sección de control “típica”, motivo por el cual la relación caudal-calado no se encuentra en la bibliografía y se tuvo que realizar un modelo físico a escala, que se ensayó en el canal de la UPC, para determinarla.

Modelo físico UPC

El modelo físico de Cal Rodó, cuyas dimensiones son 60 cm de ancho, 47.4 cm de largo y 15.3cm de altura, se realizó a escala 1:11 con metraquilato transparente, material que presenta un coeficiente de rozamiento reducido con el agua y que por ser transparente permite apreciar los fenómenos hidráulicos que tienen lugar en su interior. Como sucede en la realidad, la sección de control del modelo tiene dos

secciones de características diferentes: los primeros 7.31 cm de altura tienen un ancho de 16.4cm y los siguientes 8.2cm un ancho de 32.8cm.

Los ensayos se realizaron con agua limpia en un canal de la UPC cuyas dimensiones son 20m de longitud, 0.6m de ancho y 0.6 m de alto y se impuso la misma pendiente que tiene el aforador en la realidad con el fin de realizar una caracterización lo más fiel posible: la pendiente aplicada fue del 0%. El caudal del ensayo se midió con un aforador triangular situado a la entrada del canal.

El nivel del agua en los ensayos se midió en el punto donde se localiza la sonda de presión, ya que es en este punto donde, en la realidad, se obtendrán los valores de calado.

El rango de calados fue entre 1.48cm y 15.62cm y el de los caudales entre 0.17 l/s y 27.85 l/s. A posteriori, para obtener los valores reales de calado y caudal, se multiplicaron los resultados obtenidos en el modelo por un factor de escala geométrica ($\lambda = 11 \pm 0.15$) y un factor de escala de caudal ($\lambda = 400 \pm 15$).

Se modelaron dos situaciones diferentes:

- Situación sin riberas: representación de la realidad que toma como hipótesis que las riberas que hay antes del aforador no influyen en las características del flujo.
- Situación con riberas: representación de la realidad que toma como hipótesis inicial que las riberas aguas arriba influyen en la hidráulica del río. Para representar las riberas se pusieron unas bolsas de arena que pretendían únicamente aproximar la influencia de las riberas.

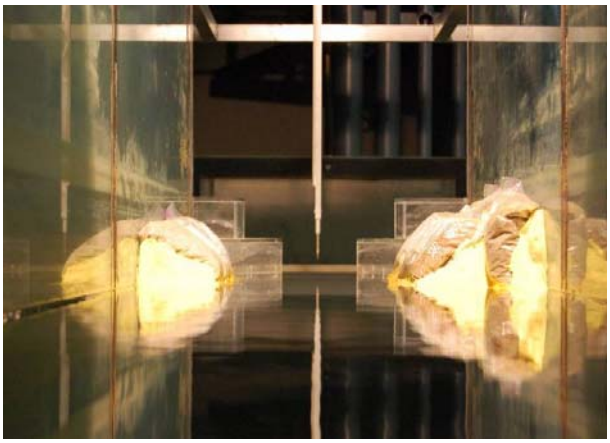


Ilustración 10. Detalle modelo físico visto aguas arriba

Ilustración 11. Detalle del aforador de Cal Rodó aguas arriba

A posteriori, comparando con los valores obtenidos en el aforador, se comprobó que la situación con riberas representa mejor la realidad ya que el modelo sin riberas infravalora los resultados. Esta afirmación se puede observar en la figura 6 donde se observan los datos reales captados por el Starflow en Vallcebre (puntos en negro y gris) y superpuestos en rojo y azul están los que se obtuvieron en el laboratorio. Se observa como los puntos rojos que corresponden a los datos de laboratorio con ribera son más próximos a los datos reales que los datos sin ribera (puntos azules).

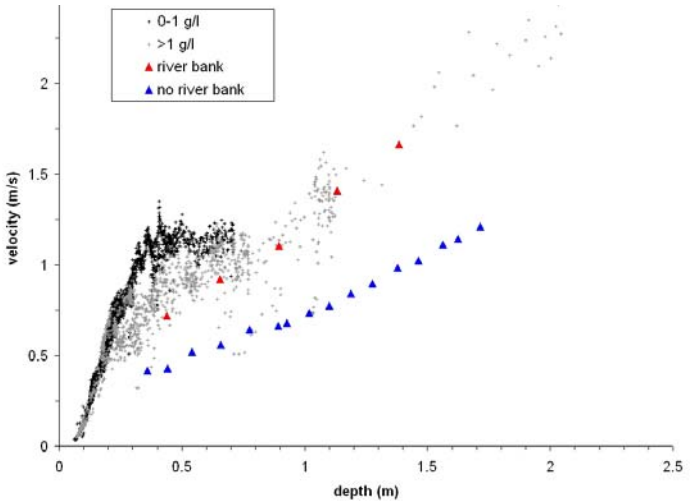


Figura 6. Representación de la velocidad respecto del calado. En negro y gris los datos obtenidos del caso real: Vallcebre; en rojo los datos del ensayo de laboratorio con riberas; en azul el ensayo de laboratorio sin riberas.

Determinación de las ecuaciones de desagüe

Para determinar la relación entre calado y caudal, es decir, la ecuación de desagüe lo se hizo fue comparar los datos reales del modelo con los datos obtenidos en el campo y se decidió dividir la curva Q-y en tres tramos en función del criterio de la toma de datos.

En el tramo número 1 los datos se obtuvieron con molinete[6] ya que el resto de instrumentos no permitían medir el rango de calado entre 0 y 10cm.

En el tramo número 2, cuyo rango de calado va desde 10 hasta 63.8cm, los datos fueron los obtenidos en el laboratorio con el modelo reducido sin riberas.

En el tercer y último tramo, los datos se obtuvieron de los modelos reducidos sin riberas y con riberas. Por lo tanto, la gráfica con los datos que se utilizaron para encontrar la relación son los indicados en la figura 7.

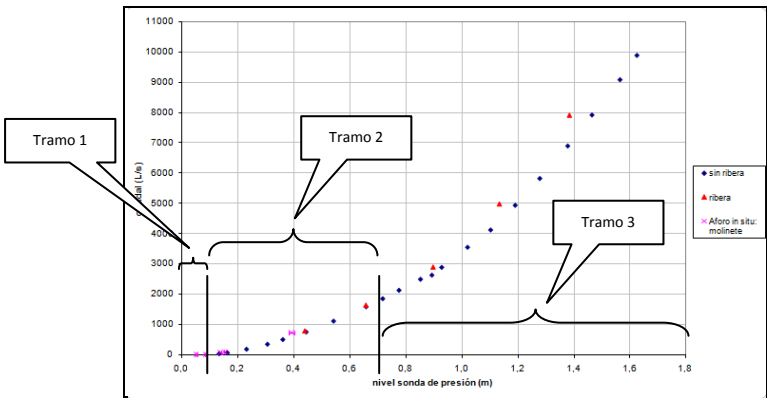


Figura 7. Datos experimentales obtenidos en los ensayos con el modelo físico. En rojo los datos para el modelo con ribera; en azul los datos del modelo sin ribera; en rosa los datos in situ tomados con molinete.

[6] El molinete es un instrumento de medida de la velocidad que consiste en una hélice sumergida en el flujo que gira alrededor de un eje situado a una cierta altura. Su funcionamiento consiste en contar el número de vueltas de ésta y aplicando una relación se obtiene la velocidad del flujo.

Con los datos recogidos se obtuvieron dos ecuaciones: una que está formada por tres expresiones polinómicas que corresponden a cada tramo antes mencionado y una segunda ecuación potencial única para todo el dominio del calado.

- Ecuación polinómica:

$$Q(y) = \begin{cases} Q_I(0.051 < y < 0.10) = 4.179 \cdot y^2 - 0.298 + 0.004 \\ Q_{II}\,(0.10<y<0.638) = 0.\ 239 - 6.013 \cdot y + 55.86 \cdot y^2 - 232.2 \cdot y^3 + 606.42 \cdot y^4 - (59.55 \cdot y^5 + 916.93 \cdot y^6 - 514.21 \cdot y^7 + 155.48 \cdot y^8 - 19.55 \cdot y^9 \\ Q_{III}\,(y > 0.638) = 0.418 + 2.632 \cdot y - 0.955 \cdot y^2 + 2.466 \cdot y^3 \end{cases} \quad (3)$$

Donde Q_i es el caudal en m^3/s del tramo i= 1,2,3 en l/s e y es el calado en metros.

El problema que pueden presentan las ecuaciones polinómicas es que a medida que se aumenta el grado del polinomio, las ecuaciones se ajustan al par de puntos dados pero no siempre cumplen con la región que los contiene. En cambio, las ecuaciones potenciales sí se ajustan a los puntos y a la región que contiene a éstos. En la figura 8 se representan gráficamente ambas situaciones. Se considera necesario comentar que en el caso de estudio, como se verá en apartados posteriores, no se da esta situación ya que ambas ecuaciones cumplen correctamente.

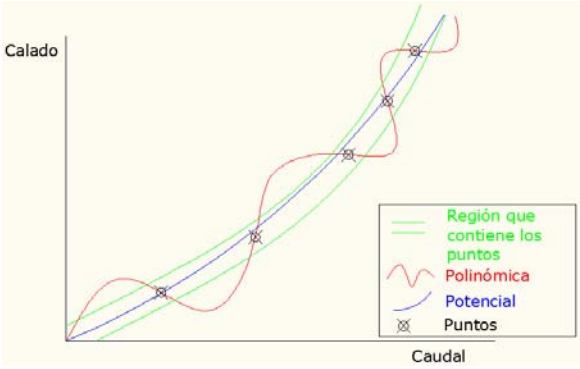


Figura 8. Posible problema de las ecuaciones polinómicas frente a las potenciales.

- Ecuación potencial:

Para determinar la relación potencial de desagüe se plantearon tres casos diferentes cada una con una hipótesis de cálculo:

- Caso 1: consiste en trabajar con los mismos puntos que se han considerado para determinar la ecuación polinómica anterior, es decir, los puntos de los tres tramos antes citados.

  La línea de tendencia es la que se observa en la figura 9 y su ecuación es $Q = 3.890 \cdot y^{2.466}$ con un valor $R^2 = 0.978$; Donde Q es en m^3/s y el calado es en metros.

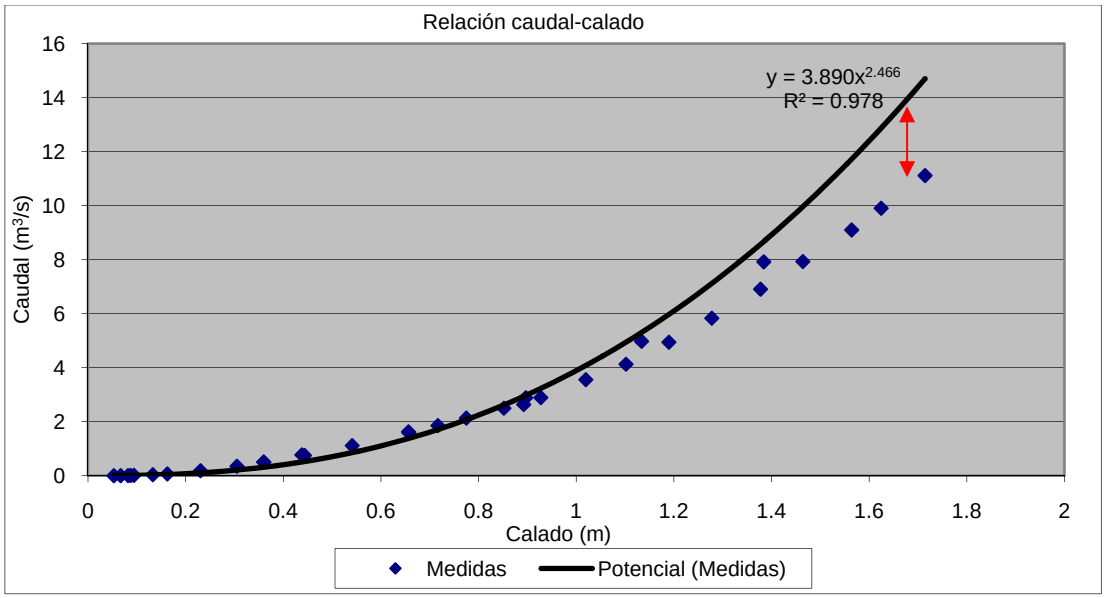


Figura 9. Relación caudal-calado para el caso 1.

Se observa que la línea de tendencia es una buena aproximación hasta el calado 0.9 metros pero para valores mayores no lo es.

- Caso 2: consiste en despreciar los puntos del tramo I ya que tienen mucha influencia en la línea de aproximación potencial y de los otros dos tramos sólo tener en cuenta aquellos puntos que corresponden al tramo en cuestión. Para este segundo caso se obtiene la relación potencial que sigue: $Q = 4.104 \cdot y^{2.203}$ con $R^2=0.994$. Donde Q es en m^3/s y el calado es en metros.

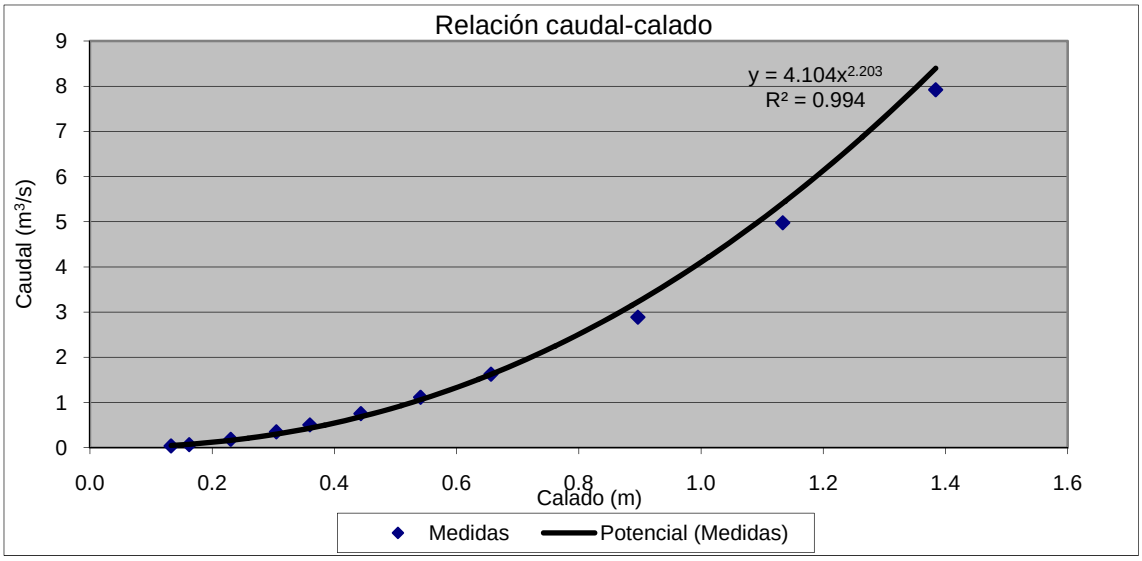


Figura 10. Relación caudal-calado para el caso 2.

En este caso se observa que si se desprecian los datos para los primeros 10cm de calado, resulta que la aproximación se ajusta mejor a todo el rango de calados restante. Se ha de tener en cuenta que en este caso, para los primeros 10cm, la aproximación con esta ecuación no será del todo correcta.

En la figura 11 se puede apreciar como la ecuación potencial del caso 2 sobreestima los caudales para los primeros 10 cm.

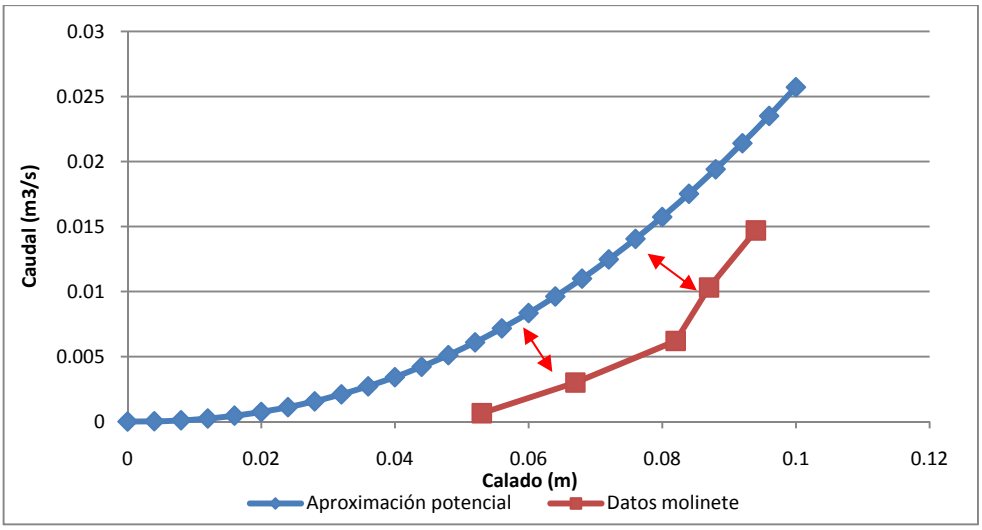


Figura 11. Detalle de la diferencia entre la aproximación del caso 2 y los datos in situ del molinete para los primeros 10 cm de calado.

- Caso 3: En este último caso, la hipótesis de la que se parte es que se desprecian los datos tomados in situ con el molinete (tramo I) y tanto para el tramo II como para el III, los valores que se tienen en cuenta son los obtenidos de los modelos reducidos con ribera y sin ribera. Aplicando esta hipótesis resulta que la ecuación de aproximación es $Q=3.663 \cdot y^{2.043}$ con un valor de $R^2=0.996$.

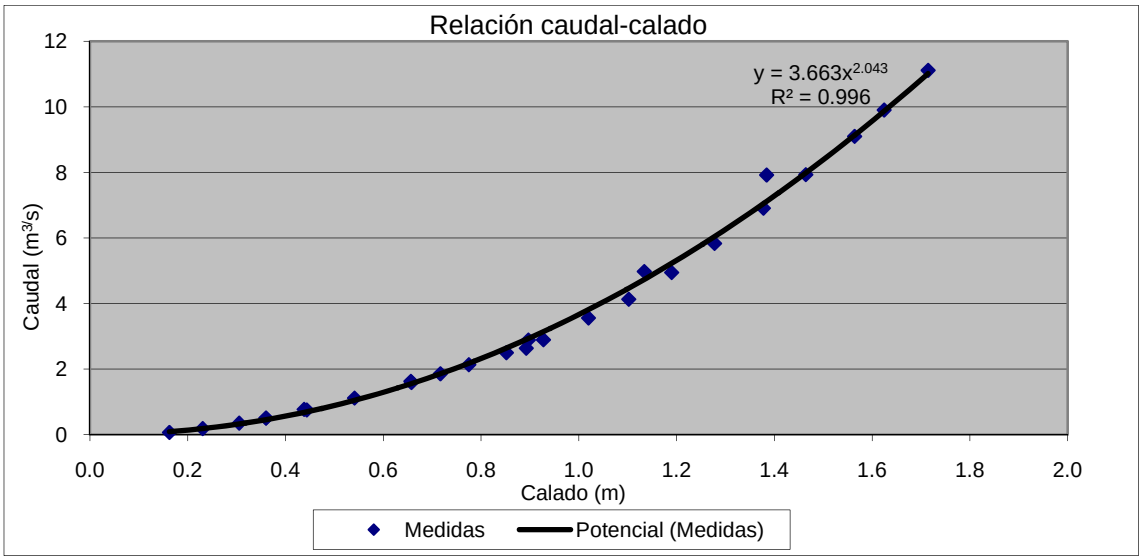


Figura 12. Relación caudal-calado para el caso 3.

En este tercer caso se comprueba que la ecuación se ajusta correctamente a gran parte de los puntos pero, aún y así, se considera necesario comentar que la línea de tendencia presenta un ajuste correcto para los datos del modelo sin ribera pero no tan bueno para los del modelo con ribera.

Por lo tanto, como ya se ha comentado en párrafos anteriores, si se comparan los datos experimentales con los datos del campo, los valores que representan mejor la realidad son los del modelo con ribera, por lo tanto, se cree conveniente que éstos tengan un peso importante en la calibración de la ecuación. Por ello, se ha optado por la relación de desagüe del caso 2.

$$Q = 4.104 \cdot y^{2.203} \qquad R^2=0.994 \qquad (4)$$

Como ya se ha dicho al principio del apartado, la experimentación con el modelo físico de Cal Rodó en el canal de la UPC se realizó con agua limpia, por lo tanto, las relaciones Q-y que se han determinado son para agua sin sedimento. El problema es que por el aforador de Cal Rodó circulará agua con carga de sedimento en suspensión e interesa saber si para estas condiciones las relaciones de desagüe halladas se conservan. Para verificar esta afirmación partiremos de la igualdad de energías de Bernoulli.

Demostración de que las ecuaciones de desagüe se cumplen en situaciones con y sin carga de sedimento

La ecuación de la conservación de la energía, también conocida como el trinomio de Bernoulli se define como la conservación de una cantidad de energía por unidad de peso:

$$z + y + \frac{v^2}{2g} = cte \tag{5}$$

Siendo v la velocidad media del fluido en m/s, y el calado en metros, z la cota en metros respecto los ejes de referencia y g la gravedad.

Si se expresa Bernoulli sin que sea por unidad de peso, se alcanzarán dos situaciones: una para el agua clara donde el valor del peso específico es γ; y otra para aguas cargadas con sedimento donde el peso específico será la suma del peso de las partículas en suspensión y del agua limpia (γ'). Sabemos que $\gamma' > \gamma$. Por lo tanto, resulta que la energía por unidad de volumen es:

Agua clara: $\gamma \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g}) = \gamma \cdot cte$

Agua con sedimento: $\gamma' \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g}) = \gamma' \cdot cte$

Una vez expresadas estas ecuaciones se plantea la cuestión de cómo poder relacionarlas. Es conocido por todos que si se supone que sólo hay fuerzas conservativas la energía se conserva y esta premisa permite relacionar dos situaciones o puntos diferentes del fluido. (Principio de conservación de la energía).

Por lo tanto, por conservación de energía en agua clara:

$$\gamma \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g})_1 = \gamma \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g})_2 \tag{6}$$

Lo mismo sucede en agua con sedimento en suspensión:

$$\gamma' \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g})_1 = \gamma' \cdot (z + y + \frac{v^2}{2g})_2 \tag{7}$$

Llegados a este punto, se considera interesante comparar una fase de agua clara con una de agua sucia. Un ejemplo real de esta situación sería el querer comparar el ascenso de una crecida con su descenso.

Resulta que en la primera situación hay una gran carga de sedimento en suspensión y en cambio, en la segunda, pasado el suficiente tiempo, se puede suponer que el agua que fluye es limpia.

$$\gamma\cdot(z+y+\frac{v^2}{2g})_1=\gamma'\cdot(z+y+\frac{v^2}{2g})_2\Rightarrow(z+y+\frac{v^2}{2g})_1=\frac{\gamma'}{\gamma}\cdot(z+y+\frac{v^2}{2g})_2 \quad (8)$$

donde $\gamma'>\gamma$ y por lo tanto, resulta que $\frac{\gamma'}{\gamma}\geq 1$.

Si se considera que la cota z es constante en ambos casos y que el calado en un lado de la igualdad es mayor que en el otro, resulta que para mantener la igualdad (8) la velocidad tiene que disminuir en el lado de calado mayor y a la inversa, aumentar en el lado de calado menor.

Se concluye que si se trabaja con fluidos que presentan las mismas características el peso específico no influye en los resultados ya que se simplifica en la igualdad. En cambio, sí que influye en situaciones con fluidos diferentes ya que el peso específico es distinto.

Del mismo modo, es conocido que en la sección de control de un aforador se da el calado crítico, es decir, el valor mínimo de la energía. Por lo tanto, si se determina el valor de la energía mínima se obtiene:

$$\frac{dHe}{dy}=\frac{d(\gamma\cdot(y+\frac{v^2}{2g}))}{dy}=\gamma\frac{d(y+\frac{q^2}{2gy^2})}{dy}=\gamma(1+\frac{q^2}{2g}(-2)y^{-3}=0\Rightarrow\gamma(1-\frac{q^2}{gy^3})=0$$
$$\Rightarrow(1-\frac{q^2}{gy^3})=0 \quad (9)$$

Se observa como el peso específico γ desaparece y no tiene influencia alguna en la relación de desagüe que se da en el aforador. Por lo tanto, si se considera que la energía mínima en las situaciones con y sin sedimento es la misma por definición de aforador, queda demostrado que la relación Q-y es equivalente a Q_m-y_m donde el subíndice m indica que son variables de la mezcla (agua + sedimentos).

En resumen, se ha demostrado que la relación empírica de desagüe que se obtuvo de las experiencias con el modelo físico en el canal de la UPC con agua limpia, también es válida para aguas cargadas con sedimento.

2.2.3.5 Datos obtenidos

La instrumentación descrita en los párrafos anteriores ha permitido al equipo de trabajo del Institut Jaume Almera obtener unas series importantes de datos los cuales han sido almacenados cuidadosamente gracias al sistema data logger.

La relación de datos obtenidos y a partir de los cuales se realiza el estudio es:

- Fecha y hora de la toma de datos

- Velocidad obtenida por el Starflow
- Calado obtenido por el Starflow
- Calado obtenido con la sonda de presión
- Concentración captada por los turbidímetros
- Concentración de los Iscos
- Concentración del ultrasonidos
- Concentración del sistema de captación por botellas a varios niveles
- Temperatura obtenida con el Starflow

Los distintos datos captados se analizan, se tratan y se comparan entre ellos con el fin de poder sacar conclusiones que permitan entender mejor la dinámica e hidrología de un río mediterráneo de montaña.

Las crecidas que experimenta el río no siempre se consiguen caracterizar con todos los instrumentos ya que en algunos casos por ejemplo, se supera el límite superior de medición del instrumento y aparece un plano en la medición. Este problema suele suceder en los turbidímetros cuando la concentración supera su rango de medida.

Otro problema que se puede dar es que un instrumento deje de medir por fallos debidos a la crecida. Un ejemplo de esta situación es que el Starflow en una ocasión dejó de medir porque una piedra que se desplazaba por el fondo impactó contra él rompiendo el emisor y provocando que entrase agua inutilizándolo. Otras situaciones que pueden dar lugar a fallos en la medición es que debido a una gran crecida los instrumentos sean arrancados de su posición arrastrándolos aguas abajo o que los instrumentos se queden sin energía por falta de baterías perdiendo todos los datos registrados

En total se han podido caracterizar de forma óptima, es decir, con la mayoría de instrumentos, o al menos los más importantes, una veintena de avenidas. Otras muchas han sido caracterizadas sólo de forma parcial.

Toda la información obtenida ha permitido conocer un poco mejor la hidrología y el transporte de sedimentos en la zona.

2.3 Modelo analítico

El segundo pilar en el que se apoya el estudio de la presente tesina para poder cumplir los objetivos que se plantearon al principio es el estudio analítico mediante un modelo matemático sencillo.

2.3.1 Definición

Las modificaciones que el transporte de sólidos por el fondo y en suspensión imprime en el flujo pueden ser cuantificadas en primera instancia por la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento a un volumen de control unidimensional, y suponiendo que las fuerzas de peso y fricción están equilibradas. En este volumen de control entra agua sin transporte de sedimentos, y sale por el contorno de aguas abajo un flujo de agua turbia cargado con sedimentos en suspensión ya que a lo largo de éste se ha introducido material en suspensión. Éste es el fundamento principal del método basado en la idea original de García Nájera[28] y como ya se ha comentado, el transporte de fondo no se tendrá en cuenta en los cálculos.

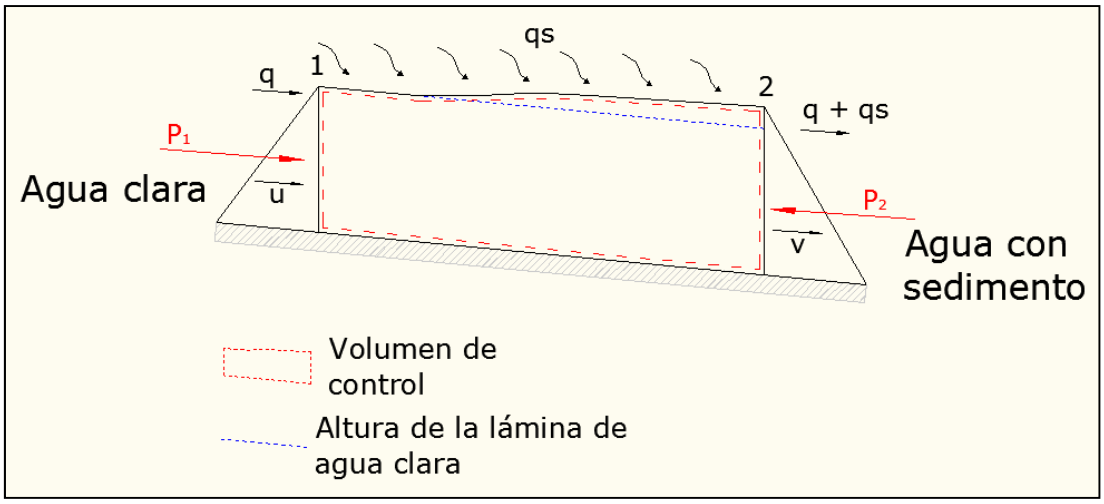


Figura 13. Esquema del modelo analítico

Para poder definir las ecuaciones que integran el modelo, éste se divide en un volumen de control infinitesimal y dos secciones de control localizadas aguas arriba (1) y aguas abajo (2).

Aplicando el teorema de la conservación de la cantidad de movimiento con las hipótesis de flujo unidimensional y estacionario, y suponiendo que las fuerzas de peso y fricción están equilibradas, el resultado es la siguiente ecuación de cantidad de movimiento:

$$\rho_1 \cdot Q_1 \cdot u + P_1 = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot v + P_2 \qquad (10)$$

Siendo P_i las fuerzas hidrostáticas y $\rho_i \cdot Q_i \cdot v_i$ las fuerzas de inercia en las secciones de control i = 1, 2.

$P_i = \gamma_i \cdot \overline{z_i} \cdot A_i = \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot B \cdot y_i^2$ por tratarse de una distribución de fuerzas triangular.

Donde Q es el caudal en m^3/s

ρ_1 es la densidad del agua sin sedimento en suspensión en kg/m^3

ρ_2 es la densidad de la mezcla y se define como $\rho_2 = \rho_1 + C \cdot (\rho_{ss} - \rho_1)$ en kg/m^3

C es la concentración en kg/m^3

ρ_{ss} es la densidad del sedimento en suspensión cuyo valor es 2000 kg/m^3

$\gamma_i = \rho_i \cdot g$ son los pesos específicos de los fluidos en N/m^3

$\overline{z_i}$ la distancia al centro de gravedad de las respectivas áreas mojadas A_i en m.

v la velocidad del flujo cargado con sedimento y u la velocidad del agua sin carga en m/s

Como notación se aplica que $y_1 = y$ para agua sin carga y $y_2 = H$ para agua cargada.

$$\rho_1 \cdot Q_1 \cdot u + \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot y^2 = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot H^2 \qquad (11)$$

Se ha demostrado la expresión que se utilizará en el modelo analítico.

Si se divide la expresión por el ancho, resulta una expresión con valores por unidad de ancho.

$$\frac{1}{2}\cdot\gamma_1\cdot y^2+\rho_1\cdot q\cdot u=\frac{1}{2}\cdot\gamma_2\cdot H^2+\rho_2\cdot(q+q_{ss})\cdot v \qquad (12)$$

Además de esta relación, para poder calcular con el modelo analítico basado en la conservación de la masa, también son necesarias otras ecuaciones que se detallan a continuación:

- La conservación de la masa:

  Q_1 = u·y·B en la sección 1

  $Q_1 + Q_{ss}$= v·H·B en la sección 2

- La relación de desagüe obtenida de forma experimental

  Q_1 = f(y)

  $Q_1 + Q_{ss}$= f(H)

  Se considera necesario comentar, que tal y como se ha demostrado en el apartado2.2.3.1, las expresiones de desagüe para situaciones de agua clara y agua cargada con sedimentos cuyas notaciones son f(y) y f(H) son las mismas.

- La relación entre el caudal de agua limpia y de sedimento en suspensión es

  $$Q_1\cdot Cv = Qss \qquad (13)$$

  siendo $Cv=\frac{C\,(\frac{mg}{l})}{1\cdot10^6\cdot G}$ (constante volumétrica) (15)

  $G=\frac{\gamma_s}{\gamma}=\frac{\rho_s}{\rho}=2.65$

  C concentración de sedimento en suspensión en mg/l

El modelo descrito es un modelo reversible, es decir, se puede aplicar para obtener las propiedades del agua con sedimento a partir de los datos de agua clara o por el contrario, a partir de los datos de agua clara hallar las características del agua con sedimento.

2.3.2 Modelo analítico agua cargada con sedimento → agua clara

Este modelo se ha diseñado para situaciones reales en el campo ya que parte de los datos de agua cargada con sedimento y se obtienen las características del agua clara asociada.

El algoritmo matemático del modelo es el que sigue:

Paso 0: Los inputs necesarios son el calado (H), la concentración C y la ecuación de desagüe $Q_1 + Q_{ss}$= f(H) del fluido cargado con sedimento en suspensión.

Paso 1: Se determina el caudal $Q_1 + Q_{ss}$ para los diferentes calados a partir de la relación que existe entre ambos. (Anteriormente se ha demostrado que la relación $Q + Q_{ss}$= f(H) también es válida para situaciones de fluidos con sedimento.)

Paso 2: A partir de la relación de continuidad para la sección aguas abajo se determina la velocidad media de la sección

$$v = \frac{Q_1 + Q_{ss}}{H \cdot B} \quad (14)$$

Paso 3: Se resuelve un sistema formado por la ecuación anterior y la relación entre caudal sólido y caudal líquido para obtener los valores de Q_1 y Q_{ss}

$$\begin{cases} Q_1 \cdot Cv = Q_{ss} & (13) \\ Q_2 = Q_1 + Q_{ss} = v \cdot H \cdot B & (14) \end{cases}$$

Paso 4: Se halla el valor de la velocidad y el calado del agua limpia resolviendo un sistema formado por la relación de continuidad en la sección aguas arriba y aplicando la ecuación (14) de la conservación de la cantidad de movimiento.

$$\begin{cases} \rho_1 \cdot Q_1 \cdot u + \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot y^2 = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot H^2 & (11) \\ Q_1 = u \cdot y \cdot B & (16) \end{cases}$$

Realizando las sustituciones oportunas, se llega a una ecuación de tercer grado que se optó por resolver por el método de Newton Raphson[7] ya que aún siendo un método abierto, es decir, que su convergencia no está garantizada, permite encontrar los ceros de la función de forma simple y rápida. Es un método que necesita de un valor inicial para comenzar la iteración, y es necesario que este valor sea cercano a la raíz para conseguir la convergencia. En el caso de estudio esto no es un problema ya que como dato inicial se introduce el calado del flujo ya caracterizado y se sabe que el resultado será próximo a éste, por lo tanto, el valor inicial es cercano a la raíz.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot B \cdot y^3 - \left[\frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot B \cdot H^2 + \rho_2 \cdot \frac{{Q_2}^2}{H \cdot B}\right] \cdot y + \rho_1 \cdot \frac{Q_1^2}{B} = 0 \quad (17)$$

Se recuerda que el ancho no es un valor constante, sino que como se ha explicado en el apartado 2.2.1, varía en función de la posición ya que la sección del aforador se estrecha a medida que se avanza aguas bajo.

Por tratarse de una ecuación polinómica de tercer grado, resulta que se obtienen tres soluciones: dos positivas y una negativa. La negativa no se considera porque el calado no puede ser negativo y las dos positivas se analizan y se decide cuál de las dos es correcta en función de la bibliografía y de la propia física. En ocasiones, es fácil discernir cuál de las dos es correcta ya que hay una de las dos que resulta exagerada. En cambio, otras veces la decisión es muy compleja. Se analiza con más detalle en el apartado 3.3.1 de este mismo documento.

Por lo tanto, haciendo un breve repaso de los pasos más importantes, el modelo parte de la ecuación (11), de los datos de calado y velocidad del agua sin sedimento, así como de la concentración. Por lo

[7] Sea f : [a, b] →R función derivable definida en el intervalo real [a, b]. Se empieza con un valor inicial x_0 y se define para cada número natural n. Y así de forma iterativa hasta cumplir la convergencia impuesta.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}.$$ Donde f ' es la notación de la derivada de f.

tanto, se tiene una ecuación con ocho incógnitas tres de las cuales son conocidas, por lo tanto, quedan cinco incógnitas: el caudal de agua limpia y el de agua cargada con sedimento, la densidad de la mezcla y el calado y la velocidad del flujo cargado con sedimento. El caudal de agua limpia se obtiene a partir de la ecuación de desagüe ya que el calado es uno de los datos de partida. Una vez determinado éste, se puede calcular el de la mezcla a partir de las ecuaciones (13) y (14). Llegados a este punto sólo se desconocen la densidad, la velocidad y el calado de la mezcla. La densidad se calcula a partir de la concentración, mientras que la velocidad y el calado se obtienen de buscar las raíces de la ecuación (17) que se ha obtenido de hacer un sistema entre la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento (11) y la de continuidad (14).

2.3.3 Modelo analítico agua clara → agua cargada con sedimento

Como ya se ha comentado, el modelo analítico es reversible lo que permite también obtener las características de los flujos cargados con sedimento a partir de los flujos de agua clara. Este modelo es muy útil para trabajar con datos de laboratorio, ya que a partir de la información de agua clara se pueden determinar las características del agua cargada con sedimento.

El algoritmo del modelo cambia en algunos aspectos respecto al anterior:

Paso 0: Los inputs necesarios son el calado (y), la concentración C y la relación analítica entre caudal-calado (Q_1 = f(y) del fluido sin sedimento en suspensión.

Paso 1: Se determina el caudal Q_1 para los diferentes calados a partir de la relación que existe entre ambos: Q_1 = f(y)

Paso 2: Con la ecuación de continuidad para la sección aguas arriba se determina la velocidad media de la sección.

$$u = \frac{Q_1}{y \cdot B} \tag{16}$$

Paso 3: Se obtiene el caudal sólido Q_{ss}

$$Q_{ss} = Q_1 \cdot Cv \tag{13}$$

Paso 4: Se halla el valor de la velocidad y el calado del agua cargada con sedimento resolviendo un sistema formado por la ecuación de continuidad en la sección aguas abajo y aplicando la ecuación (11) de la conservación de la cantidad de movimiento.

$$\begin{cases} \rho_1 \cdot Q_1 \cdot u + \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot y^2 = \rho_2 \cdot Q_2 \cdot v + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot B \cdot H^2 & (11) \\ Q_2 = Q_1 + Q_{ss} = v \cdot H \cdot B & (14) \end{cases}$$

Se recuerda que el ancho no es un valor constante, sino que como se ha explicado en el apartado 2.2.1, varía en función de la posición ya que la sección del aforador se estrecha a medida que se avanza aguas bajo.

Como en el caso anterior, realizando las sustituciones oportunas, se llega a una ecuación de tercer grado que se optó por resolver por el método de Newton Raphson.

$$\frac{1}{2}\cdot\rho_2\cdot g\cdot B\cdot H^3-\left[\frac{1}{2}\cdot\rho_1\cdot g\cdot B\cdot y^2+\rho_1\cdot\frac{{Q_1}^2}{y\cdot B}\right]\cdot H+\ \rho_2\cdot\frac{(Q_1+Q_{SS})^2}{B}=0 \qquad (18)$$

Como ya se hizo en el apartado anterior, se recuerda que el ancho no es un valor constante, sino que varía en función de la posición ya que la sección del aforador se estrecha a medida que se avanza aguas bajo. Del mismo modo, también se recuerda que por tratarse de una ecuación de tercer grado se obtiene dos soluciones del calado: 2 positivas y una negativa de las cuales sólo una es correcta. La elección de ésta se realiza como en el apartado anterior.

Si se hace un breve repaso de los pasos más importantes, se puede decir que el modelo parte de la ecuación (11), de los datos de calado y velocidad del agua cargada con sedimento, así como de la concentración. Por lo tanto, se tiene una ecuación con ocho incógnitas tres de las cuales son conocidas, por lo tanto, quedan cinco incógnitas: el caudal de agua limpia y el de agua cargada con sedimento, la densidad de la mezcla y el calado y la velocidad del flujo sin sedimento. El caudal de agua con sedimento se obtiene a partir de la ecuación de desagüe ya que el calado es uno de los datos de partida. Una vez determinado éste, se puede calcular el del agua clara a partir de las ecuaciones (13) y (14). Llegados a este punto sólo se desconocen la densidad, la velocidad y el calado del agua sin sedimento. La densidad se calcula a partir de la concentración, mientras que la velocidad y el calado se obtienen de buscar las raíces de la ecuación (18) que se obtiene de hacer un sistema entre la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento (11) y la de continuidad (14).

2.3.4 Análisis del modelo genérico considerando el ancho de la sección y la ecuación de Chézy

El objetivo que se persigue en este apartado es el de valorar, antes de realizar ningún cálculo numérico, cuáles son los resultados que se pueden esperar de aplicar la ecuación (11) desarrollada en el punto anterior.

Si partimos de la ecuación en cuestión,

$$\rho_1\cdot Q_1\cdot u+\frac{1}{2}\cdot\gamma_1\cdot B\cdot y^2=\rho_2\cdot Q_2\cdot v+\frac{1}{2}\cdot\gamma_2\cdot B\cdot H^2 \qquad (11)$$

Aplicando la relación $Q_i = v_i \cdot A$ y sabiendo que $\gamma_i=\rho_i\cdot g$ resulta,

$$\gamma_1\cdot\frac{u^2\cdot A_1}{g}+\frac{1}{2}\cdot\gamma_1\cdot B\cdot y^2=\gamma_2\cdot\frac{v^2\cdot A_1}{g}+\frac{1}{2}\cdot\gamma_2\cdot B\cdot H^2\Longrightarrow$$

$$\gamma_1\cdot\left(\frac{u^2\cdot A_1}{g}+\frac{1}{2}\cdot B\cdot y^2\right)=\gamma_2\cdot\left(\frac{v^2\cdot A_1}{g}+\frac{1}{2}\cdot B\cdot H^2\right) \qquad (19)$$

Como ya se ha dicho, a lo largo del volumen de control se añaden partículas que por sus características no sedimentarán sino que se mantendrán en suspensión.

$$Q_2=Q_1+Q_{ss} \qquad (14)$$

$$Q_i=q_i\cdot B \qquad (20)$$

A_1 =B·y·k(y) y A_2 =B·H·k'(H) donde k() es un coeficiente geométrico en función del calado y que depende de la forma de las secciones de control.

Se considera que los coeficientes geométricos k(y) = k'(H) = k ya que las secciones aguas arriba y abajo sólo se diferencian geométricamente en la altura de la lámina de agua, no en la forma.

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{u^2 \cdot y \cdot k}{g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H \cdot k}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \quad (21)$$

Aplicando la ecuación de continuidad entre ambas secciones y sabiendo que la velocidad se puede expresar en función del calado a partir de la ecuación de Chézy considerando que la pendiente está considerada en la constante,

$$q_i = C' \cdot {y_i}^{3/2} \rightarrow u_i \cdot y_i = C' \cdot {y_i}^{3/2} \rightarrow u_i = C' \cdot {y_i}^{1/2} \rightarrow {u_i}^2 = C \cdot y_i \quad (22)$$

Ecuación de continuidad: $u \cdot y = v \cdot H \Longrightarrow u = \frac{v \cdot H}{y}$

Resulta,

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H^2 \cdot k}{y \cdot g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H \cdot k}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \Longrightarrow$$

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{C \cdot H^3 \cdot k}{y \cdot g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{C \cdot H^2 \cdot k}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \quad (23)$$

Para simplificar los cálculos con el fin de analizar la expresión se supone que $\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma$.

Arreglando la expresión se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{1}{2} \cdot (H + y) \cdot y = \frac{K \cdot C}{g} \cdot H^2 \quad (24)$$

Se observa que la relación entre el calado de agua limpia y el de agua con sedimento está influenciada por los posibles valores que pueda adoptar la constante de Chézy y el coeficiente geométrico K. Si se resuelve la ecuación (24) y se impone que ambos calados sean iguales, se obtiene que para C·K=g= 9.8 los calados son iguales (H=y). Para valores de K··C < 9.8 el calado H<y, es decir, el calado de agua sucia es menor al de agua limpia. Y para valores K·C> 9.8 el calado de agua limpia es menor al de agua con material en suspensión. (y<H). Por lo tanto, el resultado que aporte este modelo dependerá del valor del producto K·C.

2.3.5 Análisis de modelo genérico por unidad de ancho

En este apartado, como sucedía en el apartado anterior, el objetivo es determinar a priori sin realizar ningún cálculo de qué dependerán los resultados obtenidos con el modelo. La diferencia con el apartado anterior es que en este caso el estudio se realiza sobre la ecuación por unidad de ancho.

$$\boxed{\frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot y^2 + \rho_1 \cdot q_1 \cdot u = \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot H^2 + \rho_2 \cdot (q_1 + q_{ss}) \cdot v} \quad (25)$$

Aplicando la relación $q_i = v_i \cdot y_i$ y sabiendo que $\gamma_i = \rho_i \cdot g$ resulta,

$$\gamma_1 \cdot \frac{u^2 \cdot y}{g} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_1 \cdot y^2 = \gamma_2 \cdot \frac{v^2 \cdot H}{g} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_2 \cdot H^2 \Longrightarrow$$

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{u^2 \cdot y}{g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \quad (26)$$

Aplicando la ecuación de continuidad entre ambas secciones y sabiendo que la velocidad se puede expresar en función del calado a partir de la ecuación de Chézy considerando que la pendiente está considerada en la constante,

$$q_i = C' \cdot {y_i}^{3/2} \rightarrow u_i \cdot y_i = C' \cdot {y_i}^{3/2} \rightarrow u_i = C' \cdot {y_i}^{1/2} \rightarrow {u_i}^2 = C \cdot y_i \quad (22)$$

Ecuación de continuidad: $u \cdot y = v \cdot H \Longrightarrow u = \frac{v \cdot H}{y}$

Resulta,

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H^2}{y \cdot g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{v^2 \cdot H}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \Longrightarrow$$

$$\gamma_1 \cdot \left(\frac{C \cdot H^3}{y \cdot g} + \frac{1}{2} \cdot y^2\right) = \gamma_2 \cdot \left(\frac{C \cdot H^2}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2\right) \quad (27)$$

Para simplificar los cálculos con el fin de analizar la expresión se supone que $\gamma_1 \approx \gamma_2 \approx \gamma$.

Arreglando la expresión se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{C \cdot H^3}{y \cdot g} + \frac{1}{2} \cdot y^2 = \frac{C \cdot H^2}{g} + \frac{1}{2} \cdot H^2 \Longrightarrow \frac{1}{2}(y^2 - H^2) = \frac{C \cdot H^2}{g} \cdot \left(1 - \frac{H}{y}\right) \Longrightarrow$$

$$\frac{1}{2}(H + y) \cdot y = \frac{C \cdot H^2}{g} \quad (28)$$

Se observa que la relación entre el calado de agua limpia y el de agua con sedimento está influenciada por los posibles valores que pueda adoptar la constante de Chézy. Si se resuelve la última ecuación y se impone que ambos calados sean iguales, se obtiene que para C=9.8 los calados son iguales (H=y). Para valores de C < 9.8 el calado H>y, es decir, el calado de agua sucia es mayor al de agua limpia. Y para valores C> 9.8 el calado de agua limpia es mayor al de agua con material en suspensión. (y>H). por lo tanto, el resultado que aporte este modelo dependerá de forma muy importante del valor de la C de Chézy.

2.3.6 Resultados del modelo

Como ya se ha comentado en los párrafos de los puntos anteriores, el modelo necesita de unos inputs que varían en función del algoritmo con el que se trabaje y que son el calado, la concentración y la relación de desagüe.

El modelo estudiado permite obtener varios resultados en función de lo que más interese al usuario. En el caso estudiado en este documento, el resultado que proporciona es el calado y la velocidad del flujo que se desea caracterizar. Pero para obtenerlos, previamente ha determinado los valores de otras variables que en según qué estudios puede ser interesante conocerlas.

El caudal con agua limpia, el de la mezcla, el caudal sólido, la relación existente entre caudales, la diferencia con el calado inicial, Froude, Reynolds, el coeficiente f de Darcy-Weisbach o la velocidad de corte son datos que el modelo calcula pero que para nuestro ensayo son secundarios.

2.3.7 Limitaciones del modelo

Como ya se ha anotado anteriormente, el modelo analítico que se evalúa es un modelo simple que nos permite obtener una primera aproximación de la relación existente entre las propiedades hidrológicas del agua cargada con sedimentos y el agua sin ellos.

Para su formulación se hacen varias hipótesis con el fin de simplificar la física de un fenómeno tan complejo como puede ser la influencia de los sedimentos en el agua. A continuación, se expondrán las distintas hipótesis realizadas y qué influencia tienen en los resultados.

- Hip. 1: Las fuerzas viscosas se desprecian.

  Es una hipótesis correcta ya que el número de Reynolds para ríos adopta valores elevados. Eso significa que las fuerzas de inercia son más importantes que las viscosas y, por lo tanto, éstas últimas se pueden despreciar.

- Hip. 2: las fuerzas de fricción no se consideran en el modelo.

  Se considera que es una hipótesis importante y su justificación es compleja. Las fuerzas de rozamiento no se tienen en cuenta en las ecuaciones matemáticas que describen el modelo; pero en cambio, sí que se consideran a la hora de estimar el caudal ya que la constante de Chézy (C) las considera. Por consiguiente, se considera que aunque no estén integradas dentro de la formulación del modelo sí que están de forma intrínseca en las ecuaciones de caudal.

- Hip.3: Régimen uniforme y permanente

  Estas situaciones se pueden llegar a conseguir en el laboratorio, pero en cambio, en la hidráulica de un río es muy poco probable. Aún y así, cuando las concentraciones sólidas alcanzan como máximo valores del 40% y la pendiente máxima no supera el 20%, tiene sentido utilizar la noción de régimen permanente y uniforme [29]

- Hip. 4: no se considera transporte de fondo

  Esta afirmación es cierta para algunas situaciones, pero para otras no. Será cierta para aquellas situaciones en que se traten con fluidos hiperconcentrados donde el aumento de la densidad del flujo provoca una disminución de la velocidad de caída de las partículas muy finas. De igual modo, diversos autores [5] [6] [30] opinan que el aumento del transporte de sedimentos en suspensión va ligado con el crecimiento de la concentración de material fino en suspensión en los flujos hiperconcentrados turbulentos.

  A medida que la cantidad de sedimentos finos es mayor, más fácilmente puede el flujo transportar sedimentos en suspensión [5] ya que aumenta la capacidad de transporte porque disminuye la velocidad de caída de las partículas. Así mismo, la existencia de partículas finas (arcillas) en suspensión reduce también la velocidad de caída de las partículas más gruesas como la arena.

- Hip.5: Se considera el lecho del río fijo.

Se considera que no se produce erosión ni acreción en el lecho, por lo que la cota de éste se mantiene constante. Esta afirmación como en las anteriores, hay situaciones en que no se cumple. En el caso real de Vallcebre se ha verificado que sí se cumple después de comparar distintas secciones transversales que fueron representadas en espacios de tiempo distintos.

Una de las limitaciones que presenta el modelo si se consideran las variables por unidad de ancho es la de calcular correctamente el valor de la constante de Chézy ya que ésta tiene una influencia muy importante sobre los resultados. Concretamente, para aquellos valores cercanos al umbral C=9.8.

Del mismo modo, si se trabaja teniendo en consideración la geometría de la sección, se tendrá que tener especial cuidado con los valores del producto K·C ya que influye mucho en los resultados.

Así mismo, otra limitación que presenta el modelo estudiado es que sólo considera velocidades en el sentido longitudinal del río, pero se sabe que la velocidad del fluido es vectorial. Esta simplificación implica que a pesar de que la velocidad predominante es la que se ha considerado, las otras dos componentes también afectan al movimiento del fluido.

2.4 Caracterización del canal

2.4.1 Definición

El tercer pilar en que se basa esta tesina es el estudio experimental de las características hidráulicas en un canal de laboratorio. Como ya se ha comentado con anterioridad, este documento servirá como partida de una tesis doctoral que se realizará en los próximos años. Por ello, lo que se ha hecho en este apartado es caracterizar geométricamente e hidráulicamente el canal de la Facultad de Geología de la Universidad de Barcelona (UB), determinando sus propiedades, sus límites y su potencial.

El fin último de este apartado es el de comprobar la idoneidad de este canal de cara a su futura explotación en el doctorado. A pesar de ello, se ha hecho un pequeño ensayo con material en suspensión, concretamente harina de sílice, como primera aproximación.

2.4.2 Descripción de las instalaciones

Las instalaciones están formadas por el propio canal, un panel de control digital, 4 depósitos de PVC de $1m^3$ cada uno, un depósito de decantación, 2 bombas y un conjunto de canalizaciones necesarias.

Antes de proceder a la descripción de los componentes del canal, se hace una breve descripción del funcionamiento del mismo:

El sistema que se describe es un circuito de agua cerrado que, cuando no está en funcionamiento, el agua que circula por él está en reposo en el interior de los depósitos cuyo volumen máximo es de 4 m^3 (4 depósitos de 1 m^3). Una vez se pone en marcha desde el panel de control, el agua sale de los depósitos impulsada por una bomba hacia el extremo aguas arriba del canal, donde hay un difusor cuyo objetivo es disipar la energía consiguiendo situaciones más estables. Una vez pasa por el difusor, el agua supera la compuerta superior y fluye a lo largo del canal hasta el final de éste donde se encuentra con la compuerta de aguas abajo. Tras superarla, el agua es enviada a un decantador formado por 5 tramos

cuyo objetivo es reducir el sedimento en suspensión para no contaminar los depósitos. Del decantador, gracias a otra bomba, el agua es devuelta a los depósitos cerrando de este modo el circuito.

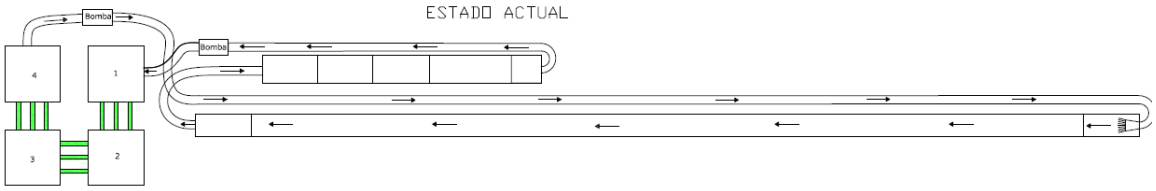


Figura 14. Planta de la situación actual del canal de la Facultad de Geología

2.4.2.1 Canal

El canal tiene una longitud de 17.06m, un ancho de 0.37m y una altura de 0.42m. Es importante comentar, que tanto en el extremo superior como en el inferior del mismo hay unos añadidos de longitud 0.965m donde se encuentran las compuertas que nos permiten regular las condiciones de contorno aguas arriba y aguas bajo, por lo que la longitud "efectiva" del canal es de 15.13m.

Las compuertas, que giran alrededor de una bisagra situada en la parte inferior, son dos rectángulos de plástico de ancho 0.37m y de longitud 0.49m la de aguas arriba y 0.41m la de aguas abajo cuyas inclinaciones se pueden modificar desde el panel de control gracias a unos pistones hidráulicos.

Los laterales del canal son de cristal transparente para facilitar así la observación directa de los fenómenos que tengan lugar en su interior.

El canal se puede inclinar longitudinalmente desde la horizontal hasta 5^{o} gracias a un sistema de suspensiones neumáticas formado por 6 pistones (3 a cada lado) cuyo control se realiza desde el panel central. El canal gira alrededor de una rótula situada a 1 metro del extremo aguas abajo y la parte por donde se levanta es el extremo más aguas arriba. Transversalmente no permite ningún tipo de inclinación.

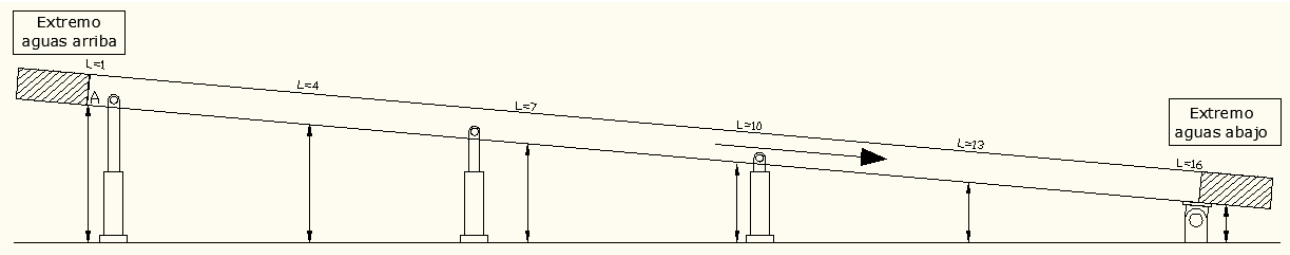


Figura 15. Perfil longitudinal del lado derecho del canal cuando éste tiene una cierta pendiente.

2.4.2.2 Bombas

En el sistema descrito son necesarias dos bombas: una para impulsar el agua desde los depósitos hasta el punto de inyección en el canal (a partir de ahora bomba depósitos-canal) y otra para evacuar el agua

del decantador(a partir de ahora bomba decantador -depósitos) hasta los depósitos para cerrar así el circuito.

Las características de ambas bombas son diferentes y se detallan a continuación:

Bomba	Caudal mínimo (l/s)	Caudal máximo (l/s)
Bomba depósitos-canal	1.67	12.5
Bomba decantador-depósitos	3.33	11.67

Tabla 2. Características de las bombas del canal

El caudal de la bomba que lleva el agua de los depósitos al canal está controlado por el panel de control, en cambio, la otra bomba se activa automáticamente cuando el nivel de agua en el decantador llega a una altura de 34 cm. Cuando se alcanza esta cota, se activa un servo-eléctrico que a su vez activa la bomba para evacuar el agua hacia los depósitos cerrando así el circuito.

2.4.2.3 Depósitos

El sistema está formado por cuatro depósitos de 1m^3 de capacidad cada uno que tienen forma de cubo de 1 metro de lado y están formados por dos partes: una interior de plástico que contiene el agua y otra exterior metálica cuya misión es la de resistir los impactos exteriores y evitar la deformación de la parte interior.

Como se observa en la figura 16, los depósitos están colocados 2x2 y la conexión entre ellos es a través de 3 tubos de diámetro exterior de 76mm y es tal que el fluido recorre un circuito pasando por todos: llega del decantador al depósito 1, de éste pasa al depósito 2, del 2 pasa al 3 y del 3 pasa al 4. En el primer caso, la situación de los tubos es 1 tubo abajo a 34 cm del suelo y 2 a media altura: uno a 52 cm y el otro a 60 cm; en el segundo y tercer caso: 2 tubos abajo: a 33 y a 31 cm; y 1 tubo a 60 cm.

El agua del canal se capta en el depósito número 4 mediante una única conexión localizada a 18 cm de altura y se capta mediante la bomba depósito-canal.

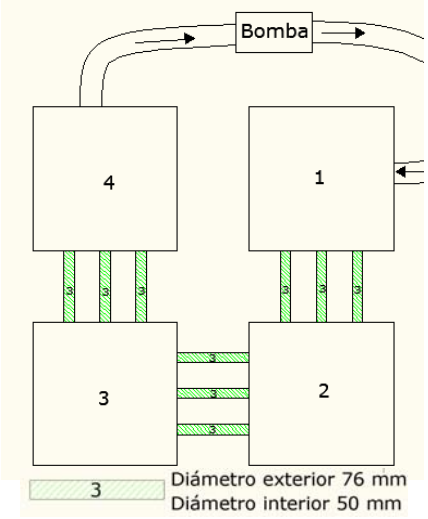


Figura 16. Depósitos del canal numerados y con sus respectivas conexiones actuales.

2.4.2.4 Depósito de decantación

Ortoedro de acero inoxidable de 1.30m de altura, ancho de 0.5m y longitud de 5,02m dividido en 5 secciones separadas entre ellas por compuertas verticales que se pueden desplazar manualmente en sentido vertical. Las dimensiones de las secciones se detallan en la figura 17.

La función del decantador es la de reducir el sedimento en suspensión que entra en los depósitos y los ensucia. Para lograrlo, el principio que sigue es reducir la velocidad del agua consiguiendo así una mayor decantación de los sedimentos en suspensión.

En este depósito hay instalado un sistema de servos-eléctricos cuya función es activar la bomba decantador-depósitos cuando el agua llega a una cierta altura en el interior (34cm) y de desactivar la bomba depósitos-canal cuando se llega a una cierta altura para evitar así que desborde.

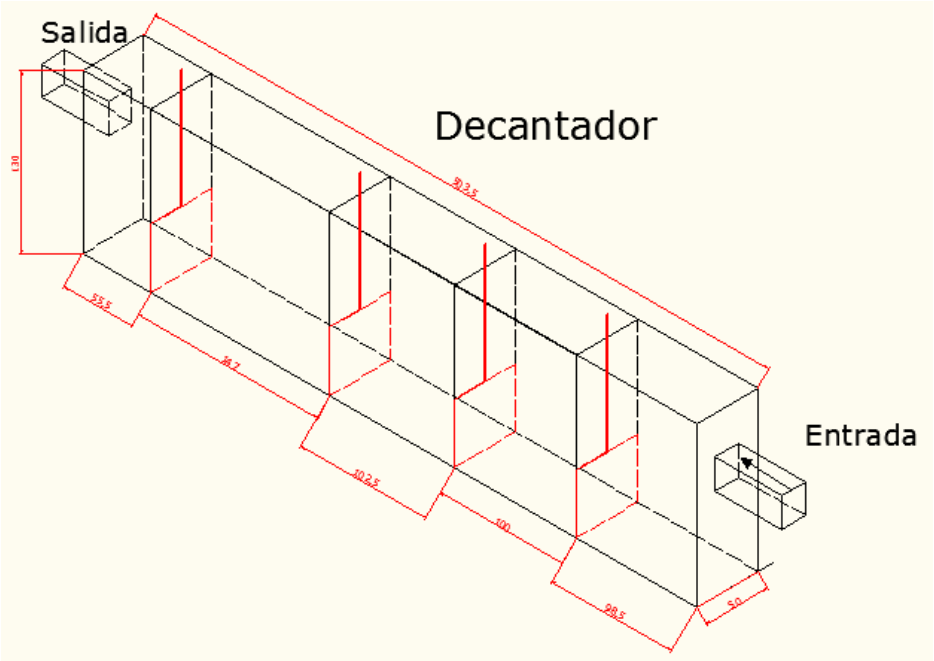


Figura 17. Detalle de la composición del decantador. Medidas en mm.

2.4.2.5 Panel de control

Es el cerebro de todo el sistema y se controla mediante una pantalla en la que aparecen las distintas opciones posibles entre las que destacan:

Selección del caudal

Posición de las compuertas

Altura del sistema para aplicar pendiente al canal

En la pantalla aparecen las distintas posibilidades que te permite el canal y su manejo es muy intuitivo.

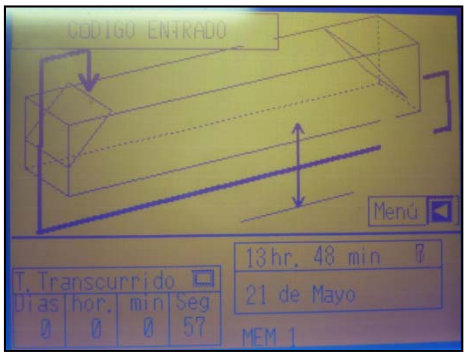


Figura 18. Detalle de la pantalla principal

Figura 19. Detalle de las distintas acciones que se pueden hacer sobre el canal.

Figura 20. Detalle de la pantalla de control sobre el caudal

Figura 21. Detalle de la pantalla de control sobre la inclinación del canal

Figura 22. Detalle de la pantalla de control sobre las compuertas.

Una vez descritas las distintas partes del canal y sus características geométricas, ahora se procederá a determinar sus características físicas y los límites asociados a cada una de ellas de cara a su futura utilización. Para desarrollar este estudio se partirá de los valores que proporciona la pantalla del panel de control y se verificarán en la realidad; y en los casos en que no se correspondan, el objetivo será realizar un ábaco entre los datos proporcionados por la consola y los datos reales, consiguiendo de este modo una herramienta para facilitar el uso del canal.

2.4.2.6 Caudal

Puesto que en el canal no se dispone de ningún sistema de medición de caudales, se ha optado por determinarlo de forma indirecta a partir de la velocidad y la geometría mediante la fórmula $Q = v \cdot y \cdot B$ donde Q es el caudal, v la velocidad, y la altura de la lámina de agua y B el ancho.

La velocidad se determinó mediante dos sistemas distintos: el molinete OTS posicionándolo a distintas alturas y el sistema doppler UNIDATA Starflow, las características de los cuales se detallan en el anexo 1. Ambos instrumentos estaban ubicados en el eje de simetría de la sección transversal del canal: el molinete a 8 metros y el Starflow a 11.18 metros de la compuerta superior. Más detalles en el anexo 2

Se realizó el estudio con ambos instrumentos principalmente por tres motivos:

2. El molinete es el sistema de medición que proporciona los valores de referencia ya que sus medidas, en teoría, no sufren ningún tipo de interferencia por presencia de sedimento. La

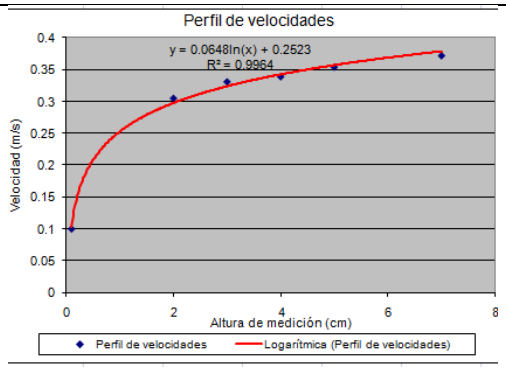
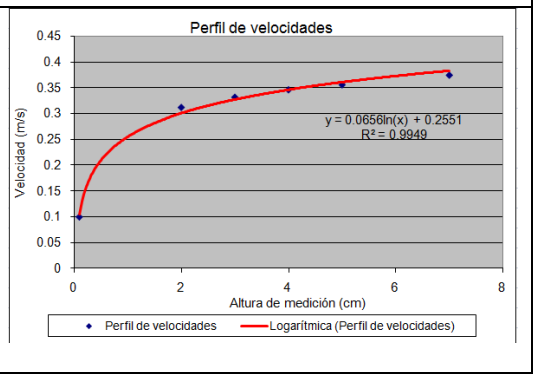
limitación de este instrumento en este ensayo es que la toma de datos con él es discontinua, lo que significa que no se tienen las velocidades para todos los instantes.

3. La limitación que presenta el molinete la solventa el Starflow ya que se trata de un sistema que toma medidas en continuo, pero a su vez, presenta la limitación de que sus mediciones sí que sufren atenuación por la presencia de partículas en el flujo.
4. Para poder valorar, calibrar y verificar las distintas mediciones, se realiza la toma de datos de forma simultánea con ambos instrumentos.

Es importante recordar, que el molinete es un sistema de medida puntual, es decir, da el módulo de la velocidad en un punto determinado. En cambio, el Starflow realiza un perfil de velocidades en la vertical y posteriormente calcula la media de éste. A pesar de ello, no mide la velocidad media de la sección transversal sino la media de la sección vertical localizada sobre él aguas arriba.

Con el molinete se tomaron medidas a distintas alturas para obtener el perfil logarítmico de velocidades propio de los flujos turbulentos y una vez obtenido, se determinó la ecuación logarítmica que los representa que permite extrapolar aquellos valores que no se habían podido tomar como el de velocidad máxima que no se pudo tomar ya que la hélice del molinete ha de estar completamente sumergida para tomar los datos.

Las ecuaciones para los caudales estudiados son:

Caudal indicado en el panel de control (l/hora)	Ecuación	Gráfica
10000	$v = 0.0648 \cdot \ln(x) + 0.2523$	
8500	$v = 0.0556 \cdot \ln(x) + 0.2551$	

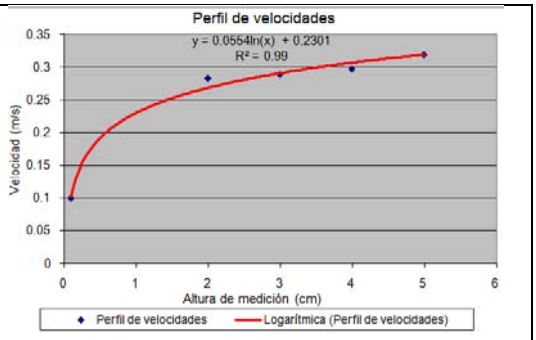
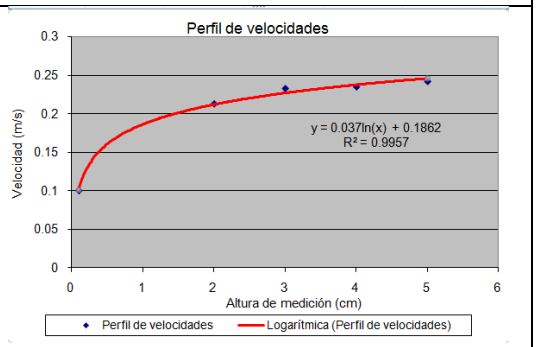
7500	v = 0.0554·ln(x)+0.2301	
5000	v = 0.037·ln(x) + 0.1862	

Tabla 3. Resumen de las ecuaciones logarítmicas y su representación en función de los caudales de ensayo

Para calcular la Vmedia se optó por hacerlo a partir de dos criterios y luego comparar los resultados:

1. La velocidad media de un perfil logarítmico corresponde al 85% de la velocidad máxima del perfil. Vmedia = 0.85·Vmáx
2. Cálculo de la integral de la ecuación logarítmica que describe el perfil de velocidades y se divide entre el calado. $$Vmedia = \frac{\int_{0.01}^{y} f(y)}{y} \quad (29)$$
   donde la velocidad v es en m/s y el calado y en centímetros.

La relación de datos que se obtuvieron en el ensayo se encuentra en el anexo 2, pero a continuación, se detallan los más importantes.

Q display	Calado	Vmáx punto medio	Vmedia=0.85·Vmax	Valor integral	Valor Vm integral	Vstarflow
l/hora	cm	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
10000	10,00	0,41*	0,34	3.36	0.34	0,35
8500	9.70	0.40*	0.34	3.21	0.34	0.33
7500	9,20	0,35*	0,30	2.73	0.30	0,30
5000	7,70	0,26*	0,22	1.72	0.22	0,24

Tabla 4. Resumen de las velocidades máxima y media según la forma de medición en función de los caudales de ensayo.

(*) se han calculado sustituyendo el calado máximo en las ecuaciones de regresión. Son valores extrapolados.

Se puede comprobar que tanto los valores de la Vmedia como los Vstarflow son casi idénticos, lo que nos hace pensar que el Starflow con agua clara y calados pequeños no sufre atenuación y que la velocidad media corresponde al 85% de la máxima.

Una vez comprobado que los valores obtenidos con ambos instrumentos coinciden y son correctos, se procede a comprobar si el caudal que indica el controlador es correcto para las distintas situaciones mediante la relación Q = v·Área.

Características del canal	Caudal controlador (l/hora)	Caudal real (l/h)	Caudal real (l/min)	Caudal real (l/s)	Caudal real (m^3/h)	Caudal real (m^3/s)
B = 0.37m Y = 0.100 m[8]	10000	46620	777,1	12,95	46,62	0,013
B = 0.37 m Y = 0.097 m	8500	42527	708,8	11,81	42,53	0,012
B = 0.37 m Y = 0.092 m	7500	36763	613,0	10,21	36,7632	0,010
B = 0.37 m Y = 0.077 m	5000	24615	410,2	6,84	24,62	0,007

Tabla 5. Relación entre el caudal indicado en la pantalla del controlador y el caudal real del canal

Se comprueba que el caudal del controlador es diferente al caudal real, por lo tanto, a la hora de trabajar con el canal se ha de ser consciente de esta situación. Para facilitar este trabajo se ha realizado un ábaco que relaciona el caudal del controlador en l/hora con el real en m^3/s.

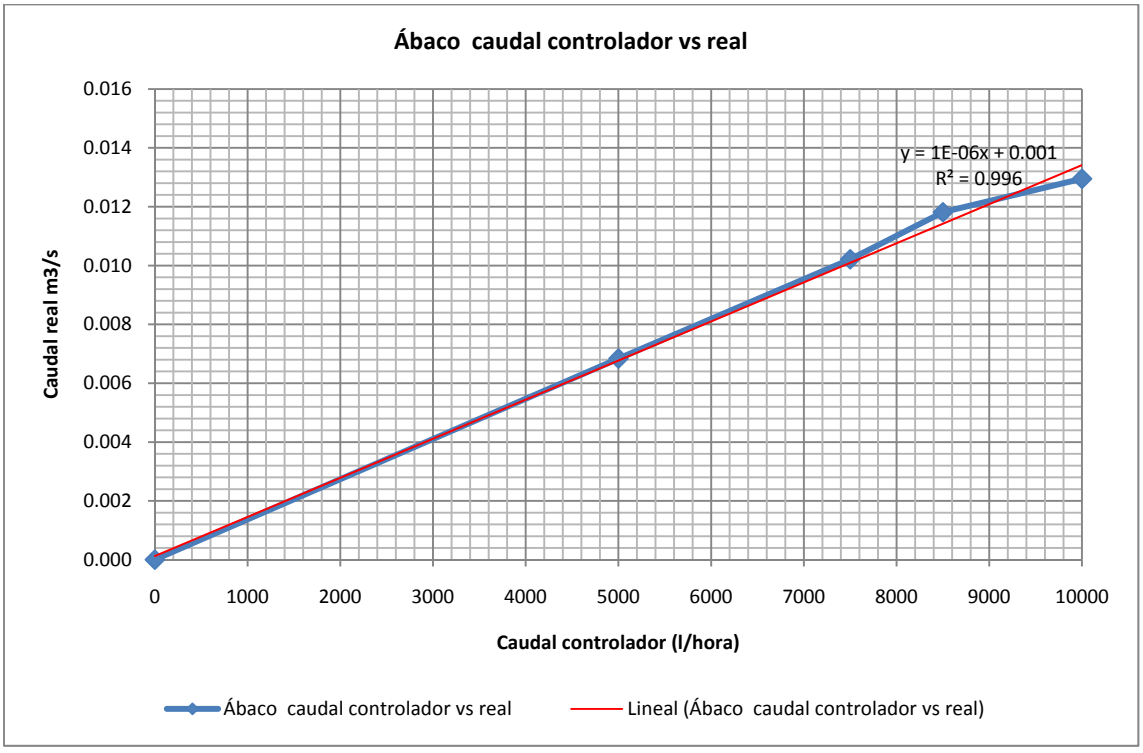


Figura 23. Ábaco de relación entre el caudal que indica el panel de control y el real

La ecuación que relaciona ambos caudales es:

[8] Calado medido con una regla graduada colocada en el canal.

$$Q_{real}\left(\frac{m^3}{s}\right) = 1 \cdot 10^{-6} \cdot Q_{controlador}\left(\frac{l}{h}\right) + 0.001 \qquad (30)$$

2.4.2.7 Pendiente

En el panel de control no se puede indicar explícitamente la pendiente que deseas sino el valor que introduces en ella es una altura del sistema en metros. El rango de alturas que se puede incorporar va desde 0 m (horizontal) hasta 1.29 m.

Los valores que se introducen en la pantalla no se corresponden a ningún valor referencia que se pueda medir directamente en algún punto arbitrario, por lo tanto, se ha optado por hacer un ábaco que relacione las alturas que indica la pantalla de la consola y la pendiente que corresponde a cada una de ellas.

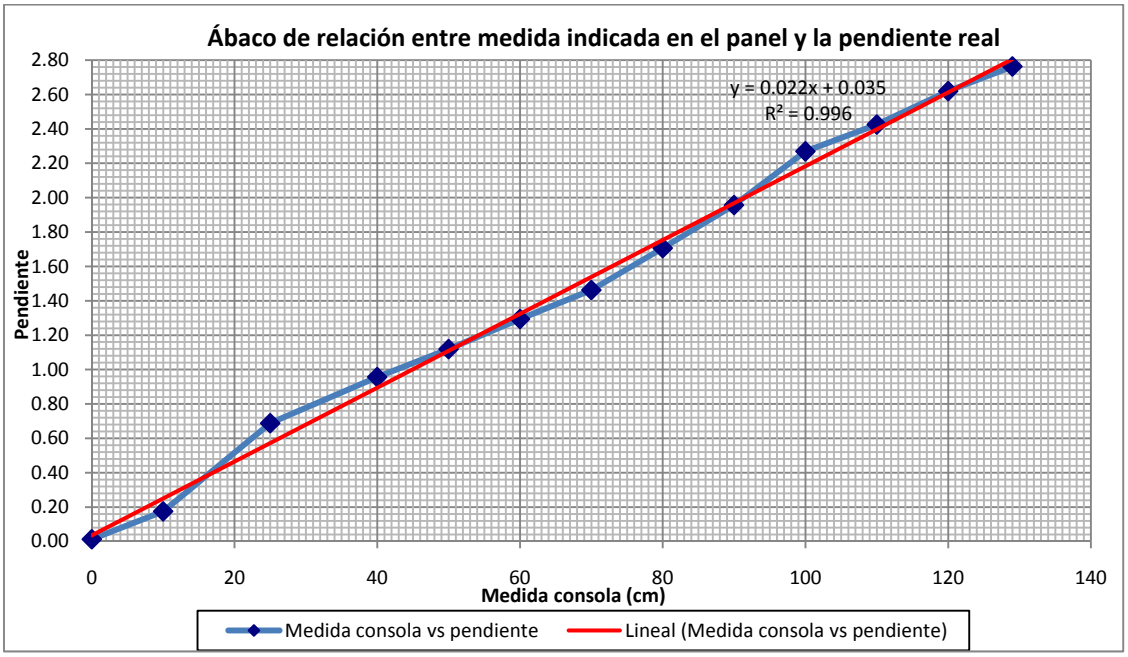


Figura 24. Ábaco de relación entre medida indicada en el panel y la pendiente real

Además, también se ha relacionado con una altura medida en un punto de referencia, que en nuestro caso está localizado en el punto A de la figura 25 y de la ilustración 12. Se ha optado por este punto ya que es el que experimenta mayores variaciones de altura y, por lo tanto, el error relativo de las medidas es menor.

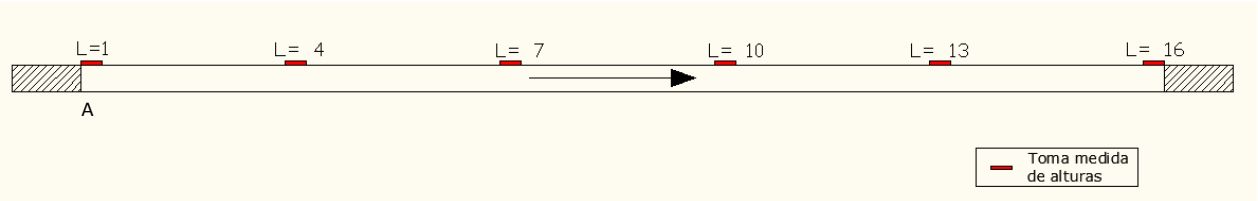


Figura 25. Planta del canal de la UB donde se indican los puntos de toma de medidas así como el punto de referencia A.

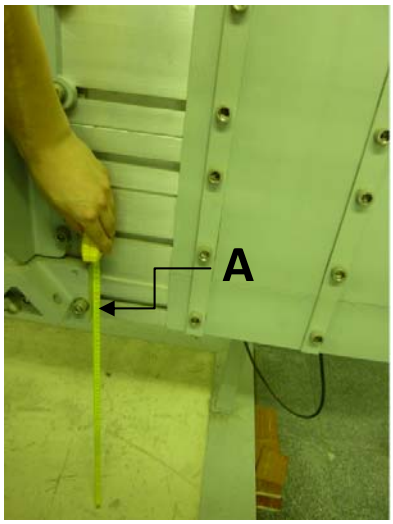


Ilustración 12. Detalle del punto de referencia A

Para poder realizar el ábaco, es necesario hallar para cada medida de la consola la pendiente asociada y también la altura del punto de referencia A. Además, para poder obtener una mejor medida de la pendiente también se han buscado las alturas de otros puntos.

Para calcular la pendiente se aplica la definición:

$$i = tg(\alpha) \tag{31}$$

Siendo α el ángulo de inclinación del canal.

En la tabla 6 se muestran las alturas en cm tomadas respecto al suelo en los distintos puntos situados a la distancia l del punto más aguas arriba del canal.

Medida consola (cm)	Punto ref. A (l=1m) (cm)	Punto l=4m (cm)	Punto l=7m (cm)	Punto l=10m (cm)	Punto l=13m (cm)	Punto l=16m (cm)	i (%)[9]
0	44,6	44,6	44,6	44,8	43,8	44,4	0,01
10	47,1	46,9	46,3	45,5	44,5	44,3	0,18
25	55	53	51	49	46	44	0,69
40	59	56,3	53,3	50,2	46,6	43,7	0,96
50	61,5	58,2	54,8	51,2	47	43,6	1,12
60	64,2	60,4	56,4	52,2	47,5	43,5	1,29
70	66,7	62,5	57,8	53,2	48	43,3	1,46
80	70.4	64.5	59.1	54.2	48.4	43.1	1.71
90	74.1	69.2	62.8	56.1	49.5	42.8	1.96
100	78,8	72	65,1	57,9	50,4	42,5	2,27
110	81.2	74.5	67.2	58.9	50.9	42.4	2.43
120	84.1	76.7	68.1	59.5	51.8	42.2	2.62
129 (máxima)	86,3	78	69,5	61	51,7	42,1	2,76

Tabla 6. Mediciones de las alturas en distintos puntos del perfil longitudinal en función de la altura indicada en la pantalla del controlador.

[9] Para calcular la pendiente se ha hecho la diferencia de alturas entre los dos extremos del canal y posteriormente, se ha dividido entre su longitud.

En la figura 26 se detallan los puntos de medida a lo largo del canal, en la ilustración 13 se indica cómo se realiza la medida y en la 27 se muestra el perfil longitudinal del canal en función del valor que indique la pantalla del controlador.

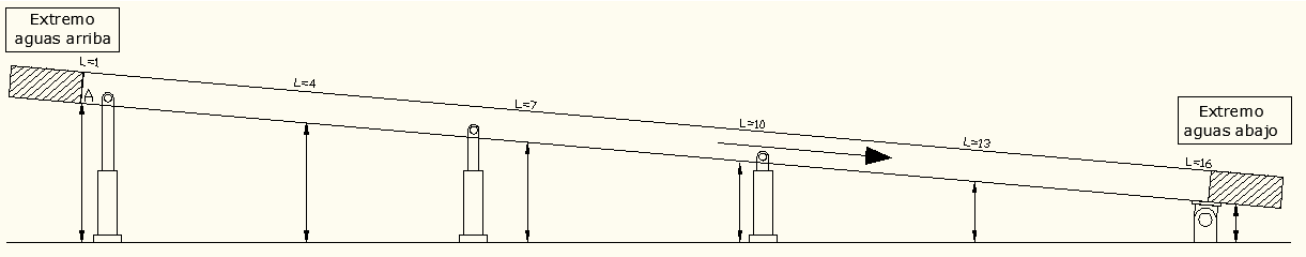


Figura 26. Perfil longitudinal del canal con detalle de los pistones neumáticos y de los puntos de medida de la altura.

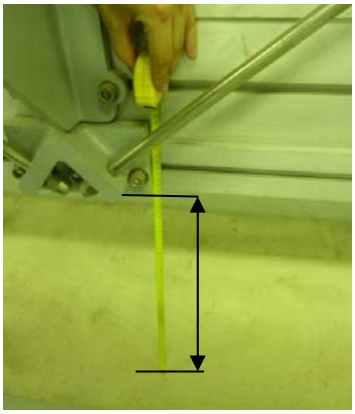


Ilustración 13. Detalle medición altura en L=7m

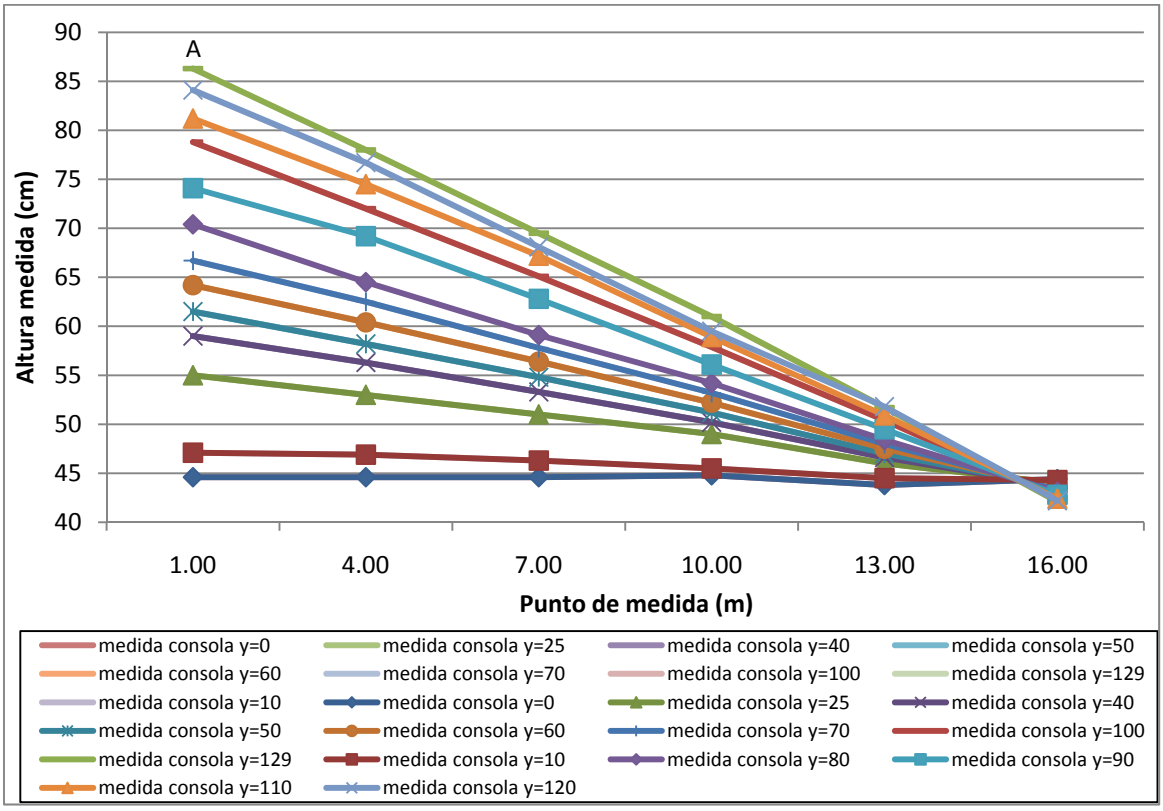


Figura 27. Perfil longitudinal del canal según la altura indicada en la consola

Por lo tanto, el rango de pendientes que puede simularse con este canal es de hasta el 2,76%.

2.4.2.8 Compuertas

Como ya se ha citado anteriormente, hay dos compuertas: una aguas arriba del canal y otra aguas abajo del mismo que son accionadas por unos brazos mecánicos impulsados por unos pistones neumáticos. Como sucede con el caudal y la pendiente, también se controlan desde la pantalla del panel de control.

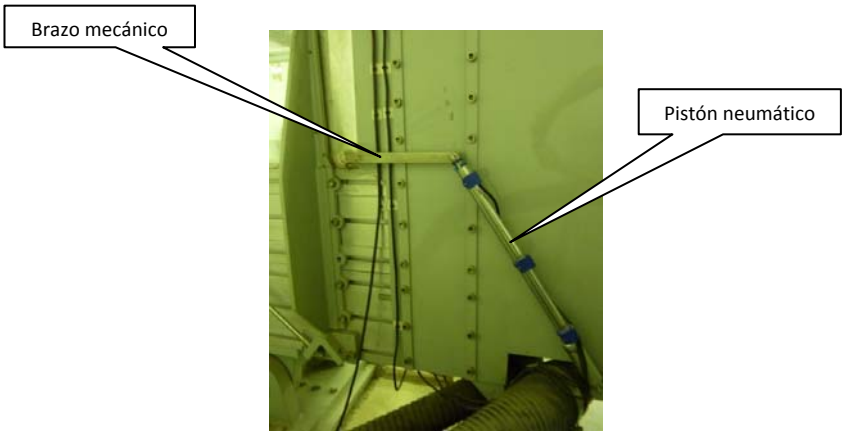
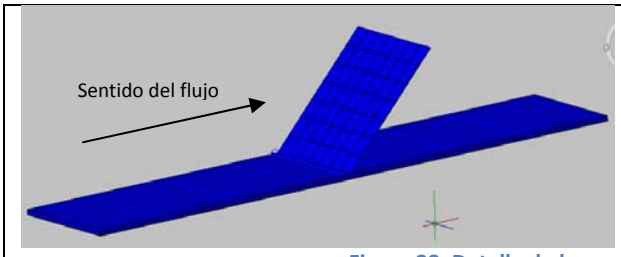


Ilustración 14. Detalle del brazo mecánico que acciona gracias al pistón neumático las compuertas del canal.



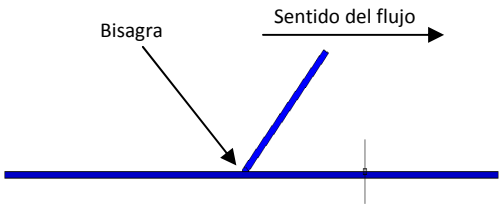
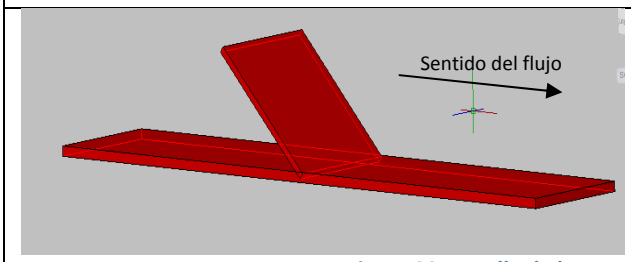


Figura 28. Detalle de la compuerta aguas abajo.



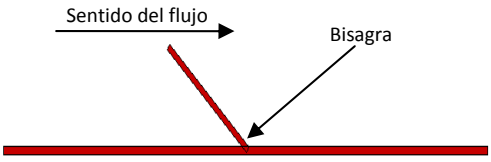


Figura 29. Detalle de la compuerta aguas arriba.

En este caso, en la pantalla del panel se introduce un ángulo de inclinación de las compuertas pero el valor indicado y el real no coinciden.

Como se ha hecho en los casos anteriores, también se realiza un ábaco como herramienta para facilitar su utilización pero en este caso se han comparado los ángulos que indica la pantalla con el ángulo que forma el brazo mecánico y la propia compuerta con la horizontal. A su vez, también se ha medido la altura que adquiere la compuerta. Todas las mediciones se muestran y se han realizado tal y como se ve reflejado en el anexo 2.

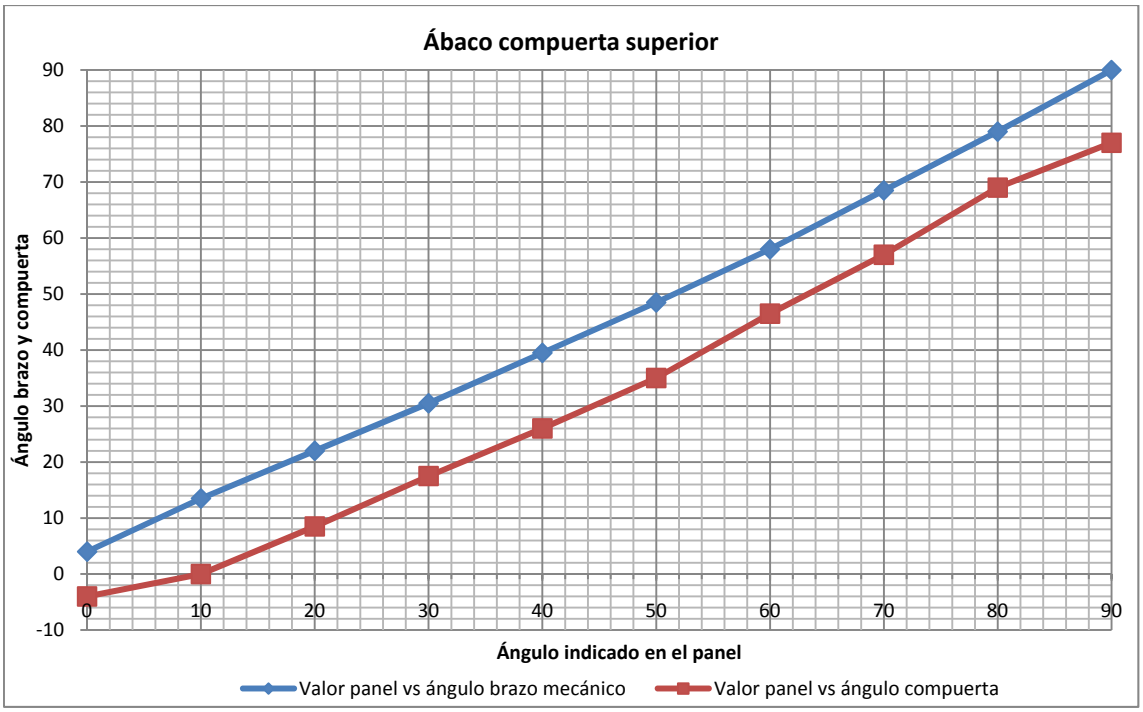


Figura 30. Ábaco de la compuerta superior que relaciona el ángulo indicado en el panel frente a los ángulos reales del brazo mecánico y la compuerta.

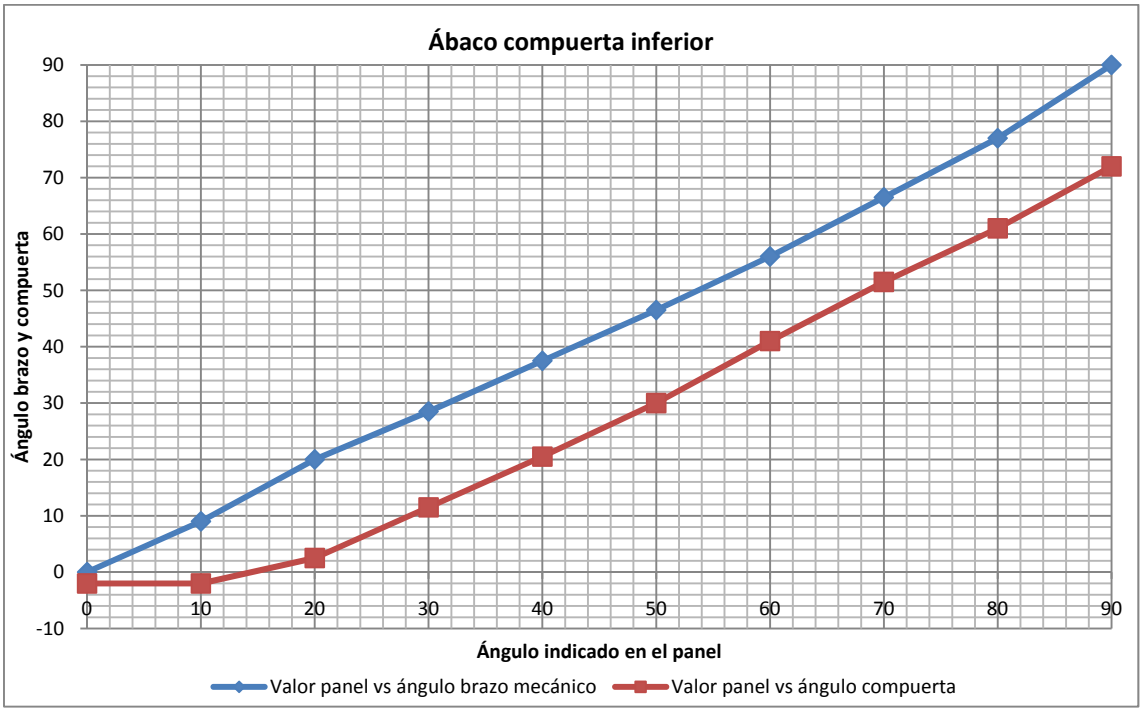


Figura 31. Ábaco de la compuerta superior que relaciona el ángulo indicado en el panel frente a los ángulos reales del brazo mecánico y la compuerta.

¿Cómo afecta la posición de las compuertas en el flujo?

Cómo afectan las compuertas al flujo es un tema un poco complicado de caracterizar ya que depende de variables como el caudal, la pendiente o el calado del canal.

A grandes rasgos la compuerta situada aguas arriba tiene la misión principal de aumentar la velocidad inicial del agua, y lo consigue gracias a aumentar su energía potencial inicial. Cuanto más vertical está la compuerta, mayor energía potencial tiene el fluido y por conservación de la energía, mayor será su velocidad una vez se supere la compuerta. Este aumento de la velocidad genera sobre la lámina de agua unas ondulaciones que no permiten establecer un régimen uniforme.

La compuerta situada aguas abajo no influye en la velocidad inicial del flujo sino en la curva de remanso que se genera a lo largo del canal debido a que la inclinación de éste es prácticamente nula. Por teoría se sabe que el régimen uniforme únicamente se alcanza en situaciones con pendiente (aunque ésta sea muy pequeña). Es en situaciones con pendiente muy pequeña en las que se busca alcanzar el régimen uniforme con la ayuda de la compuerta situada en el extremo inferior: si se dispone la compuerta horizontal no afecta al flujo y como se detalla en capítulos posteriores, se genera una curva de remanso M2. En cambio, si se levanta la compuerta el agua se va acumulando y acaba generando una curva M1. Al pasar de la M1 a la M2 hay una curva intermedia que es la del régimen uniforme que únicamente se da en el punto de transición entre ambas curvas. En la figura 32 se muestras las distintas posiciones de la compuerta y las curvas de remanso asociadas.

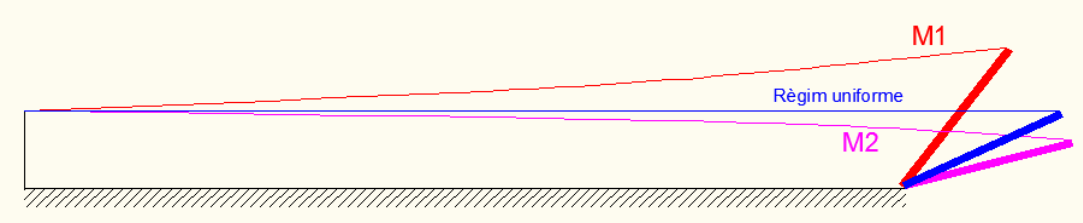


Figura 32. Detalle de las curvas de remanso aguas abajo del canal en función de la altura de la compuerta inferior

En resumen, la compuerta aguas arriba sirve para aumentar la velocidad inicial del flujo pero tiene el inconveniente de generar ondulaciones en la superficie de la lámina dificultando así el alcanzar el régimen uniforme, y la compuerta aguas abajo permite establecer el régimen uniforme aún cuando la pendiente del canal es cero.

2.4.2.9 Calado

El calado en el canal es una variable que depende principalmente de otras dos variables: el caudal y la pendiente del canal.

En el laboratorio se tomaron datos del calado en función de los valores de caudal y pendiente. La figura 33 nos muestra los resultados que se obtuvieron.

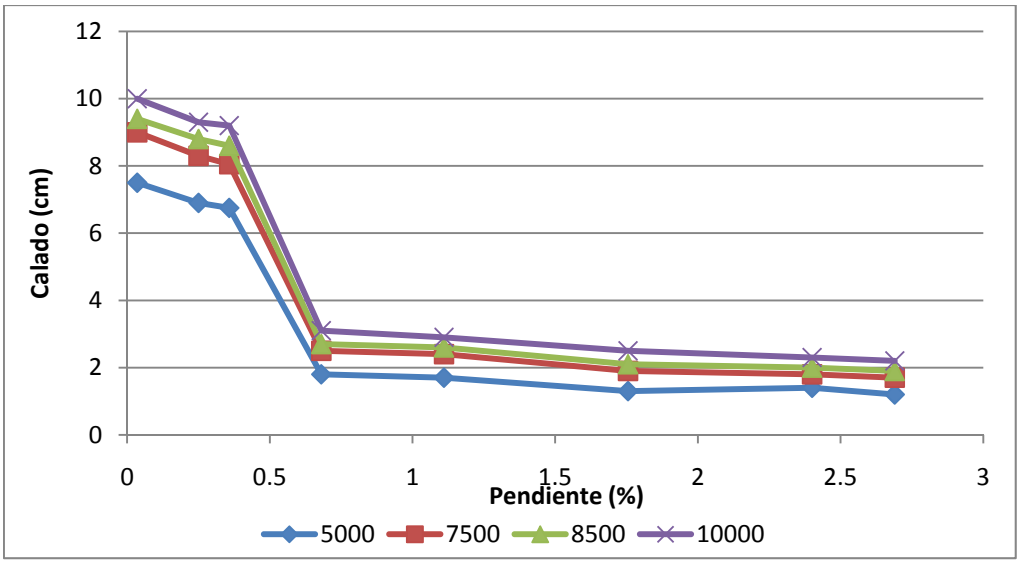


Figura 33. Calado en función de la pendiente del canal para los distintos caudales de estudio

Para poder explicar correctamente la figura anterior, primero es necesario explicar un fenómeno que sucede en el canal y que explica la discontinuidad entre los dos tramos que se observan en la figura, el resalto hidráulico.

Aguas abajo del canal hay una compuerta que para los ensayos realizados siempre ha permanecido horizontal sobre la solera del canal. El problema es que esta compuerta en reposo no queda por debajo del nivel del lecho del canal, sino que se apoya sobre él ocasionando un escalón de 2.5 cm, desnivel aguas abajo que provoca que el agua tras incidir contra él se refleje y suba aguas arriba en forma de frente de onda (resalto móvil) que va ascendiendo hasta que el flujo incidente lo compensa y queda el sistema en equilibrio tal y como se puede observar en la ilustración 15.

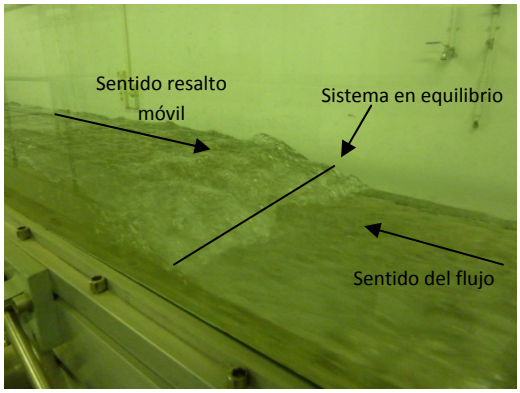


Ilustración 15. Detalle del avance del resalto móvil reflejado aguas arriba

La posición del resalto hidráulico depende principalmente de la velocidad del flujo ya que a mayor velocidad del agua que circula por el canal, más aguas abajo se ubica el resalto.

La velocidad está íntimamente relacionada con la pendiente y el caudal. A mayor pendiente y mayor caudal la velocidad aumenta y el frente se sitúa más aguas abajo.

La presencia de este fenómeno en un punto cualquiera del canal genera ondulaciones superficiales importantes aguas abajo de éste que, lo que implica que es complejo que se alcance régimen estacionario pasado éste.

Por lo tanto, para velocidades reducidas el resalto se sitúa en el inicio del canal aguas arriba que origina ondulaciones superficiales pero pasados unos pocos metros se alcanza el régimen estacionario con el que se puede trabajar. En cambio, para velocidades intermedias el resalto se posiciona en un punto a lo largo del canal lo que genera que haya dos calados conjugados: uno aguas arriba que corresponde al régimen rápido y otro aguas abajo correspondiente al régimen lento. La presencia de ambos regímenes permite realizar ensayos con las dos situaciones: la de régimen rápido en la que la velocidad es mayor pero el calado menor, y la de régimen lento en la que el calado es mayor pero la velocidad es menor. Se considera importante indicar que según en qué posición se sitúe el resalto, se puede dar el caso en el que el tramo de régimen lento situado aguas abajo no le dé tiempo a recuperar el régimen estacionario y por lo tanto, no se pueden hacer los ensayos que se desean en él.

En la ilustración 16 la velocidad del flujo es pequeña y el resalto se sitúa en el punto más aguas arriba del canal, pero pasados unos metros aguas abajo se restablece el régimen estacionario y se puede realizar el ensayo. En cambio, en la ilustración 17 las velocidades del canal son mayores, por lo tanto, provoca que el resalto se produzca en un punto intermedio a lo largo del canal. Este hecho hace que se observen dos calados conjugados totalmente diferentes: uno para el régimen rápido y otro para el régimen lento.

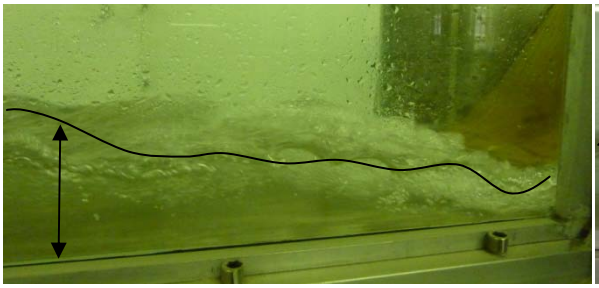


Ilustración 16. Equilibrio de frentes en el extremo aguas arriba del canal.

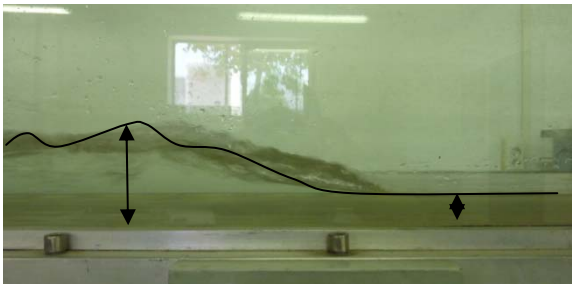


Ilustración 17. Equilibrio de los frentes de onda en un punto intermedio del canal.

Para la determinación del gráfico de la figura 33, sólo se han tenido en consideración aquellos calados en régimen estacionario con los que se puede realizar el ensayo, por consiguiente, en el primer caso se ha obtenido el calado del régimen lento, y en el segundo caso se ha considerado el valor del calado menor que corresponde al régimen rápido.

Los calados máximos en función de la pendiente con los que se puede experimentar en el canal de la UB corresponden al caudal máximo (Q_{real} = 0.013m^3/s) y se exponen en la tabla 7.

Pendiente (%)	Calado (cm)[10]	Froude	Régimen		Pendiente (%)	Calado (cm)	Froude	Régimen
0,04	10	0.36	Lento o subcrítico (Fr<1)		1,11	2,9	2.27	Rápido o supercrítico (Fr>1)
0,25	9,3	0.40	Lento o subcrítico (Fr<1)		1,76	2,5	2.84	Rápido o supercrítico (Fr>1)
0,36	9,2	0.40	Lento o subcrítico (Fr<1)		2,4004	2,3	3.22	Rápido o supercrítico (Fr>1)
0,68	3,1	2.06	Rápido o supercrítico		2,69	2,2	3.44	Rápido o supercrítico

[10] Las mediciones del calado indicadas en la tabla 7 se han realizado con una regla graduada situada a 12.49 metros del extremo aguas arriba del canal

			(Fr>1)					(Fr>1)

Tabla 7. Valores de calado en función de la pendiente del canal.

Se observa como para pendientes de hasta el 0.36% el resalto hidráulico permanece aguas arriba de la posición de la regla graduada y por lo tanto las mediciones que se realizan son en régimen lento tal y como se comprueba observando el número de Froude.[11] En cambio, para pendientes mayores al 0.68% el resalto está situado aguas abajo del punto de medición por lo tanto, los calados corresponden según el número de Froude a una situación de régimen rápido.

2.4.2.10 Tiempo máximo de uso

El tiempo máximo de uso de un ensayo se define como la duración máxima que puede tener un ensayo antes de que el sistema se tenga que detener por falta de agua en el circuito. Es una variable muy importante de cara a los ensayos que se desean realizar ya que en éstos el objetivo es alcanzar un flujo uniforme y estacionario con una concentración determinada de material en suspensión. Para alcanzar estas condiciones se requiere de un cierto tiempo, principalmente para alcanzar la concentración estable de sedimentos en suspensión.

Una vez alcanzadas estas condiciones, es necesario disponer de suficiente tiempo como para poder hacer los ensayos, medidas, observaciones que se desee, etc. Por ello, el tiempo mínimo deseado es de 1 hora.

Resulta que en ciertas condiciones, el caudal de salida de los depósitos es mayor que el de entrada y eso hace que no les dé tiempo a los depósitos de recuperar el nivel de agua mínimo para alimentar la tubería de succión de la bomba depósitos-canal provocando que ésta succione aire y agua generando 2 conflictos:

El caudal que circula por el canal es menor que el teórico

La bomba se calienta al no estar correctamente refrigerada y puede llegar a dañarse

La única variable que afecta al tiempo máximo de uso es el caudal. En la siguiente tabla se relacionan los distintos caudales con su tiempo de uso máximo.

Caudal indicado en pantalla consola (l/min)	Tiempo de uso máximo
10000	10 min 30 segundos
9500	15 min
9000	19 min
8500	25 min
8000	35 min
7500	desconocido

Tabla 8. Tiempo máximo de uso en función del caudal del canal.

[11] Por teoría se sabe que si Fr<1 es un régimen lento o subcrítico y para Fr>1 el régimen es rápido o supercrítico

2.4.3 Conclusiones de las limitaciones del canal

Una vez expuestas las distintas variables que influyen en la explotación del canal de la Facultad de Geología de la UB, ahora es necesario hacer un breve resumen de las distintas limitaciones que presenta.

Una de las limitaciones que tiene este canal es que la pendiente máxima que permite es del 2,76%, pendiente suficiente si sólo se desean estudiar los fenómenos que se producen en los ríos pero insuficiente si se quieren estudiar fenómenos torrenciales o ríos de gran pendiente.

Otra limitación que presenta el canal es que a medida que aumenta la pendiente, el calado disminuye considerablemente hasta llegar a ser tan pequeño que es muy complicado ver cómo le afecta el sedimento en suspensión que es el objetivo del futuro doctorado y de la presente tesina y además, a menor calado los errores relativos son mayores.

De cara a buscar solución a esta última limitación, se sabe que el caudal está íntimamente relacionado con el calado y con el tiempo máximo de uso. A mayor caudal, el calado del flujo es mayor y permite apreciar mejor los efectos del sedimento en suspensión, pero por otro lado, tal y como está diseñado actualmente el sistema de conexiones hidráulicas entre depósitos, resulta que a mayor caudal menor tiempo máximo de uso.

Se concluye que las variables más importantes y limitantes para poder realizar la experimentación con garantías y con los menores errores relativos son el tiempo máximo de uso y el calado, que como ya se ha mencionado, están íntimamente relacionados con el caudal, por lo tanto, ésta será la variable más limitante y sobre el que es necesario actuar para mejorar las condiciones de los otros dos.

2.4.4 Propuestas de mejora para el canal

Con el objetivo de mejorar el actual canal para poder hacer la experimentación deseada, se han propuesto unas mejoras cuya finalidad es, haciendo el mínimo número de actuaciones, disponer de un calado suficiente para apreciar la influencia del material en suspensión en las propiedades hidrodinámicas del flujo y a su vez, aumentar el tiempo máximo de uso en al menos 1 hora.

La propuesta de mejora, sin modificar las actuales bombas, es mejorar las conexiones entre depósitos para conseguir de esta forma que se asemeje más a un depósito único. Con esta solución lo que se busca es mejorar el traspaso del agua entre depósitos consiguiendo así que la tubería de succión de la bomba depósitos-canal siempre disponga de una mínima altura de agua, evitando así que succione aire. Por lo tanto, con esta modificación se conseguirá aumentar el tiempo máximo de uso.

A su vez, también se ha propuesto cambiar el punto de inyección del agua que viene del decantador a los depósitos con el fin de conseguir simetría en los circuitos entre depósitos mejorando así las conexiones entre ellos.

En la ilustración 18 se observa la diferencia de altura del agua del interior que se genera entre los distintos depósitos: en el número 4 la altura es escasa y en cambio en los otros tres la altura es bastante mayor, viéndose reflejada la falta de conectividad entre depósitos.

Ilustración 18. Detalle de los depósitos con distintas alturas de agua poniendo de manifiesto la falta de conectividad.

Las mejoras propuestas de forma detallada son:

- El agua que viene del decantador se inyecte por el tanque nº 2
- Entre el tanque 1 y el tanque 2 instalación de 3 tubos de diámetro exterior de 140 mm abajo y 2 tubos de diámetro exterior de 76 mm a media altura.
- Entre el tanque 2 y el tanque 3 instalación de 5 tubos de diámetro exterior de 110 mm abajo y 1 tubo de diámetro exterior de 110 mm a media altura.
- Entre el tanque 3 y el tanque 4 instalación de 3 tubos de diámetro exterior de 140 mm abajo y 2 tubos de diámetro exterior de 76 mm a media altura.
- Entre el tanque 4 y el tanque 1 instalación de 5 tubos de diámetro exterior de 110 mm abajo y 1 tubo de diámetro exterior de 110 mm a media altura.

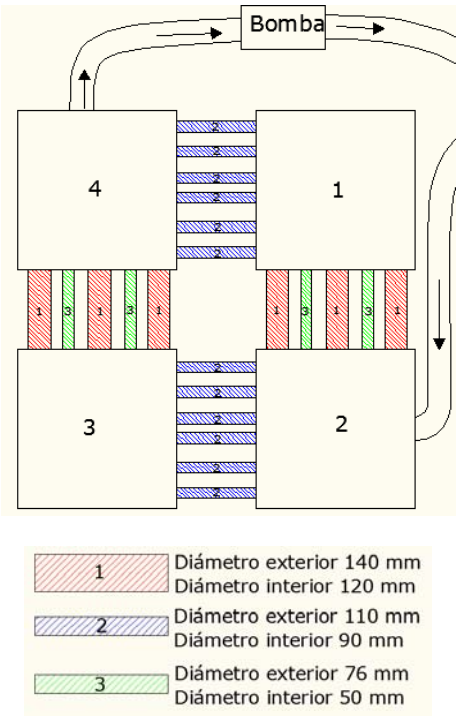


Figura 34. Esquema de las propuestas de mejora de la conectividad entre depósitos.

Para el cálculo de las conexiones se consideraron las siguientes hipótesis:

- El caudal que es succionado en el depósito 4 es de 0.013m^3/s, por lo tanto, para que no se vacíe el depósito es necesario que llegue el mismo caudal como mínimo.
- La fórmula que se utilizará para encontrar la sección de las conexiones es la del caudal entre dos depósitos debido a la diferencia de energías:

$$Q = 0.5 \cdot A \cdot \sqrt{2gH} \qquad (32)$$

Siendo: Q el caudal en m^3/s
A el área de las tuberías que conectan los depósitos
g la gravedad
H la diferencia de altura de la lámina de agua de los depósitos

- Por tratarse de un circuito simétrico, por los caminos 2-1-4 y 2-3-4 circulará el mismo caudal que será $Q = \frac{Q_T}{2}$
- Se considera el caso en que la diferencia de altura entre depósitos es mínima: con esta hipótesis, lo que se pretende es obtener una sección A máxima.
  Si se considera una diferencia de altura $H_{mín}$= 5mm resulta que la sección necesaria es de 37,856.19 mm^2.

Para calcular el número de tubos necesarios entre depósitos se ha de tener en cuenta que la suma de las secciones de éstos ha de ser igual a la sección hallada anteriormente. Además, de cara a calcular la sección de los tubos hemos de calcularla con el diámetro interior de los mismos, no con el exterior.

Otra consideración que hay que tener en cuenta es que la estructura metálica que hay alrededor de los depósitos está formada por unas barras verticales que limitan el diámetro de los tubos.

Una vez hechas estas consideraciones, se puede determinar el número de tubos necesarios.

Tubo	Diámetro exterior	Diámetro interior
1	140 mm	120 mm
2	76 mm	50 mm
3	110 mm	90 mm

Tabla 9. Diámetros interior y exterior de los distintos tubos utilizados en la propuesta de mejora.

$A_{2\text{-}1} = A_{3\text{-}4} = n \cdot \frac{120^2}{4} \cdot \pi + 2 \cdot \frac{50^2}{4} \cdot \pi = 37856.19\text{mm}^2 \rightarrow$ n=3

3 de $\emptyset_{ext}$=140mm y 2 $\emptyset_{int}$=76mm

Se conservan los 2 tubos de 76mm de diámetro exterior que están a media altura en el diseño actual.

$A_{2\text{-}3} = A_{1\text{-}4} = n \cdot \frac{90^2}{4} \cdot \pi = 37856.19\text{mm}^2 \rightarrow$ n=5.96 ≈ 6

6 de $\emptyset_{ext}$=110mm

La estructura metálica exterior sólo nos permite colocar 5 a la misma altura, por lo tanto colocaremos 5 en la parte más baja y el sexto un poco más elevado.

Todos aquellos tubos que estaban en el diseño original y que no se reemplazan por unos nuevos se mantendrán para mejorar aún más las conexiones entre depósitos.

Se considera importante comentar que las conexiones se colocarán en la posición más baja que nos permita la geometría del depósito, para garantizar el transvase de agua hasta la cota mínima.

A parte de las mejoras descritas en los párrafos anteriores, otra mejora que se considera que es necesaria para el correcto funcionamiento del canal es intercambiar las bombas del sistema entre ellas. Resulta que la bomba depósitos-canal es más potente que la decantador-depósitos y esta situación origina que el decantador, al evacuar menos agua, en su interior vaya subiendo el nivel y en los depósitos disminuya con la consecuencia que al final se ha de detener el sistema por falta de agua en los depósitos o porque en el decantador el agua se vierte. La situación ideal sería que ambas bombas fueran iguales.

Capítulo 3

RESULTADOS

3.1 Experimentación en el canal de laboratorio

Los objetivos que se pretenden asumir con la experimentación en el canal del laboratorio son principalmente cuatro:

1. Caracterizar el canal facilitando su uso en un futuro.
2. Evaluación del instrumento de medida de la velocidad del agua Starflow (sistema Doppler) determinando el efecto de la atenuación en él por presencia de sedimentos en suspensión.
3. Observación del efecto que tiene la presencia de sedimento en suspensión en las propiedades hidráulicas de un flujo.
4. Evaluación del modelo analítico unidimensional mediante la comparación entre sus propios resultados y los obtenidos en los ensayos experimentales en el canal de la Facultad de Geología.

De éstos, sólo se han podido cumplir en su totalidad los dos primeros, ya que debido a las características actuales del canal las condiciones para realizar los dos últimos de forma completa era inviable ya que como se ha comentado en apartados anteriores, para poder realizar la observación de la influencia del sedimento sobre el flujo y la toma de datos, son necesarias unas condiciones de calado, velocidad y tiempo mínimo de duración del ensayo que el actual canal no puede proporcionar.

Con el fin de poder cumplir estos dos últimos objetivos, se propuso realizar unas mejoras en el canal que se detallan en el apartado 2.4.4, pero el elevado precio de éstas hizo que se tuviera que desistir en alcanzarlos. Por lo tanto, no se han podido asumir los objetivos relacionados con la experimentación con material en suspensión de forma completa pero sí se han cumplido parcialmente, ya que se realizó un ensayo en el laboratorio con un único caudal y una única concentración de sedimentos, permitiendo de este modo tener una primera toma de contacto que permitiera valorar si se sigue el camino correcto de cara futuras investigaciones.

3.1.1 Plan de trabajo

Para poder realizar la experimentación en laboratorio, previamente se realizó un plan de trabajo que se ha ido cumpliendo hasta que llegados al punto álgido: el ensayo con sedimento, por motivos ajenos al autor del texto, sólo se pudo realizar parcialmente la experiencia.

Fase 0: Establecer las condiciones de contorno para el ensayo en el canal

Las condiciones de contorno que se pueden aplicar al canal pueden ser muy diversas, pero las que se plantearon inicialmente para realizar la experiencia fueron las propias del caso real de estudio: el aforador de Cal Rodó en la cuenca de Vallcebre. Para ello, lo primero que se hizo fue establecer las condiciones características del aforador y de los instrumentos instalados en él. Y posteriormente,

mediante el planteamiento de un sistema de inecuaciones es establecieron las regiones de compatibilidad de condiciones.

Condiciones de contorno e inecuaciones aplicadas:

- El calado tiene que ser mayor a 0.08 m para que el Starflow tome medidas y menor a 0.42m para que no se desborde el canal por sus paredes laterales. (0.42>y>0.08 m).
- El rango de la velocidad en la realidad está comprendido entre: 0.4<v<1.3 m/s
- Pendiente del orden del 3%
- El caudal Q ha de ser menor o igual al máximo del canal de la UB: $Q \leq Q_{UB}$.
- Se ha decidido introducir una nueva limitación al calado ya que se ha observado que una posible atenuación puede tener lugar alrededor de los 0.2m. Por eso nos interesarían valores próximos a éste o superiores.
- Así mismo, la ubicación del Starflow en el fondo del canal cuando circule una lámina pequeña de agua afectará a la uniformidad de la misma. Por ello, se ha concluido que como la lámina libre de agua se verá afectada para calados pequeños se considera necesario aumentar el calado hasta unos 0.2m como mínimo pero la consecuencia directa de aumentar el calado es la de reducir la pendiente del canal (conservando Q) o a aumentar el caudal Q de las bombas (si se quiere conservar la pendiente).

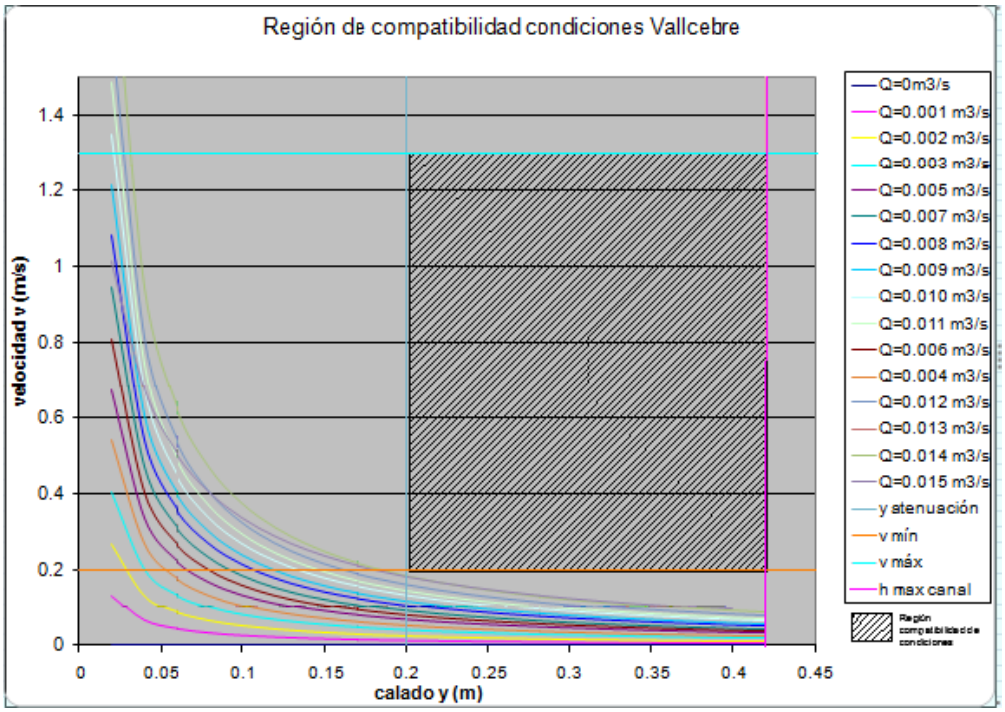


Figura 35. Región de compatibilidad de condiciones.

Para el cálculo de la velocidad hemos usado continuidad $Q = v \cdot y \cdot B \Rightarrow v = \frac{Q}{y \cdot B}$ donde Q es el caudal (m^3/s), y el calado (m) y B el ancho del canal (m).

Se observa en el gráfico anterior como las condiciones de Vallcebre no se pueden representar en el canal del laboratorio, ya que las características de éste no son suficientes para reproducirlo.

Observando los gráficos anteriores, se ha llegado a la conclusión que no puede representarse fielmente la realidad ya que se necesitaría de bombas más potentes para mantener la velocidad, el calado

deseado y la duración mínima deseable. Por lo tanto, se ha optado por hacer la experiencia con un calado menor y con una pendiente de entre el 0 y el 0.1%.

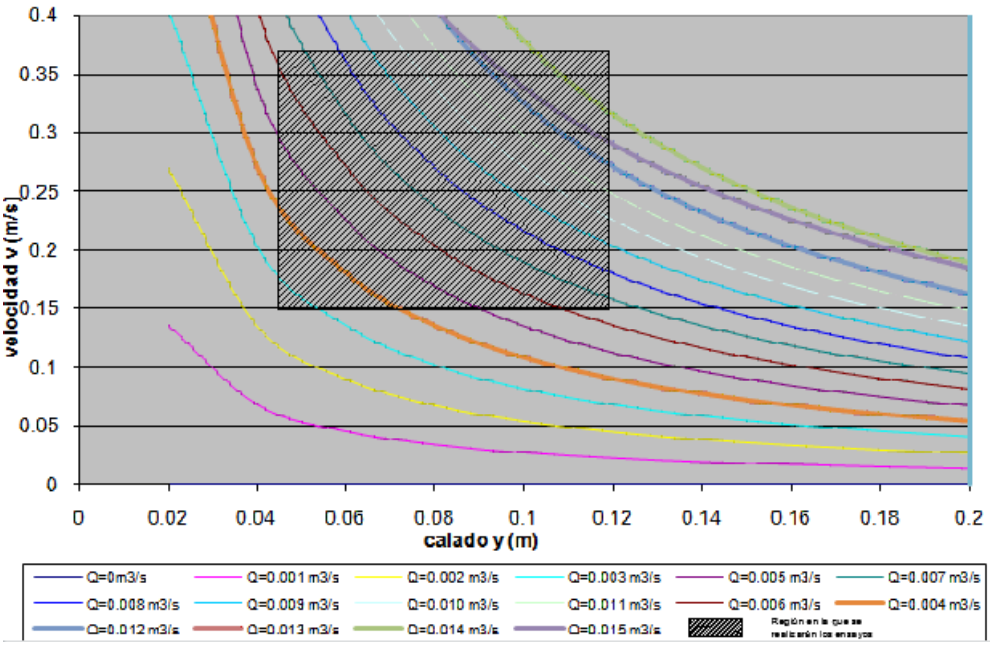


Figura 36. Región en la que se realizarán los ensayos

Fase 1: limpieza del material fino depositado en el fondo de los depósitos y del canal. (24/02/2010).

Se trata de una tarea sencilla pero muy laboriosa ya que conseguir extraer el material fino de todos los sistemas del canal como son las canalizaciones, decantador, depósitos o el propio canal de forma manual requiere de paciencia y de tiempo.

Fase 2: Comprobación de las condiciones del canal (3/03/2010).

Después de observar las distintas posibilidades que permite el canal, se decide trabajar con el caudal máximo para tener el mayor calado posible y se prueban tres condiciones de pendiente:

- la pendiente del caso real: Vallcebre. i = 3%
- una pendiente intermedia de 1.3%
- pendiente nula

Ensayo	Caudal (m^3/h)	Pendiente %	Calado (cm)	Velocidad media (m/s)
1	43	2.65	2	1.63
2	43	1.3	2.2	1.48
3	43	0	10.1	0.32

Tabla 10. Resumen de los datos tomados el primer día de ensayo en el canal

Durante el ensayo se observó que para el caudal máximo la duración del ensayo es de poco más de 10 minutos, limitación muy importante de cara a realizar los ensayos.

Como ya se ha comentado, el objetivo final de la experiencia es ver cómo influye el material en suspensión en las propiedades hidrodinámicas del flujo y para ello, se han de conseguir previamente unas condiciones estacionarias. Una vez alcanzadas, se introducirá sedimento de forma progresiva y

controlada con el fin de obtener distintas concentraciones con las que trabajar. Para poder llevar a cabo todas estas etapas se necesita de un mayor tiempo de duración.

Fase 3: Proposición de mejora del canal con el objetivo de poder trabajar un mayor periodo de tiempo con el caudal máximo. (17/03/2010)

Las propuestas de mejora se detallan en el apartado 2.2.4, pero de forma breve se pueden resumir en dos:

- Mejorar las conexiones entre depósitos consiguiendo de esta forma que se asemeje más a un depósito único y mejorando el transvase del agua entre depósitos.
- Cambiar el punto de inyección del agua que viene del canal a los depósitos con el fin de conseguir que los circuitos entre depósitos sean simétricos facilitando así las conexiones entre ellos.

Fase 4: Experimentación con agua limpia (concentración = 0 g/L). Comprobación de que se cumplen los requisitos mínimos en calado, caudal y tiempo de duración del ensayo y determinación de las condiciones de trabajo: se plantean dos opciones de pendiente: horizontal para tener el calado máximo pero con un régimen no uniforme o una muy pequeña que permitirá tener un calado suficiente y a su vez, conseguir alcanzar el régimen uniforme. (25 de Mayo)

Si se realiza el ensayo con la pendiente horizontal, que es cuando se tiene mayor calado, resulta que no se puede alcanzar el régimen uniforme y aparece una curva de remanso M2 tal y como se explicará con más detalle en apartados posteriores. En cambio, con una pequeña pendiente lo que se intenta conseguir es régimen uniforme y a su vez, un calado suficiente para poder hacer el ensayo con garantías de poder observar la influencia del sedimento en el calado. Durante el transcurso de los ensayos se evaluarán las dos opciones y se decidirá cual interesa más.

Una vez decididas qué condiciones físicas se aplicarán al canal, se procederá a la determinación de la velocidad de corte que con la relación de Rouse nos servirá para seleccionar el tamaño del material a utilizar para que no se produzca sedimentación (transporte en suspensión).

Fase 5: Experimentación con agua con sedimento en suspensión. (7 de Junio)

Esta fase final consiste en realizar las mismas experiencias que en la fase 4 pero esta vez con distintas concentraciones de material en suspensión. Concretamente, el rango de concentraciones que se pretende ensayar está comprendido entre 0 y 50 g/l.

La finalidad de reproducir las mismas situaciones con agua cargada y agua clara es la comparación entre ambas y la obtención de unas conclusiones claras y concisas de la influencia que tiene la concentración de sedimento en la hidráulica de un flujo.

Material e instrumentación necesaria para realizar los ensayos:

Medición de las distintas variables:

- Velocidad:
    - Media: molinete y relación caudal dividido por la sección geométrica
    - Starflow
- Calado:
    - papel milimetrado transparente en las paredes del canal situado de forma equidistante cada metro en el lateral izquierdo del canal.
    - sonda de presión
    - regla graduada

- Concentración:
    - Toma de muestras por captación manual

3.1.2 Ensayo con agua sin carga de sedimentos en suspensión

El ensayo con agua sin sedimento en suspensión se realizó en dos ocasiones: la primera fue durante la fase 4 del plan de trabajo y consistió en caracterizar el flujo del canal en función de las distintas condiciones de contorno con el fin de poder calcular la granulometría del material que se iba a introducir para que se mantuviera en todo momento en suspensión. Y la segunda ocasión fue antes de introducir el sedimento en el agua y lo que se realizó fue comprobar el correcto funcionamiento de todos los instrumentos, así como volver a caracterizar el flujo como se había hecho en la primera ocasión pero esta vez sólo para el caudal de 0.012 m^3/s que es con el que se iba a realizar el ensayo con sedimento.

3.1.2.1 Valores del número de Froude en el canal

El número de Froude se define como la relación existente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad y sirve para definir el régimen de un flujo.

$$Fr = \frac{Fuerzas\ inercia}{Fuerzas\ gravedad} = \frac{v}{(g \cdot y)^{0.5}} \quad (33)$$

Fr > 1 el régimen del flujo será supercrítico

Fr = 1 el régimen del flujo será crítico

Fr < 1 el régimen del flujo será subcrítico

En el caso del canal de la UB, los valores de Froude son menores a 1, por lo tanto, se trata de un régimen subcrítico.

Q real (m3/s)	Velocidad media (m/s)	y (m)	Fr
0,013	0,35	0,101	0,35
0,012	0,33	0,097	0,34
0,010	0,30	0,092	0,32
0,007	0,24	0,077	0,28

Tabla 11.Número de Froude canal UB

3.1.2.2 Coeficiente de Manning en el canal

Para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning en el canal, primero se representó el perfil longitudinal de las superficies libres de agua para los distintos caudales en las transparencias colocadas equidistantes cada un metro en el lateral izquierdo del canal, y posteriormente, con el programa Hec-Ras se simuló la misma situación del canal variando los coeficientes de Manning hasta que el perfil obtenido por el programa fuese aproximadamente el de la realidad representado en las transparencias.

Para determinar la mejor aproximación de la rugosidad, lo que se hizo fue medir las alturas de la lámina de agua en los perfiles longitudinales calculados por el programa en los mismos puntos donde estaban situadas las transparencias. Luego por mínimos cuadrados comparando el calado de las transparencias y el de los resultados de Hec-Ras se obtuvo la curva de perfil longitudinal del programa que más se asemejaba a la realidad, la cual, tenía asociada un coeficiente de rugosidad de Manning que sería el propio del canal.

n de Manning	0,008

Como el fondo del canal es de acero inoxidable, consultando algunas fuentes se ha encontrado que el coeficiente de Manning para este material está entre 0.006 y 0.011. Entonces, como el valor obtenido experimentalmente es del mismo orden que los propios del material, se puede afirmar que el valor obtenido es correcto.

En la figura 37 se pueden observar las curvas de remanso para los distintos caudales calculadas por Hec-ras con los mediciones realizadas con las transparencias a lo largo del perfil longitudinal.

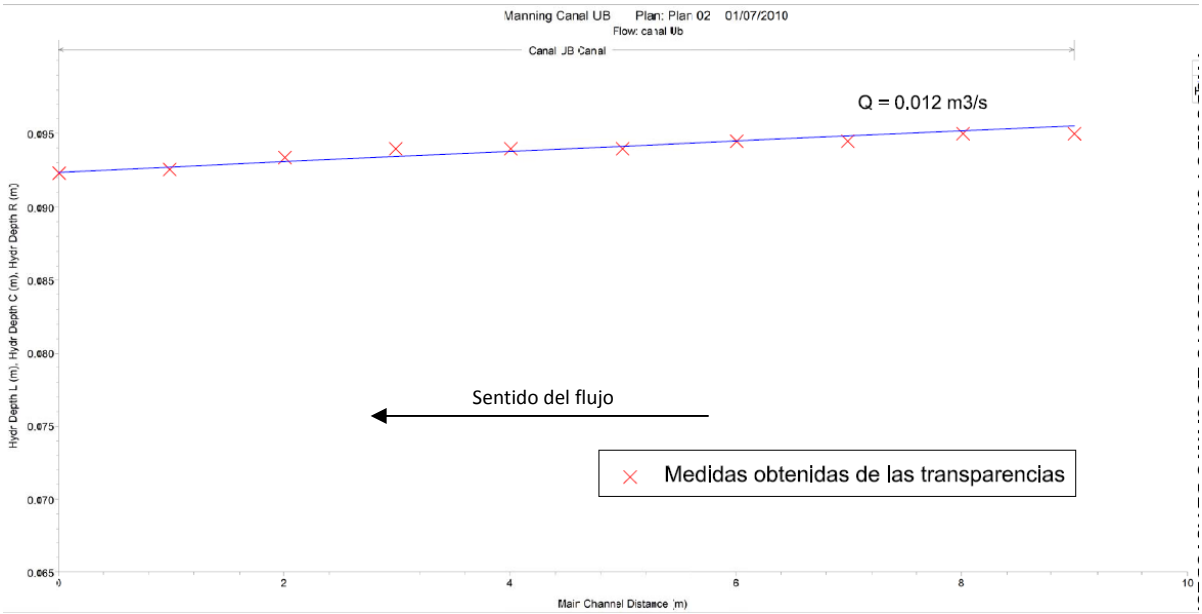


Figura 37. Curva de remanso obtenida para el caudal de 0.012 m^3/s en la situación de agua sin sedimento y también se indican las mediciones de calado realizadas en las transparencias

3.1.3 Ensayo con material en suspensión en el canal de laboratorio

A pesar de no haberse hecho aún las obras de mejora en el canal, se ha optado por realizar un ensayo con sedimento para poder alcanzar algunos objetivos:

- Aunque no se haya podido alcanzar uno de los objetivos de la tesina que era ver los efectos del material en suspensión en un flujo para distintas concentraciones, se ha querido hacer un primer ensayo de aproximación con una concentración arbitraria para observar si se producen los efectos que la teoría y la bibliografía nos explican, o por el contrario, no se experimenta nada.

- Otro objetivo de los que se deseaban alcanzar con este trabajo era el de comprobar la atenuación que experimenta el Starflow. Como ha sucedido con el anterior, se ha hecho un pequeño ensayo de aproximación para poder tener una primera idea.
- Probar el material escogido para el ensayo era importante de cara a ver si cumplía su finalidad que era la de no precipitar en el fondo de las distintas partes del canal.
- Realizar perfiles de velocidades y determinar los calados para poder comparar los resultados con los que se obtuvieron en el ensayo con agua limpia.

3.1.3.1 Estudio previo a los ensayos con sedimento en canal

Para poder trabajar con un fluido cargado con sedimento en suspensión, lo primero que es necesario determinar es con qué tipo de material se desea trabajar: material natural o artificial. En nuestro caso se optó por el material natural ya que existen muchos estudios relacionados, y por lo tanto, es más sencillo determinar sus propiedades.

El material artificial tiene la ventaja de que hay un gran abanico de posibilidades en granulometría, densidades, pesos, etc. Pero tiene el problema de que la documentación es escasa y la caracterización de las propiedades puede ser compleja.

Una vez se ha decidido el tipo de material que se desea utilizar, el siguiente paso es determinar la granulometría que hace posible que el sedimento se mantenga en suspensión y no precipite al fondo.

En el canal de la UB hay dos puntos en los que lograr que no haya precipitación será complejo: uno es el decantador y otro los depósitos, ya que la velocidad del agua en ambos casos es prácticamente nula. Para dar solución a este problema se plantean dos posibles soluciones:

- Realizar un bypass en el sistema de forma que el agua no pase por el decantador ni por los depósitos: el agua a la salida del canal sería captada directamente y recirculada de nuevo hacia la entrada del canal logrando de este modo un circuito cerrado donde el agua en todo momento tiene una cierta velocidad evitando así la existencia de puntos conflictivos.
- Instalar en el decantador y en los depósitos sistemas de agitación automática o bien, realizar la agitación de forma manual con la finalidad de que el material se mantenga en suspensión y no se deposite en el fondo debido a la situación de aguas en reposo que se genera en ambos puntos.

Para determinar la granulometría necesaria para desarrollar el proyecto, se aplica la fórmula del Número de Rouse la cual relaciona la velocidad de caída de las partículas con la velocidad de corte en el lecho y en la que para que no haya sedimentación se ha de cumplir:

$$Número\ de\ Rouse = \frac{v_*}{w} \gg 1 \qquad (34)$$

Siendo v_* la velocidad de corte.

W la velocidad de caída de las partículas.

El objetivo es determinar la velocidad de corte que se produce en el canal y una vez conocida, obtener la velocidad de caída de las partículas w que nos permitirá mediante un ábaco determinar la granulometría del material.

Antes de calcular las distintas variables, primero se ha de caracterizar en qué tipo de régimen se encuentra el fluido y para ello se ha de determinar el factor de fricción y el número de Reynolds el cual se define como la relación:

$$Re = \frac{4 \cdot R_h \cdot V}{\upsilon} \quad (35)$$

Donde: R_h es el radio hidráulico que se define como: $R_h = \frac{Área\ mojada}{Perímetro\ mojado} = \frac{B \cdot y}{B+2 \cdot y}$ (36)

υ es la viscosidad cinemática del fluido. υ del agua es $1.3 \cdot 10^{-6}$ m^2/s.

v es la velocidad media del flujo en m^3/s

El factor de fricción de Darcy-Weisbach, si se supone que el fluido es turbulento liso, se calcula define como:

$$f = \frac{0.31}{Re^{0.25}} \quad (37)$$

Esta hipótesis se tendrá que verificar una vez se haya determinado el régimen mediante el ábaco de Moody que se encuentra en el anexo 2.

En el caso del canal de la UB, para cumplir con unas ciertas condiciones mínimas de calado, velocidad y tiempo de duración, se trabaja con cuatro caudales y para cada uno de ellos se determina el número de Reynolds y el factor de fricción correspondiente. Así mismo, se consultará qué régimen corresponde en el canal para cada situación a partir del ábaco de Moody.

Caudal real (m^3/s)	Reynolds	f Darcy-Weisbach	Régimen
0.013	69906	0,019	Frontera entre turbulento liso e intermedio
0.012	64614	0,020	Frontera entre turbulento liso e intermedio
0.010	56718	0,021	Frontera entre turbulento liso e intermedio
0.007	40150	0,022	Frontera entre turbulento liso e intermedio

Tabla 12. Valores de Reynolds y de Darcy para distintos caudales de ensayo. Régimen que predomina

Por tratarse de la frontera entre turbulento liso y turbulento intermedio, se afirma que la hipótesis de cálculo del factor de fricción de Darcy-Weisbach es correcta.

La velocidad de corte se determina a partir de la expresión:

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (38)$$

Donde según el artículo de Julien & Simons [31] para flujos en régimen turbulento y sobre fondos lisos:

$\tau_0 = C \cdot S^a \cdot q^d$ es la tensión tangencial de corte (39)

$$C = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{0.316}{8 \cdot g}\right)^{0.333} \cdot \upsilon^{0.083} \quad (40)$$

S = Sf es la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción. Su valor se puede obtener con la relación de Darcy-Weisbach Sf = $\frac{f}{8} \cdot \frac{\bar{v}^2}{g \cdot h}$ (41)

a = 0.667 y d = 0.583

$q = \bar{v} \cdot h$ siendo $\bar{v}$ la velocidad media y h el calado.

Para comprobar que los cálculos que se van realizando son correctos, se ha optado por calcular la tensión tangencial a partir otra fórmula:

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot I \qquad (42)$$

Siendo: ɣ el peso específico del agua sin sedimento en N/m^3

R_h el radio hidráulico

I la pendiente de la energía que se obtiene de los perfiles realizados en HEC-RAS para encontrar el coeficiente de Manning.

Para determinar el tamaño de las partículas para que no se produzca sedimentación, aplicamos el número de Rouse = $\frac{v_*}{w} \gg 1$. Para reducir las posibilidades de sedimentación en los puntos conflictivos se considera que la relación debería de ser $\frac{v_*}{w} > 50$ como mínimo.

Una vez se conoce el valor de la velocidad de caída, con el gráfico de la figura 38 se determina el tamaño del sedimento. La ecuación de la curva de la figura se define en una función a trozos:

w (cm/s) = 80·D^2 (mm) $\Longrightarrow D = \sqrt{\frac{w}{80}}$ w < 5 cm/s (43)

w (cm/s) = 11·$\sqrt{D}$ (mm) $\Longrightarrow D = \frac{w^2}{11^2}$ w > 5 cm/s (44)

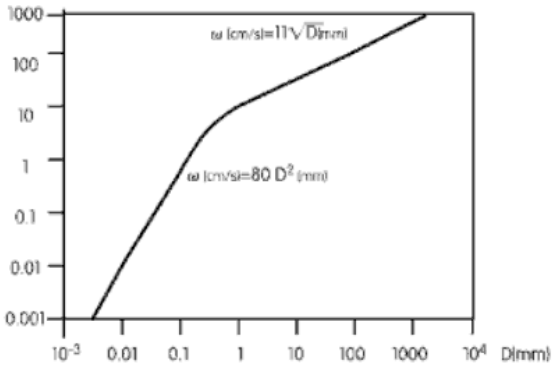


Figura 38. Relación entre la velocidad de caída w (cm/s) y el tamaño de las partículas (mm)[12]

Realizando las operaciones se obtienen los siguientes valores:

Régimen turbulento liso	Caudal real	Q controlador	τ_0	τ[13]	v_* (m/s)	w (cm/s)	D_{50} (micras)

[12] Fuente: Martín Vide, J.P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC, p-87

[13] Cálculo realizado a partir de la fórmula (42) para verificar el valor τ_0

	(m^3/s)	(l/h)					
C = 507.31	0.013	10000	0,324	0.219	0.015	0.03	19.24
a = 0.667	0.012	8500	0,293	0.192	0.014	0.028	18.62
d = 0.583	0.010	7500	0,251	0.181	0.013	0.027	18.35
	0.007	5000	0,176	0.129	0.011	0.023	16.86

Tabla 13. Características del flujo en el canal en función del caudal de ensayo

Se observa que los cálculo de la tensión de Shields por la ecuación (39) y la (42) son bastante diferentes, por lo que se opta por trabajar con la (42) ya que ella no aparecen parámetros de calibración como en la (39).

En el caso de estudio, la velocidad de caída de las partículas w es de 0.028 cm/s como máximo, por ello se aplica la ecuación que corresponde a w < 5 cm/s.

El valor de D_{50} más limitante es el que corresponde al caudal mínimo y es de 16.86 micras. Se trata de un material muy fino, concretamente según la clasificación del *American Geophysical Union para materiales sedimentarios*, es un limo mediano (0.016 – 0.031 mm).

Buscando materiales que cumplieran con las características determinadas, finalmente se contemplaron dos opciones las fichas técnicas de los cuales se encuentran en el anexo 2:

1. Solvin 258RD: material sintético. Sedimento del PVC totalmente insoluble en agua y de densidad 1.380 kg/m^3. Se trata de un material apropiado porque no presenta fuerzas cohesivas a pesar de su pequeño tamaño. El diámetro medio D_{50} es de 0.17mm y otros valores importantes que lo caracterizan son un rechazo al tamiz de 0.063 mm superior al 95% y un rechazo al tamiz mayor de 0.25 mm inferior al 2%.
   El PVC tiene una densidad aparente de 590 g/L con una porosidad del 42.7% por lo que para su empleo es necesario saturarlo antes de su uso.

Porcentaje que pasa (%)	Tamaño del sedimento (mm)
5	0.062
40	0.16
85	0.2
100	0.25

Tabla 14. Carcaterísticas del Solvin 258RD

1. Harina de sílice

   Se estudiaron tres harinas de sílice con características diferentes, pero al final se optó por escoger la tipo *QUARFIN Q-12.*

Características físicas y químicas	Distribución granulométrica
Valores por Fluorescencia de RX ▪ Al2O3 (%) < 0.80 ▪ Fe2O3 (%) < 0.06 ▪ CaO+MgO (%) < 0.13 ▪ Na2O (%) < 0.01 ▪ K2O (%) < 0.20 ▪ TiO2 (%) < 0.04	▪ TAMIZ (micras): 63; RETENIDO (%) (Vía seca): 2±1 ▪ Valores por Difractometría Láser (1) ▪ Diámetro medio partícula ≈ 25.5 µm ▪ 10% en volumen < 4 µm ▪ 50% en volumen < 25 µm ▪ 90% en volumen < 66 µm

▪ SiO2 (%): Calculado por diferencia > 98.5 ▪ Pérdidas por Calcinación 950ºC (%) < 0.35	

Tabla 15. Características harina de sílice Quarfin Q-12

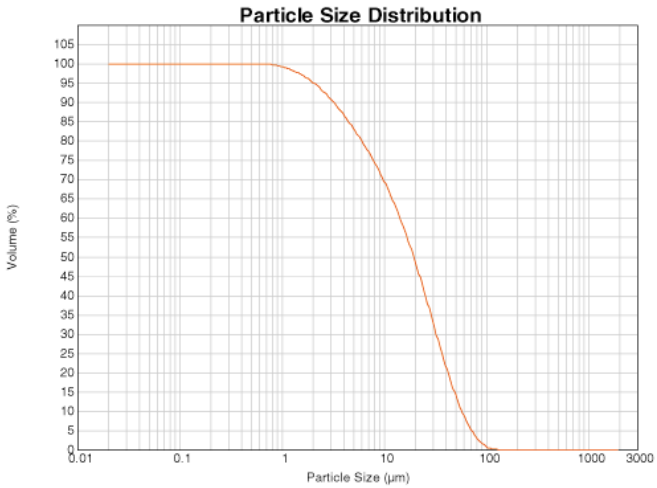


Figura 39. Distribución granulométrica de la harina de sílice Q-12

El material que se utilizó en los ensayos de laboratorio fue la harina de sílice, ya que presentaba la menor granulometría y además, el material se podía ir a buscar directamente a la Zona Franca sin costes de transporte ni días de esperas.

Una vez decidido el material que se iba emplear, ahora se tenía que determinar cuánto material era necesario comprar para alcanzar la concentración deseada en el fluido del canal: para su determinación, lo único que se hizo fue calcular el volumen de todo el circuito del canal y multiplicar por la concentración deseada.

$V_{total\ canal}$ ≈5000 litros

Concentración deseada C = 50 g/l

$M_{material} = V_{total\ canal} \cdot C$ = 250kg.

Es inevitable que parte del material se deposite en el fondo, por lo tanto, para lograr la concentración deseada se optó por comprar 500 kg asegurando de este modo que hubiese material de sobras.

Como primera aproximación no se introdujo todo el material sino sólo 100 kg alcanzándose una concentración media de 14.06 g/l tal y como se explica en el apartado 3.1.1.8.

3.1.3.2 Caracterización de la instrumentación en el canal

Para realizar el ensayo hemos dispuesto de múltiples instrumentos que se han colocado a lo largo de la longitud del canal tal y como se muestra en la figura 40.

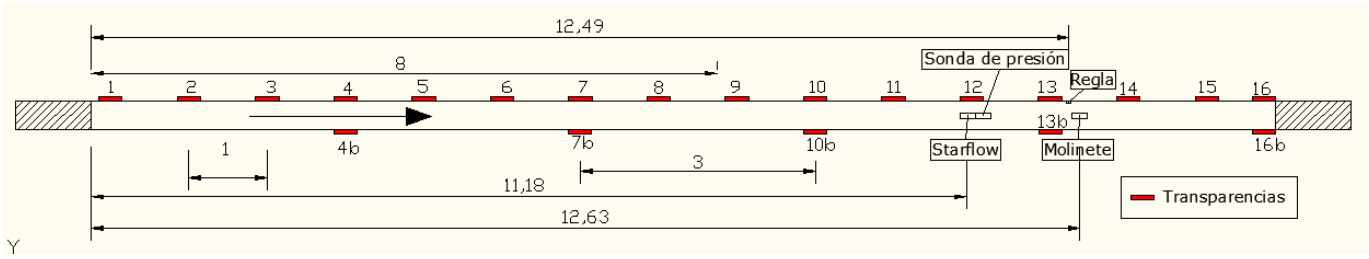


Figura 40. Posición de los instrumentos en el canal de la UB. Unidades en metros.

Para medir las velocidades se han dispuesto dos instrumentos: el Starflow y el molinete. El primero colocado a 11.18 metros del extremo aguas arriba del canal y el segundo a 12.63m. Se ha optado por separar ambos instrumentos para que no hubiese afectación entre ellos.

La medición del calado se realiza con una sonda de presión previamente calibrada, situada a 11.30 m, una regla graduada hasta el milímetro situada a 12.63m y 16 transparencias con papel milimetrado impreso en ellas colocadas a ambos lados de forma asimétrica: en el lado izquierdo mirando aguas abajo se colocaron equidistantes 1 metros ya que se pretendía dibujar el perfil longitudinal, y en cambio, en el lado derecho se colocaron cada 3 metros ya que la única función de éstas era determinar la existencia de pendiente transversal en el canal.

La calibración de la sonda consiste en colocar la sonda en un cubo de agua e ir introduciendo agua de forma progresiva y cada cierto tiempo tomar medidas de la altura del agua y también de lo que marca la sonda de presión en mV. Esta operación se realiza varias veces hasta que se tiene un número suficiente de puntos para formar una recta de ecuación conocida que permitirá saber el calado a partir de los mV que nos muestra el instrumento. La relación de calibración en el caso del canal es:

$$y = 0.430 \cdot V + 49.52 \qquad (45)$$

Donde:

y es el calado en mm

V es el voltaje de la sonda en mV

Los puntos utilizados para trazar la recta son los de la tabla 16 y su representación se observa en la figura 41.

Medición sonda (mV)	Altura regla (cm)
54.159	75
305.476	178.5
448.041	240.5
533.856	279
570.567	295
633.203	323
695.018	350

Tabla 16. Datos de calibración para la sonda de presión

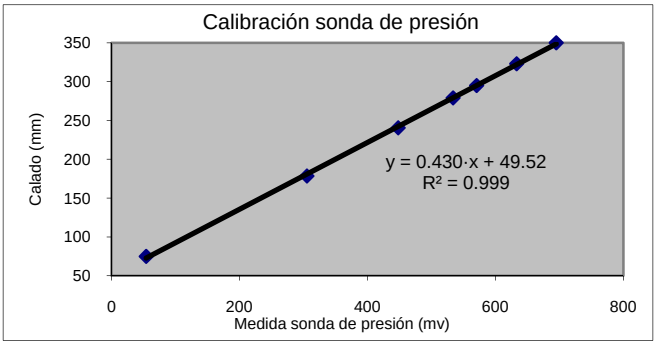


Figura 41. Recta de calibración para la sonda de presión utilizada en el ensayo.

Para poder conocer la concentración que había en el canal mientras se hacía el ensayo, se tomaron muestras a 1,5 metros del extremo aguas abajo del canal con botellas normalizadas. La toma de

muestras consistía en que cada 30 segundos se llenaba una botella numerada con agua y sedimento y se repetía esta acción durante 20 minutos logrando así tener 40 muestras de concentraciones.

Todos los instrumentos estaban conectados a un data logger cuya misión es almacenar los datos de los instrumentos de forma continua y reunirlos en una misma línea en función del tiempo para poder compararlos a posteriori.

3.1.3.3 Descripción del ensayo

Una vez colocados todos los instrumentos en su posición, se comprueba que éstos funcionen de forma correcta y se caracteriza de nuevo el flujo de agua clara con un caudal real de 0.012 m^3/s realizando un perfil de velocidades a distintas alturas con el molinete y también una toma de datos continua a 5cm del fondo del canal.

Una vez comprobados todos los instrumentos y habiendo caracterizado de nuevo el flujo de agua clara, se procede a realizar el ensayo con sedimento en suspensión. Como ya se ha comentado, el material que se ha usado para el ensayo es harina de sílice con un D_{50}=25µm lo que ha obligado a llevar mascarillas durante todo el ensayo por el polvo que se generaba. Para asegurar la correcta disolución del material en el agua se ha optado por hacer la mezcla sedimento-agua primero en un cubo y luego, una vez alcanzada una mezcla homogénea, se ha vertido en los depósitos del canal.

La sorpresa ha sido que al verter el contenido de los sacos en el cubo, el material no se diluía sino que formaba una masa compacta que ha obligado a tener que ir moviéndola con las manos para acelerar su disgregación consiguiendo, pasados unos minutos, que la masa desapareciese restando únicamente material en suspensión.

A medida que se conseguía una mezcla homogénea de agua y sedimento en el cubo, se iba vertiendo en el depósito número 4 introduciendo de este modo el material en suspensión en el circuito. Este proceso se ha llevado a cabo cuatro veces diluyendo 100 kg de harina de sílice, lo que significa una concentración máxima teórica de 25g/l.

Rápidamente el agua de todo el circuito ha tomado un color blanquecino lo cual indicaba que el sedimento estaba en suspensión y presente de forma homogénea en todas las partes del canal tal y como se puede observar en la ilustración 19.

Ilustración 19. Agua de color blanco debido a la carga de sedimento en suspensión

El ensayo se ha dividido en dos fases de 25 minutos que es la duración máxima para el caudal seleccionado. La primera fase ha consistido en la evaluación de las condiciones con sedimento, la comprobación de que los instrumentos funcionasen correctamente y ver la evolución del sedimento en las distintas partes. Se ha concluido que gran parte del sedimento se mantiene en suspensión pero hay una parte que se deposita en los fondos del canal, de los depósitos y del decantador. Por este motivo, se decidió que antes de iniciar la segunda fase del ensayo se limpiaría el fondo del canal para eliminar los sedimentos en él que se hubiesen acumulado, así como, durante el transcurso del ensayo se irían agitando de forma manual los depósitos y el decantador para evitar la precipitación en ellos.

La segunda fase del ensayo duró 25 minutos de los cuales los primeros 5 minutos se consideraron como el tiempo necesario para alcanzar las condiciones estacionarias. Pasados estos minutos se empezaron a tomar medidas: por un lado el data logger recogía las velocidades y los calados de forma continua, por otro lado en el papel milimetrado que se había colocado en los laterales del canal se dibujó el perfil longitudinal de la lámina de agua así como las formas de fondo que se dibujaron en dos tiempos distintos para ver como evolucionaban y se desplazaban.

Una tercera persona se dedicaba a realizar la agitación manual en los distintos puntos conflictivos. Y por último, un cuarto tomaba muestras con las botellas normalizadas cada 30 segundos para poder conocer la concentración del flujo.

3.1.3.4 Resultados del ensayo

Velocidad

Los datos más importantes se detallan en la tabla 17.

Caudal controlador (l/h)	Caudal real m^3/s	Calado (m)	VStarflow media (m/s)	V molinete media (m/s)	Diferencia	Error relativo (%)
8500	0.012	0.0945	0.34	0.36	0.02	6.35

Tabla 17. Resumen de los datos más relevantes del ensayo con material en suspensión

De media el starflow mide 0.02 m/s menos que el molinete que se considera el instrumento de medida de referencia. Este valor implica que el error relativo de medida es de un 6.35%.

En la figura 42 se pueden observar las diferencias entre las velocidades del Starflow y del molinete.

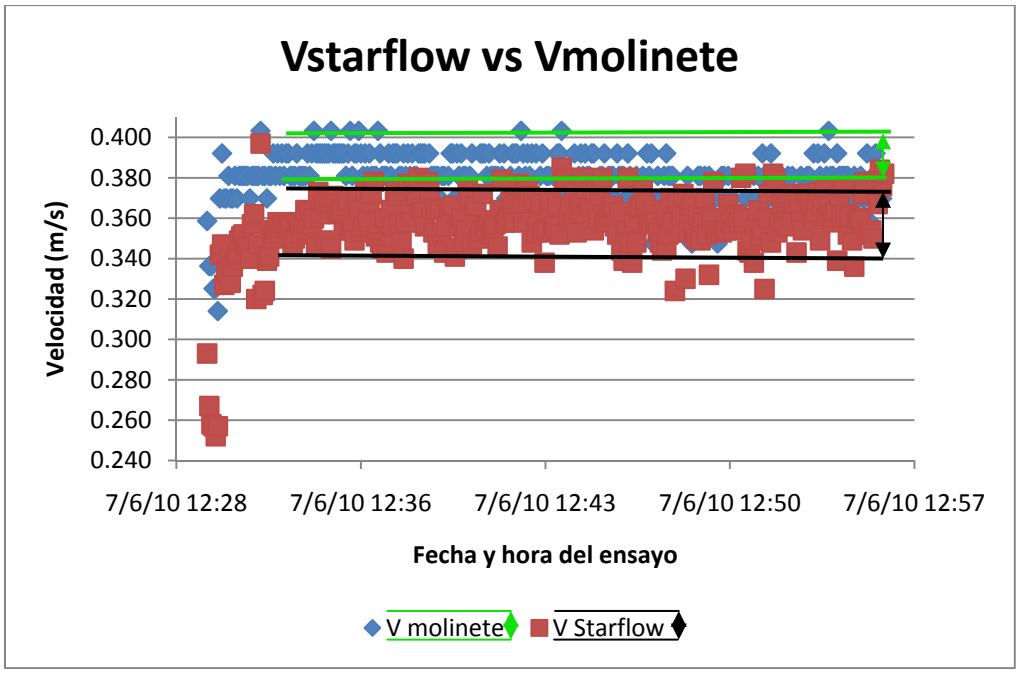


Figura 42. Velocidades en el canal captadas con el Starflow y el molinete con la hélice a 5cm del fondo.

Como ya se ha citado, el Starflow da resultados de velocidades inferiores a los del molinete y un posible motivo puede ser la altura de medida del molinete. Como ya se ha explicado anteriormente, el molinete consta de un eje situado una cierta altura alrededor del cual gira una hélice que es la que indica la velocidad del flujo. El eje de la hélice del molinete en este ensayo estaba situado a 5 cm del fondo.

Si se mira el perfil de velocidades en agua clara que se realizó al inicio del ensayo, se comprueba que la velocidad media del flujo (0.34 m/s) coincide con el valor del molinete cuando éste se encuentra a 3.65 cm del fondo. Además, si se mira el dato de la velocidad a 5 cm, se observa que es 0.021 m/s superior a la media y curiosamente este último valor coincide con el error entre el starflow y el molinete.

Para poder ver si la posición de la hélice afecta, a los valores del molinete a 5cm se les ha restado la diferencia con los de 3.65cm que es donde se da la media en agua clara, es decir, 0.021 m/s. De este modo obtenemos los valores medios y no los puntuales a una altura dada.

Haciendo esta consideración:

Caudal real (m^3/s)	Caudal real m^3/s	Calado (m)	VStarflow media (m/s)	V molinete media (m/s)	Diferencia	Error relativo (%)
0.012	0.012	0.0945	0.34	0.34	0.00	0.44

Tabla 18. Resumen de los datos corregidos más relevantes del ensayo con material en suspensión

Realizando la translación de los datos a la altura de la hélice donde se da la velocidad media en agua limpia, se observa como los valores tomados por el molinete y el sistema Doppler son casi idénticos con un error relativo del 0.44%.

En la figura 43 se observan los resultados con estas modificaciones.

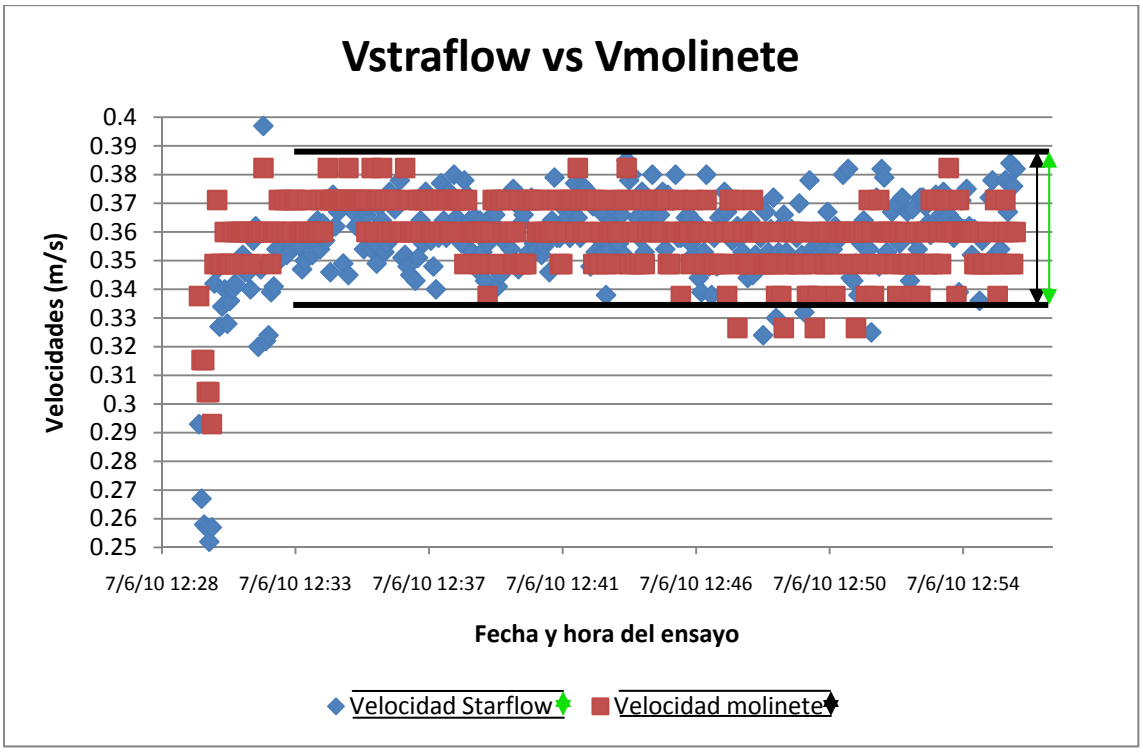


Figura 43. Velocidades en el canal captadas con el Starflow y el molinete con la hélice a 3.65cm del fondo.

Las velocidades de los distintos instrumentos están entre los mismos valores. Por lo tanto, para las condiciones del presente ensayo, como primera aproximación no se observa atenuación en el instrumento de medición por sistema doppler para pequeños calados y agua clara.

Valores del número de Froude en el canal

En el caso del ensayo con material en suspensión sólo se trabajó con un único caudal que, como ya se ha comentado, fue el de 0.012 m^3/s. (8500 l/h indica la pantalla del panel de control).

Si se aplica la definición del número de Froud tal y como se ha hecho en el caso del ensayo con agua sin carga de sedimento, como resulta que en este caso la velocidad es mayor y el calado es menor, el valor Fr es mayor.

Q real (m3/s)	Velocidad media (m/s)	y (m)	Fr
0.012	0,34	0,092	0,36

Tal y como ya sucedía en el caso del flujo sin carga de sedimento, por ser el número de Froude menor a la unidad, resulta que se trata de un fluido en régimen subcrítico.

Formas de fondo

La gran sorpresa del ensayo fue sin lugar a dudas, porque no se esperaban, las formas de fondo que se generaron, lo rápido que lo hicieron y el poder observar cómo se desplazaban a medida que pasaba el tiempo.

Una vez acabado el experimento, se dio pendiente al canal para vaciarlo de agua y se pudo observar en el fondo del canal un tapizado de rizos en el que se podían distinguir cuatro tramos diferentes:

- Tramo 1: Hasta una longitud de 40 cm desde el extremo aguas arriba no había formas de fondo pero sí material de fondo

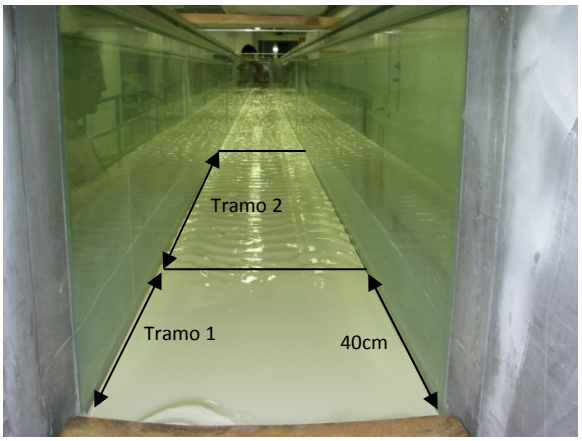
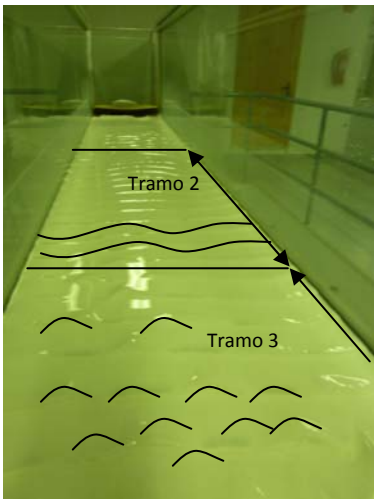


Ilustración 20. Detalle de los tramos 1 y 2 en los que se divide el canal en función de las formas de fondo

- Tramo 2: Desde los 40 cm hasta los 130 cm, las formas de fondo, con una altura máxima de los rizos de 4mm, eran transversales al flujo y ocupaban todo el ancho de forma continua.



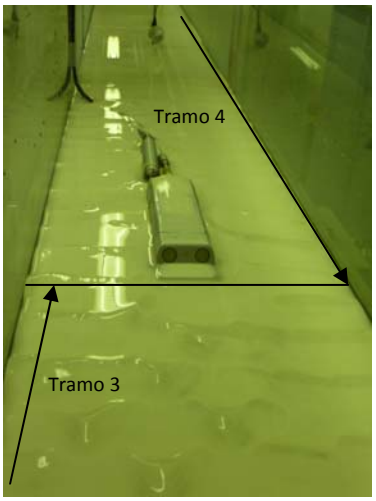


Ilustración 21. Detalle de los tramos 2, 3 y 4 en los que se divide el canal en función de las formas de fondo y de las formas de fondo próximas al Starflow.

- Tramo 3: Desde los 130 cm hasta la posición del Starflow, las formas eran irregulares formando crestas independientes las unas con las otras, de longitudes de onda de 5 cm y de altura máxima de 7mm.

Ilustración 22. Detalle de los rizos formados en el lecho del canal

- Tramo 4: Desde el Starflow hasta el final la altura de las formas se reduce debido a que el instrumento reduce el ancho en el fondo provocando un aumento de la velocidad que hace que aumente la capacidad de arrastre por fondo reduciendo así la formación de rizos. Vuelven a aparecer las mismos rizos que había en el segundo tramo: mayor longitud de onda que el tramo 3 (7cm) y de menor altura (5mm)

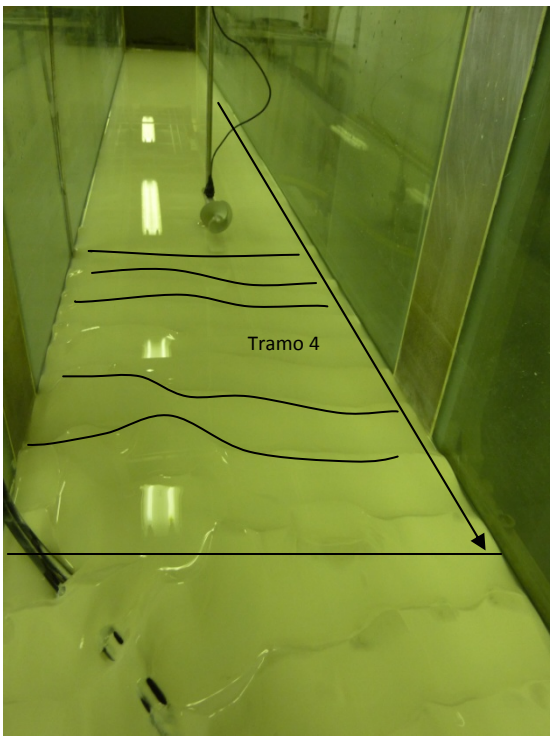


Ilustración 23. Detalle de las formas de fondo entre el starflow y el molinete

Concentraciones

Como ya se ha comentado se introdujeron 100 kg de harina de sílice en un volumen de agua de aproximadamente 4 m^3, lo que significa que si todo el sedimento estuviese distribuido de forma homogénea en todo el volumen y no se produjera depósito en ningún punto, la concentración teórica máxima sería de 25g/l.

Pero como ya se ha comentado, a lo largo del canal se produjo depósito de material creando un tapizado de rizos que se desplazaba aguas abajo lo que significa que no se pudo alcanzar la concentración teórica máxima. por lo tanto, para conocer la concentración en el flujo, lo que se hizo fue tomar muestras con ayuda de unas botellas normalizadas cada 30 segundos durante aproximadamente unos 20 minutos. Secando las 41 muestras y pesándolas se obtuvieron las concentraciones del flujo que resultó ser de media 14,06 g/l que representa un 56% de la concentración máxima teórica. Por lo tanto, un 44% del material estaba depositado en algún punto del sistema.

Del mismo modo que se tomaron muestras del flujo durante el ensayo, al final de éste, una vez evacuada el agua se tomaron muestras del fondo con el fin de medir su granulometría, que como era de esperar, era mayor al d_{50} de la muestra introducida ya que precipita primero el material de mayor tamaño por ser el de mayor peso. Concretamente, la granulometría del depósito era d_{50} = 39.65µm que corresponde a aproximadamente al d_{80} de la muestra inicial.

Coeficiente de rugosidad de Manning

Como ya se hizo en el ensayo de agua sin carga de sedimento, para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning en el canal, primero se representó el perfil longitudinal de la lámina de agua a partir de las transparencias colocadas equidistantes cada un metro en el lateral izquierdo del canal y posteriormente, por mínimos cuadrados comparando el calado de las transparencias y el de los resultados de Hec-Ras se obtuvo la curva de perfil longitudinal del programa que más se asemejaba a la realidad, la cual tenía asociada un coeficiente de rugosidad de Manning que sería el propio del canal. Se ha de tener en cuenta que en esta situación hay formas de fondo que generan una pendiente del 0.02% en el lecho del canal.

n de Manning	0.009

Como es de esperar, el valor obtenido es mayor al del agua limpia debido a la presencia de las formas de fondo en el lecho del canal, las cuales interfieren de forma importante en la hidráulica del flujo generando una fricción mayor, y por lo tanto, una curva de remanso M2 más acentuada.

En la figura 44 se puede observar el perfil longitudinal del Hec-Ras para un coeficiente de Manning de 0.009..

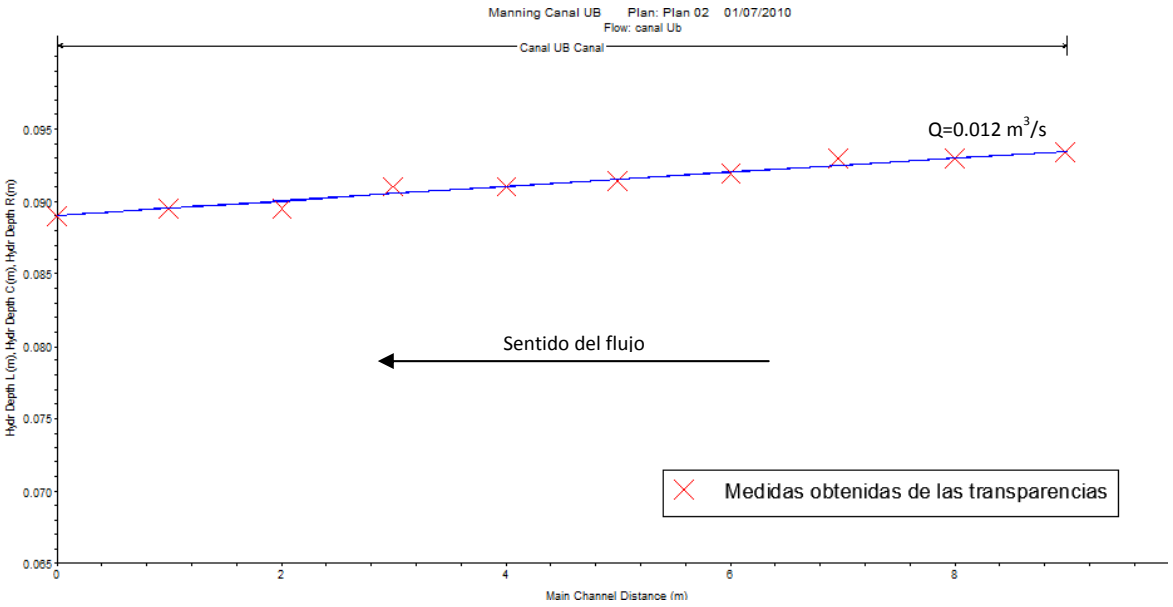


Figura 44. Curva de remanso programa HEC-RAS para situación con sedimento (n=0.012)

3.2 Resultados caso real Vallcebre

3.2.1 Introducción

Vallcebre es una cuenca que el CSIC lleva estudiando desde hace más de 20 años, por ello, se tiene mucha información de diferentes ámbitos que se han ido recogiendo con el paso del tiempo pero en este apartado, el interés sólo se centrará en la hidrología.

Se han analizado los múltiples datos brutos de la instrumentación de Cal rodó y tratándolos adecuadamente se ha obtenido información importante de los sucesos que tienen lugar en la cuenca y también se han observado situaciones atípicas a las cuales se ha buscado dar una respuesta.

Los datos brutos que se obtienen de los instrumentos es en algunos casos el valor final, pero en otros es necesario realizar una conversión mediante un ábaco de calibración que es necesario calibrar antes del inicio de la toma de datos y es recomendable irlo actualizando cada cierto periodo de tiempo.

Por lo tanto, los datos brutos se recogen y posteriormente con las ecuaciones de calibración se tratan para obtener los valores netos con los que trabajar.

Es importante pensar que no todos los instrumentos, aunque sean iguales, miden del mismo modo y tampoco en los mismos rangos. Así mismo, también hay que pensar que no en todos los sucesos funcionan todos correctamente.

Es bastante usual, más de lo esperado, situaciones en las cuales uno, dos o más instrumentos dejan de medir por motivos diversos aunque suele ser principalmente porque se supera el rango de aplicabilidad de los aparatos, o porque debido a la fuerza del agua o el impacto de algún material en suspensión se rompen, o también puede ser por falta de energía para hacerlos funcionar. Esta serie de motivos junto a otros más puntuales hacen que las crecidas no estén completamente caracterizadas con todos los instrumentos sino sólo con algunos.

3.2.2 Análisis de una crecida

La finalidad de analizar la representación de una crecida real de Vallcebre es que permite describir los fenómenos que tienen lugar en ella de forma más detallada y entendedora.

En la figura 45 se puede apreciar la representación de los distintos datos que se registraron durante la crecida que hubo entre el 31 de Octubre del 2008 y el 4 de Noviembre del mismo año. Se ha escogido esta crecida de forma arbitraria pudiéndose seleccionar otro cualquiera, ya que los fenómenos que se desean explicar se repiten.

Analizando los valores registrados por el sistema Starflow (indicados con puntos en azul) se observa que el evento constó de dos picos principales de velocidad: uno el 1 de Noviembre a las ocho de la mañana y otro al día siguiente a las doce. Del mismo modo, también se observan picos secundarios importantes que se han de tener en consideración.

Estudiando una serie importante de crecidas, se observan mediciones que siempre siguen el mismo esquema. Por ejemplo, en el caso de las mediciones de calado, tanto en la sonda de presión como en el Starflow son prácticamente idénticas, mientras que las indicadas por la sonda de río tienen la misma forma que las dos anteriores y los picos coinciden en los mismos periodos de tiempo pero en cambio, el valor que indica es inferior. La explicación a este fenómeno es la situación de la sonda de río, ya que está localizada 20 metros aguas arriba del aforador y en cambio, los otros dos sistemas de medición están ubicados en el mismo punto en el fondo de la instalación de Cal Rodó. Las distintas ubicaciones de los instrumentos no tendría por qué influir en la medición de éstos si las condiciones de contorno fuesen las mismas, pero resulta que éstas varían de un punto a otro: en el tramo donde está alojada la sonda llamada de río la pendiente es mayor que en el aforador donde ésta es prácticamente nula, razón por la cual, en situaciones de mismo caudal, la velocidad en el primer tramo es mayor y el calado menor, mientras que en el segundo tramo, como la pendiente es cero y además hay una sección de control, la velocidad disminuye a la vez que el calado aumenta.

Otro aspecto importante que se observa en las distintas crecidas analizadas es el relacionado con las concentraciones del sedimento en suspensión: si uno se fija en el perfil de concentraciones puede apreciar que éste sigue un esquema similar al del calado pero con la única diferencia entre ambos de que el pico de concentración sucede antes que el pico de calado. La explicación a este fenómeno es que el sedimento que se erosiona en las cuencas y que se va depositando en el lecho del río, y el material que otras avenidas no han llegado a evacuar yace a lo largo del curso del río esperando a ser transportado por una crecida. Cuando ésta tiene lugar, a medida que el caudal que fluye por el río es mayor la energía de transporte aumenta y por consiguiente, mayor es el transporte de material. El hecho de que las primeras aguas se lleven el sedimento hace que el pico de la concentración suceda antes que el del caudal.

Este fenómeno sucede cuando hay disponibilidad de material en el lecho del río, porque si se da el caso de dos eventos sucesivos donde el primero ha sido muy importante y ha transportado todo el material fuera de la cuenca, el segundo no llevará sedimento siendo la crecida de agua limpia. El fenómeno de agua clara también piede suceder en aquellos eventos de larga duración ya que en los primeros instantes de tiempo el fluido va cargado de sedimento pero una vez transportado todo el material disponible, el agua fluye sin carga hasta que se acaba el evento. Este fenómeno se observa en los dos picos de la gráfica analizada: el pico de concentración del 1 de Noviembre llega antes que el pico de caudal y unos instantes después, de forma progresiva, la concentración decrece hasta valores muy pequeños. En el caso del pico de caudal del 2 de Noviembre que es mayor que el del 1, no hay

transporte de sedimento hasta que pasado un umbral de caudal aparece concentración. Esta situación se explica porque debido a la crecida del 1 de noviembre no había material disponible en el lecho y el único material transportado en este segundo evento es aquel que el primero no pudo arrastrar por falta de energía. Una vez pasado el pico de caudal, la concentración cae fuertemente hasta ser nula.

Figura 45. Caracterización del evento del 31/10/2008 al 04/11/2008

3.2.3 Análisis de los datos de Vallcebre

Uno de los resultados obtenidos por Guillaume Nord[14] tras analizar los datos obtenidos en el aforador de Cal Rodó y a los que no sabía dar respuesta era el cambio de pendiente que se observaba en el gráfico velocidad-calado de la figura 46 entre los calados de 0.4 y 0.8 metros.

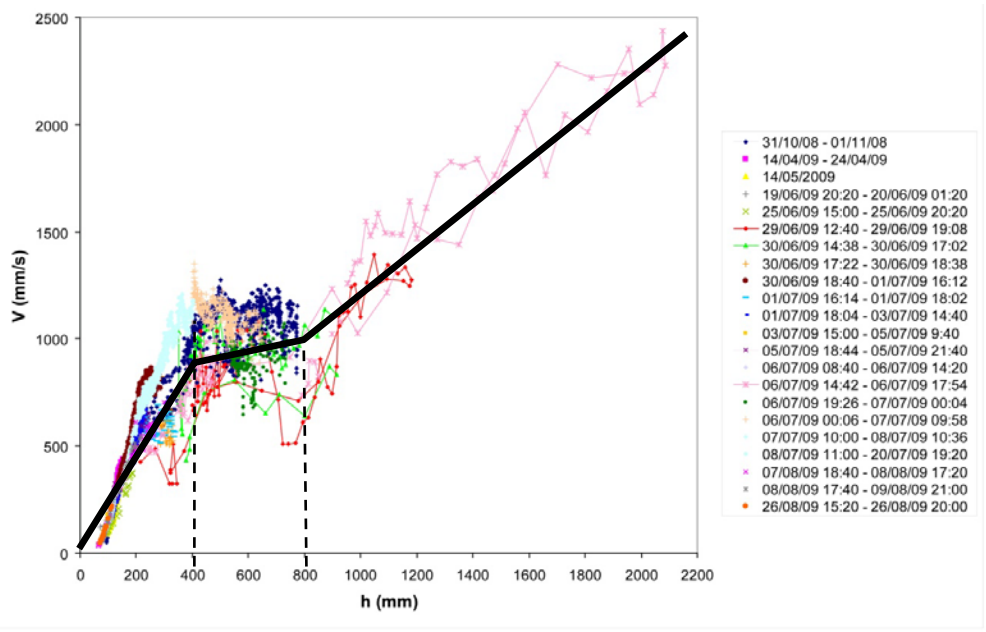


Figura 46. Relación entre velocidad y calado de todos los sucesos registrados en Cal Rodó.

Este cambio de pendiente no sólo tiene lugar con agua cargada de sedimento sino que en el aforador, en condiciones de agua sin sedimento (colas de las avenidas), también se observan los cambios de pendiente anteriormente citados. Además, esta discontinuidad no sólo sucede en el caso real sino que en los datos que se obtuvieron en el laboratorio con el modelo físico también se observa este efecto tal y como muestra la figura 47.

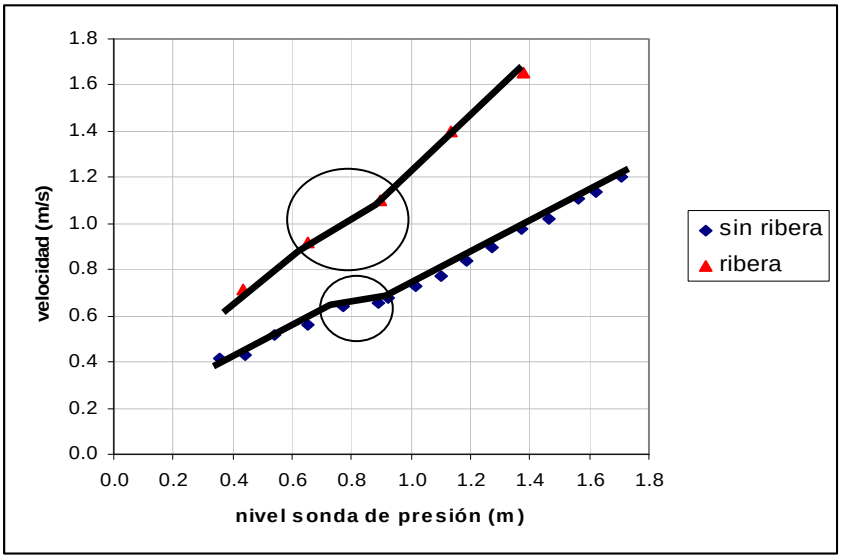


Figura 47. Relación entre velocidad y calado a partir de los datos experimentales obtenidos con el modelo físico.

[14] Como ya se ha comentado, Guillaume Nord es un investigador del "Institut Jaume Almera" del CSIC que ha hecho las funciones de tutor externo y de enlace con los datos del caso real de Vallcebre.

Para dar solución a esta discontinuidad en la relación velocidad calado se propuso la teoría que expone que los contornos de la sección transversal de la ribera que está justo aguas arriba del inicio del aforador afectan a las medidas del Starflow.

Antes de exponer la solución se expresan diversas ideas que se consideran importantes de cara a entenderla:

1. Las condiciones del río en el aforador son de régimen lento o subcrítico, lo que significa que la distribución de calados viene dada por condiciones de contorno aguas abajo.
2. En cambio, a pesar de estar en régimen lento, la distribución de velocidades viene controlada por las condiciones aguas arriba. Aún y así, puede que alguna condición aguas abajo afecte a la velocidad.
3. El Starflow es un instrumento que está situado en el eje del río y sólo obtiene las velocidades puntuales en ese punto, lo que significa que no hace la media de la sección transversal. Si la hiciese, el plano en el gráfico v-y no aparecería ya que se compensaría al tener en cuenta toda la sección.
   Debido a que el Starflow sólo mide en un punto, si en éste se producen variaciones locales de velocidades por perturbaciones en el contorno la medición varía notablemente. Estas variaciones las puede producir la geometría de la ribera de los márgenes.

   Como se puede ver en la figura 48, el hecho de que el caudal suba hace que el calado aumente originando en planta una ocupación de área mayor, pero de cara al perfil de velocidades, en los laterales sí que se aprecian variaciones pero en cambio, sobre el Starflow casi no hay ninguna variación. De este modo se observa que no se produce variación en la velocidad que mide éste.

   Por lo tanto, la explicación al cambio de pendiente de la figura 46 es que, a pesar de aumentar el caudal, como la sección también aumenta y el starflow mide en un punto concreto en el eje del río, resulta que la velocidad se mantiene constante generando un plano en el gráfico a pesar de aumentar el calado de la sección.

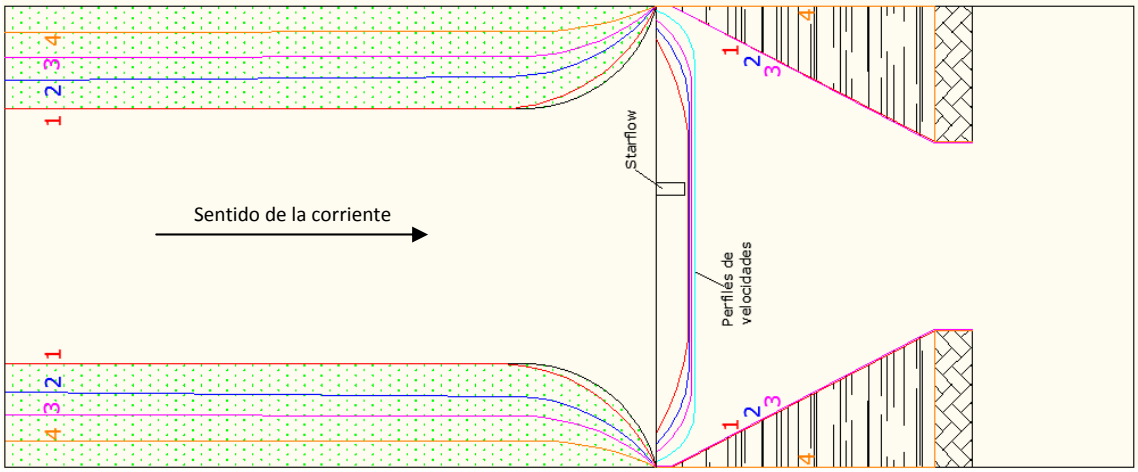


Figura 48. Planta del aforador y del tramo del río aguas arriba donde se representan las alturas de las láminas de agua y los perfiles de velocidad para distintos caudales.

3.2.4 Análisis de los instrumentos instalados

En la figura 49 se pueden apreciar las limitaciones de los distintos instrumentos instalados en el aforador.

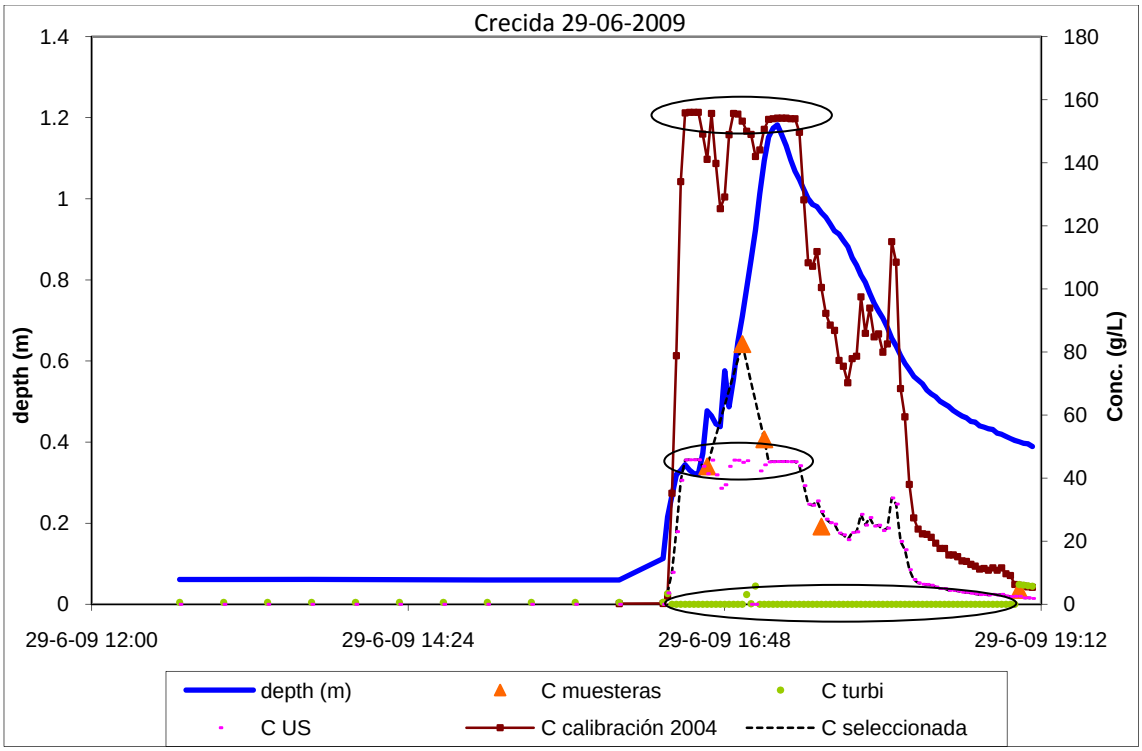


Figura 49. Límites de los instrumentos del aforador ejemplificados para la crecida del 26/06/2009

Se aprecia como los datos que aporta el ultrasonidos no superan un valor máximo de aproximadamente 40 g/l, lo que significa que para valores superiores a éste el instrumento no es capaz de medir, se colapsa del mismo modo que sucede con el turbidímetro, que a partir de 7 g/l deja de medir y genera una línea horizontal.

Una reflexión importante respecto la figura es ver la gran diferencia que hay en la concentración en función del sistema de medida que se utilice. Obviando las limitaciones de los distintos instrumentos, se puede apreciar como las medidas del ultrasonidos y las del ISCO son muy parecidas, en cambio, las que se han llamado "C calibración 2004" dan registros mucho más altos. La "c calibración 2004" es la calibración que se hizo del turbidímetro en el 2004 antes de la llegada de Guillaume Nord al equipo y se comprueba que no es correcta ya que comparando los datos con los del ISCO, que son los de referencia, éstos son mucho más elevados. A pesar de la diferencia entre las distintas mediciones, los esquemas de los tres instrumentos son iguales y por lo tanto, lo único que se ha de hacer es mejorar la calibración del 2004 ya que actualmente sobrevalora los resultados.

En esta figura se vuelve a apreciar como el pico de sedimento llega antes que el pico de caudal.

3.3 Resultados con el modelo analítico

Los resultados que aporta el modelo analítico varían en función del algoritmo matemático aplicado ya que es un modelo reversible que permite determinar las relaciones entre las características hidráulicas de dos flujos: uno cargado con material en suspensión y otro sin su presencia.

Se han realizado dos modelos distintos en función del uso que se persiga:

- Modelo para laboratorio donde principalmente se trabaja con agua sin sedimento y se quieren obtener las propiedades del flujo con sedimento (Modelo 1)
- Modelo para el análisis de datos de campo donde principalmente se dispone de datos del agua cargada con sedimento y se quiere conocer las propiedades del agua clara asociada. (Modelo 2)

El modelo está implementado de tal forma que determina el calado del flujo asociado, pero a partir de éste, se puede determinar la velocidad del flujo.

3.3.1 Funcionamiento del modelo

El modelo matemático implementado se basa en la resolución de una ecuación de tercer grado de la forma: A·y^3+C·y+D=0. Donde los valores de los coeficientes para el modelo 1 son:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot B$$

$$C = -\left[\frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot B \cdot y^2 + \rho_1 \cdot \frac{{Q_1}^2}{y \cdot B}\right] \quad (46a)$$

$$D = \rho_2 \cdot \frac{(Q_1+Q_{ss})^2}{B}$$

Siendo necesario conocer los valores de calado y la ecuación de desagüe del agua sin sedimento.

Para el modelo 2:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot g \cdot B$$

$$C = -\left[\frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot g \cdot B \cdot H^2 + \rho_2 \cdot \frac{{Q_2}^2}{H \cdot B}\right] \quad (46b)$$

$$D = \rho_1 \cdot \frac{Q_1^2}{B}$$

Donde, son necesarios los valores de calado y la ecuación de desagüe del agua cargada con sedimento.

Por ser una ecuación de orden tres se esperan tres soluciones, dos de las cuales son incorrectas para el caso que nos ocupa, pero el problema es decidir cuál es la correcta y cuáles las incorrectas. Para dar respuesta a este problema se obtuvieron las tres soluciones a partir de Newton Raphson mediante iteración y una vez obtenidas se clasificaron primero en dos grupos: soluciones positivas y soluciones negativas, éstas últimas no se tenían en cuenta ya que el calado no puede ser negativo. Respecto a los valores positivos, una de las dos soluciones era de uno o dos órdenes mayores que el calado inicial, y como el efecto del sedimento no es tan importante para las concentraciones y los calados estudiados, esta solución no se consideraba.
En resumen, se escoge como correcta aquella solución que es del mismo orden de magnitud que el dato de calado inicial y que a su vez es positiva.
Para facilitar aún más la elección de la respuesta correcta, se realizaba la gráfica con ambas respuestas y se observaba como una respuesta era del todo desproporcionada y en cambio, la otra era más lógica. En las figuras 50 y 51 se observa la diferencia entre ambas gráficas para la ecuación polinómica de Vallcebre.

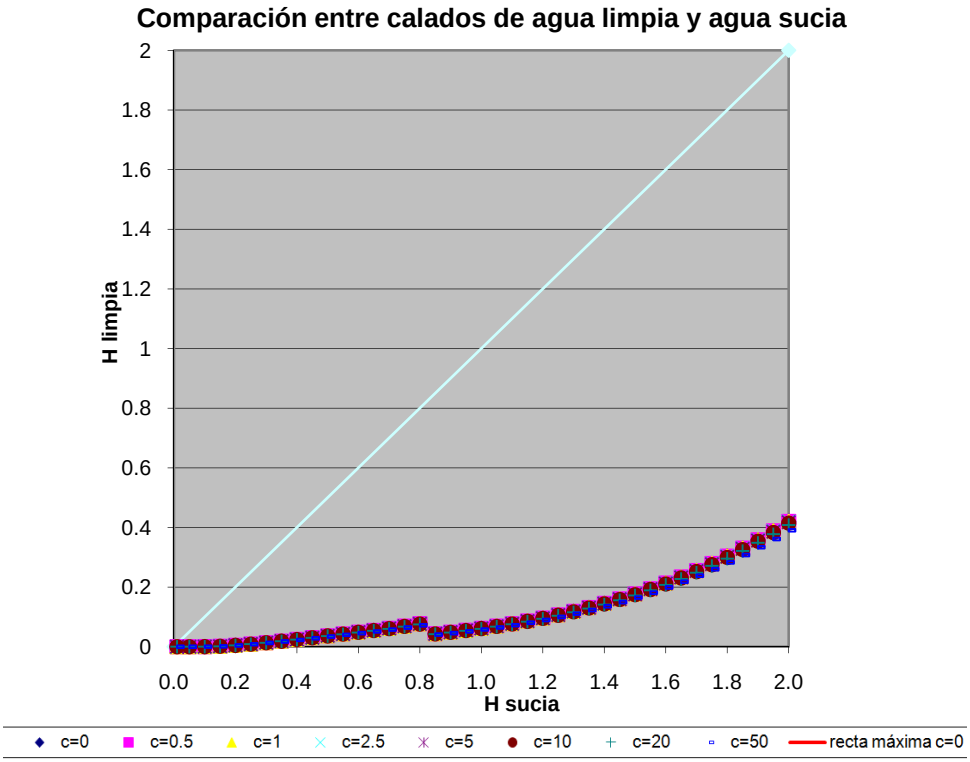


Figura 50. Comparación entre los calados de agua limpia y agua sucia

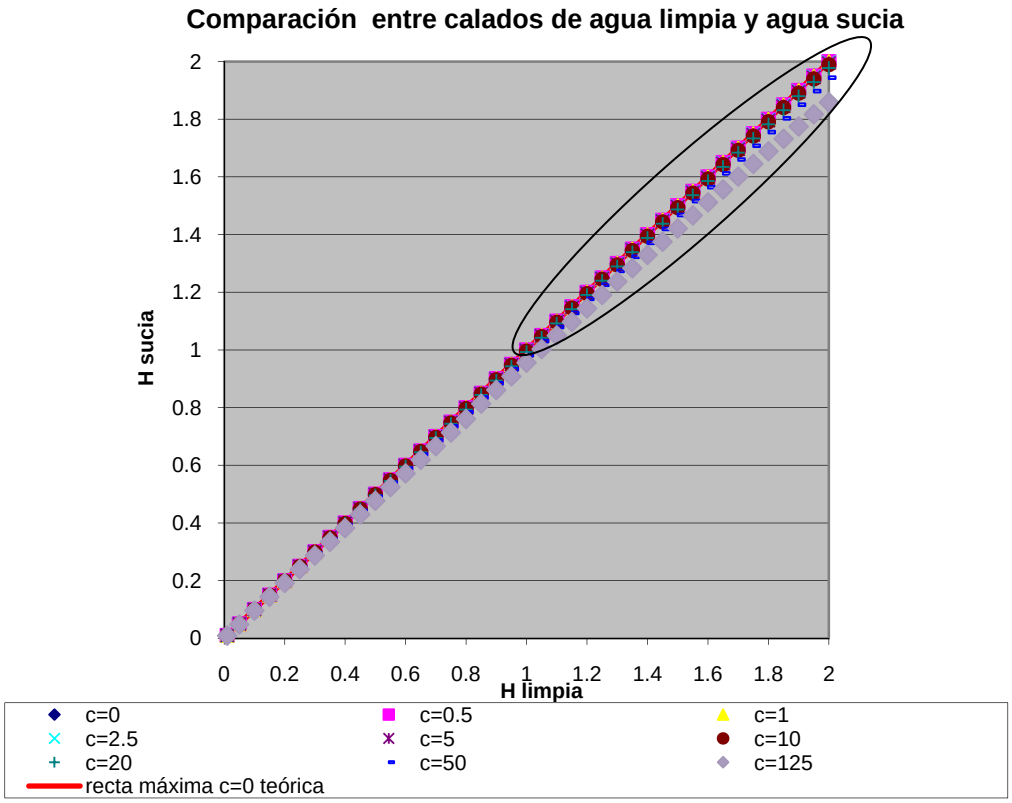


Figura 51. Comparación entre los calados de agua limpia y agua sucia

Se puede apreciar como en la primera gráfica los valores, que tendrían que ser próximos a la recta $H_{limpia} = y_{sucia}$ ya que la presencia de sedimento a las concentraciones de estudio afecta sólo ligeramente, están

muy distantes de la solución esperada. En cambio, en el segundo gráfico las soluciones sí que están próximas a la recta $H_{limpia} = y_{sucia}$ y se observa una leve desviación que es debido a la presencia de sedimento en suspensión. Esta desviación es principalmente lo que se persigue estudiar con este modelo.
Además, otra comprobación que se realiza es que para la concentración C = 0 g/l se han de obtener las mismas soluciones que los datos de calado iniciales, y como se puede apreciar, en la primera gráfica no se cumple y en cambio, en la que se considera que las soluciones son correctas sí que se cumple.

3.3.2 Ecuaciones de estudio

El modelo matemático necesita de la ecuación de desagüe (ecuación que relaciona el caudal y el calado), de la concentración y del calado como inputs para poder hallar las soluciones de los calados asociados. Tanto para el modelo 1 como para el modelo 2, tal y como se ha detallado previamente en el apartado 2.3.1, se aplicaron tres ecuaciones diferentes con el fin de alcanzar diversos objetivos:

1. Poder evaluar el modelo con tres ecuaciones totalmente distintas.
2. Poder comparar los resultados que se obtienen de las dos ecuaciones experimentales de Vallcebre: la potencial y la polinómica
3. Evaluación del modelo con una ecuación genérica o no propia del caso estudio: Chézy

Las relaciones que se han aplicado al modelo son:

- Ecuación potencial

$$Q = 4.104 \cdot y^{2.203} \quad (47)$$

- Ecuación polinómica

$$Q(y) = \begin{cases} Q_I(0.051 < y < 0.10) = 4.179 \cdot y^2 - 0.298 + 0.004 \\ Q_{II}\ (0.10<y<0.638) = 0.\ 239\text{-}6.013 \cdot y + 55.86 \cdot y^2 - 232.2 \cdot y^3 + 606.42 \cdot y^4 - (59.55 \cdot y^5 + \\ 916.93 \cdot y^6 - 514.21 \cdot y^7 + 155.48 \cdot y^8 - 19.55 \cdot y^9 \\ Q_{III}\ (y > 0.638) = 0.418 + 2.632 \cdot y - 0.955 \cdot y^2 + 2.466 \cdot y^3 \end{cases} \quad (3)$$

- Ecuación de Chézy

$$Q = C' \cdot B \cdot y^{3/2} \quad (48)$$

Donde Q_i es el caudal en m^3/s del tramo i= 1,2,3 en m^3/s, y es el calado en metros, B el ancho de la sección en metros y C' la constante de Chézy que incluye la pendiente.

Las dos primeras ecuaciones son propias del aforador de Cal Rodó mientras que la tercera es una relación genérica. Con esta afirmación se quiere hacer una reflexión sobre el hecho de que como las dos primeras ecuaciones están calibradas para Cal rodó, implica que es necesario que los valores de ancho también sean los propios del aforador de estudio. En cambio, la tercera es una ecuación genérica que puede ir con cualquier ancho arbitrario ya que su calibración no está particularizada a una sección de control concreta.

En el apartado 2.2.1 se explica que el aforador no tiene el mismo ancho para todos los puntos ni para todas las alturas y se determina el ancho en función de la posición en la que se encuentre. En este caso, lo que nos importa es conocer el ancho en función del calado ya que es el dato del cual partiremos.

El Starflow es un instrumento de medida que envía un haz sonoro con un ángulo de 30^0 respecto a la horizontal y a partir de las ondas rebotadas que recibe determina la velocidad del flujo. La serie de datos que recibe, la analiza y determina una velocidad media. A falta de más datos para poder corroborar esta afirmación, como primera aproximación se considera que la velocidad media que mide el Starflow se corresponde a la velocidad puntual de las partículas situadas a la mitad del calado. Es decir, Vmedia = V(y/2). Partiendo de esta hipótesis se determinará el ancho en función del calado.

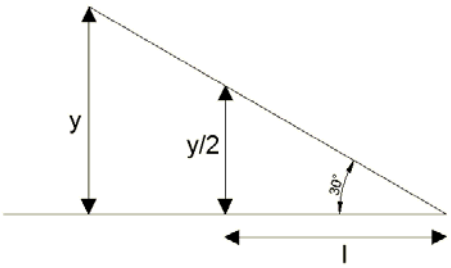


Figura 52. Representación del haz emitido por el Starflow, el calado y en el instante de medida el punto donde se considera que hay la velocidad media y/2.

La figura 52 representa el haz emitido por el Starflow, el calado y en el instante de medida el punto donde se considera que hay la velocidad media y/2.

$$tg\ 30 = \frac{y/_2}{l} \Longrightarrow l = tg\ 30 \cdot \frac{y}{2} \Longrightarrow l = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y \qquad (49)$$

El Starflow está situado a 1.565 metros del extremo aguas arriba del aforador. Pasado este punto, el ancho ya no es el del aforador sino que es el propio del río: irregular y sin estar caracterizado.

Por lo tanto, hasta l=1.565 m el Starflow medirá dentro del aforador y se podrá conocer el ancho ya que corresponde al de éste. En cambio, para valores superiores a este valor el ancho no estará caracterizado ya que será el propio de la sección irregular del río. Si aplicamos esta longitud a la fórmula (49) corresponde a un calado de 1.80 metros. En Vallcebre en pocas ocasiones se llega a calados tan altos, por lo tanto, esta limitación no influye de forma importante en los resultados.

El ancho en función de la posición de medida es:

$$B(x) = 5{,}08 - 2 \cdot m \cdot x \rightarrow \quad B(x) = 5{,}08 - 06112 \cdot x\ (m) \qquad h \leq 0.8m$$

$$B(x) = \begin{cases} 6.56\ m,\ x \in [0,\ 4.98) & \\ & h > 0.8m \\ 3.6\ m,\ x \in (4.98,\ 5.36) & \end{cases} \qquad (1)$$

Aplicando que x = 1.565 – l siendo $l = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot y$ resulta;

$$B(y) = \begin{cases} B(y) = 4.12 + 0.53 \cdot y & y \leq 0.8m \\ B = 6.56 & 0.8 \leq y \leq 1.80\ m \end{cases} \qquad (50)$$

Por lo tanto, el ancho que se considera en el modelo para poder evaluar las ecuaciones características del aforador es el de la ecuación 50 que está expresado en función del calado que determina la sonda de presión.

3.3.3 Resultados con la ecuación polinómica de Vallcebre

La ecuación polinómica del aforador, como ya se ha comentado, es una ecuación definida por tres trozos donde el grado mayor de las tres es 9. A priori, debido al elevado orden del polinomio, se piensa que los errores que se obtendrán aplicando el modelo con esta relación serán grandes, ya que el polinomio es una expresión que a medida que se aumenta el grado mejor se adapta a los puntos de estudio pero, en cambio, a pesar de adaptarse a los pares de punto no lo hace del mismo modo con la región que contiene a éstos.

Los resultados que se han obtenido aplicando la ecuación en el modelo se detallan en el anexo 2 y en la tabla 19, pero en ésta no se indican los resultados obtenidos sino el incremento o disminución relativos que representan y se ha realizado tanto para el calado como para la velocidad.

V limpia	V c=0 g/l	V c=0.5 g/l	V c=1 g/l	V c=2.5 g/l	V c=5 g/l	V c=10 g/l	V c=20 g/l	V c=50 g/l
0.039	0.000	0.016	0.031	0.078	0.157	0.314	0.626	1.559
0.264	0.000	0.018	0.035	0.088	0.176	0.352	0.704	1.760
0.439	0.000	0.019	0.038	0.095	0.190	0.381	0.762	1.910
0.573	0.000	0.020	0.040	0.099	0.198	0.397	0.794	1.994
0.503	0.000	0.018	0.036	0.090	0.181	0.361	0.723	1.807
0.637	0.000	0.019	0.038	0.094	0.189	0.378	0.756	1.893
0.797	0.000	0.020	0.040	0.100	0.200	0.400	0.802	2.013
0.985	0.000	0.022	0.043	0.108	0.216	0.431	0.865	2.178
1.201	0.000	0.024	0.047	0.118	0.236	0.473	0.949	2.400
1.446	0.000	0.026	0.053	0.131	0.263	0.528	1.061	2.695
1.579	0.000	0.028	0.056	0.140	0.280	0.561	1.129	2.878

Tabla 19. Incrementos en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

Se puede apreciar como a mayor concentración de sedimento en suspensión, mayor es el incremento de la velocidad, por lo que, se puede concluir viendo estos resultados que la presencia del sedimento acelera el flujo incrementando la velocidad en un 3%. Lo contrario sucede en el caso del calado, a mayor concentración menor es el calado llegando el calado a disminuir hasta prácticamente un 3% tal y como se puede observar en la tabla 20.

H limpia	H c=0.0 g/l	H c=0.5 g/l	H c=1 g/l	H c=2.5 g/l	H c=5 g/l	H c=10 g/l	H c=20 g/l	H c=50 g/l
0.100	0.000	-0.016	-0.031	-0.078	-0.157	-0.313	-0.622	-1.535
0.300	0.000	-0.018	-0.035	-0.088	-0.176	-0.351	-0.699	-1.730
0.500	0.000	-0.019	-0.038	-0.095	-0.190	-0.379	-0.756	-1.874
0.700	0.000	-0.020	-0.040	-0.099	-0.198	-0.395	-0.788	-1.955
0.900	0.000	-0.018	-0.036	-0.090	-0.180	-0.360	-0.717	-1.775
1.100	0.000	-0.019	-0.038	-0.094	-0.188	-0.376	-0.750	-1.858
1.300	0.000	-0.020	-0.040	-0.100	-0.200	-0.399	-0.796	-1.974
1.500	0.000	-0.022	-0.043	-0.108	-0.215	-0.430	-0.858	-2.132
1.700	0.000	-0.024	-0.047	-0.118	-0.235	-0.471	-0.940	-2.343
1.900	0.000	-0.026	-0.052	-0.131	-0.262	-0.525	-1.049	-2.625
2.000	0.000	-0.028	-0.056	-0.139	-0.279	-0.558	-1.116	-2.798

Tabla 20. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

Como ya se ha comentado anteriormente, en nuestro estudio la caracterización del flujo que más nos interesa es principalmente la que experimenta el calado y la velocidad por la influencia del sedimento en suspensión. El la figura 53 se representan los calados del modelo para una concentración de 125 g/l. Se ha optado por esta concentración ya que es donde se ven más claramente los efectos debidos a la presencia de sedimento.

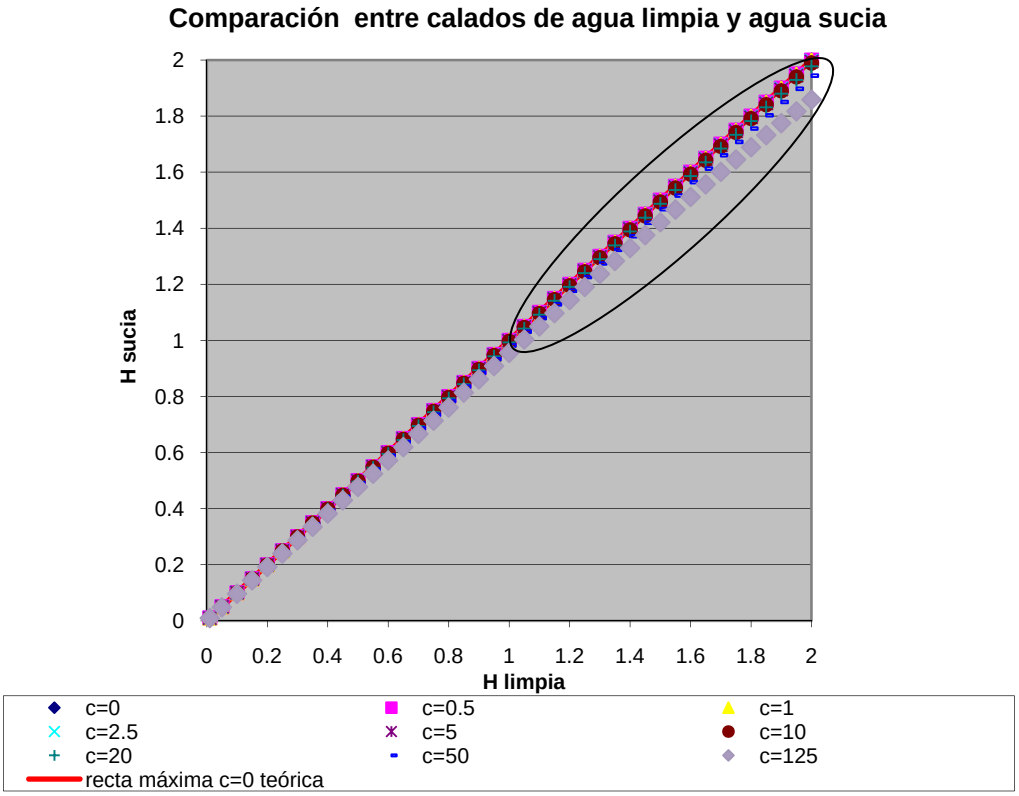


Figura 53. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación polinómica

Se aprecia como a mayor concentración mayor es la influencia del sedimento, así como para una concentración dada, a mayor calado mayor influencia debido a la presencia de sedimento. Situación lógica ya que para un calado de 5 cm la influencia será del orden de mm y en cambio, para un calado de 2 metros, la presencia de sedimentos será del orden de cm.

3.3.4 Resultados con la ecuación potencial de Vallcebre

La ecuación potencial, a pesar de no considerar para su obtención los primeros 10 cm de calado tomados con el molinete, tiene un coeficiente de regresión muy próximo a la unidad y eso hace pensar que los datos que aportará el modelo con ella serán muy correctos. El hecho de no considerar los datos del molinete hace que no se tengan bien caracterizados los primeros 10 cm de calado pero no sucede lo mismo para el resto de los valores, ya que la caracterización de éstos sí que es buena.

Por lo tanto, por tratarse de una ecuación potencial, tener bien caracterizados los datos para calibrarla y con un coeficiente de regresión tan próximo a la unidad hace pensar que los resultados que se obtendrán con ella serán más correctos que la polinómica.

Los resultados que se han obtenido aplicando la ecuación en el modelo se detallan en el anexo 2 pero en la tabla 21 se resumen algunos.

V limpia	V c=0 g/l	V c=0.5 g/l	V c=1 g/l	V c=2.5 g/l	V c=5 g/l	V c=10 g/l	V c=20 g/l	V c=50 g/l
0.039	-2.486	-2.452	-2.419	-2.317	-2.147	-1.808	-1.128	0.921
0.264	-2.458	-2.423	-2.388	-2.283	-2.108	-1.757	-1.055	1.065
0.439	-2.439	-2.402	-2.366	-2.257	-2.075	-1.711	-0.980	1.231
0.573	-2.425	-2.387	-2.349	-2.236	-2.046	-1.666	-0.903	1.410
0.503	0.000	0.037	0.075	0.187	0.375	0.750	1.504	3.783
0.637	0.000	0.038	0.077	0.192	0.385	0.771	1.546	3.894
0.797	0.000	0.040	0.079	0.198	0.396	0.794	1.593	4.018
0.985	0.000	0.041	0.082	0.204	0.409	0.819	1.644	4.154
1.201	0.000	0.042	0.084	0.211	0.423	0.847	1.700	4.303
1.446	0.000	0.044	0.087	0.218	0.437	0.876	1.761	4.465
1.579	0.000	0.044	0.089	0.222	0.445	0.892	1.793	4.552

Tabla 21. Variaciones en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

En este caso se puede observar como para valores pequeños de calado y concentración la velocidad con carga de sedimento es menor que en la situación sin carga de sedimento, pero por general la velocidad aumenta y llega a hacerlo hasta un 4.5 % en el caso del calado de 2 metros y la concentración de 50 g/l. En cambio, en el caso del calado todos son menores al de agua clara alcanzando un máximo de un 3% como sucedía en el caso de la ecuación polinómica

H limpia	H c=0.0 g/l	H c=0.5 g/l	H c=1 g/l	H c=2.5 g/l	H c=5 g/l	H c=10 g/l	H c=20 g/l	H c=50 g/l
0.100	0.000	-0.016	-0.031	-0.078	-0.157	-0.313	-0.622	-1.535
0.300	0.000	-0.018	-0.035	-0.088	-0.176	-0.351	-0.699	-1.730
0.500	0.000	-0.019	-0.038	-0.095	-0.190	-0.379	-0.756	-1.874
0.700	0.000	-0.020	-0.040	-0.099	-0.198	-0.395	-0.788	-1.955
0.900	0.000	-0.018	-0.036	-0.090	-0.180	-0.360	-0.717	-1.775
1.100	0.000	-0.019	-0.038	-0.094	-0.188	-0.376	-0.750	-1.858
1.300	0.000	-0.020	-0.040	-0.100	-0.200	-0.399	-0.796	-1.974
1.500	0.000	-0.022	-0.043	-0.108	-0.215	-0.430	-0.858	-2.132
1.700	0.000	-0.024	-0.047	-0.118	-0.235	-0.471	-0.940	-2.343
1.900	0.000	-0.026	-0.052	-0.131	-0.262	-0.525	-1.049	-2.625
2.000	0.000	-0.028	-0.056	-0.139	-0.279	-0.558	-1.116	-2.798

Tabla 22. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

Tal y como se ha hecho en el caso de la ecuación de desagüe potencial, se ha optado por representar la gráfica de la relación de los calados para una concentración de 50 g/l ya que es en la que se observa mayor influencia del sedimento.

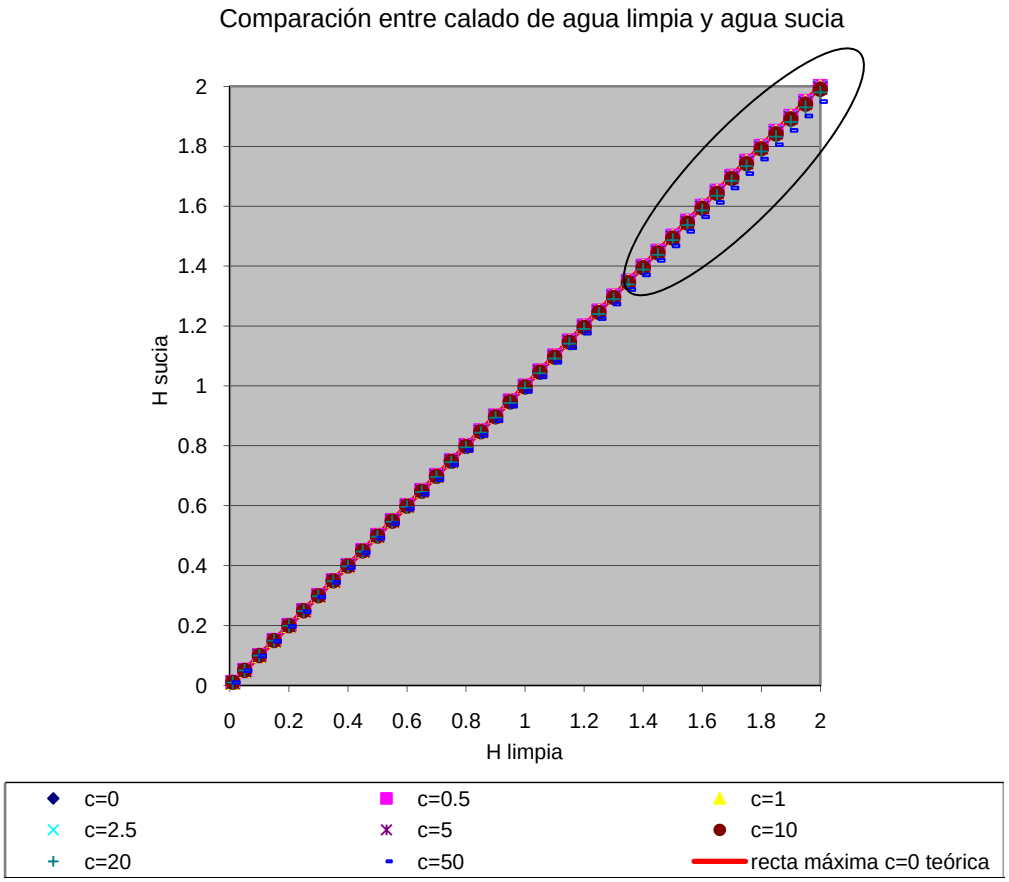


Figura 54 Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación potencial

3.3.5 Resultados con la ecuación de Chézy

En los dos casos anteriores las ecuaciones estudiadas son las propias del aforador de Cal rodó, en cambio, en este apartado los resultados que se exponen son los de la ecuación de Chézy. Se considera importante recordar que en la constante C ya está considerada la pendiente.

Los resultados que se obtengan con esta expresión no tendrían que dar lugar a errores ya que ésta es una ecuación experimental aceptada por la comunidad de investigadores.

En la tabla 23 se indican los incrementos i disminuciones en porcentaje que experimenta el fluido debido a la presencia de sedimento en suspensión. El análisis con detalle de éstos se realiza en el apartado 4.1 del capítulo de discusión.

V limpia	V c=0 g/l	V c=0.5 g/l	V c=1 g/l	V c=2.5 g/l	V c=5 g/l	V c=10 g/l	V c=20 g/l	V c=50 g/l
0.039	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.264	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.439	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.573	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.503	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.637	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567

0.797	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
0.985	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
1.201	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
1.446	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567
1.579	0.000	0.074	0.148	0.373	0.753	1.538	3.217	9.567

Tabla 23. Variaciones en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

Se puede apreciar como a mayor concentración de sedimento en suspensión, mayor es el incremento de la velocidad, por lo que, se puede concluir viendo estos resultados que la presencia del sedimento acelera el flujo incrementando la velocidad en un 3%. Lo contrario sucede en el caso del calado, a mayor concentración menor es el calado llegando el calado a disminuir hasta prácticamente un 3% tal y como se puede observar en la tabla 24.

H limpia	H c=0.0 g/l	H c=0.5 g/l	H c=1 g/l	H c=2.5 g/l	H c=5 g/l	H c=10 g/l	H c=20 g/l	H c=50 g/l
0.100	0.000	-0.016	-0.031	-0.078	-0.157	-0.313	-0.622	-1.535
0.300	0.000	-0.018	-0.035	-0.088	-0.176	-0.351	-0.699	-1.730
0.500	0.000	-0.019	-0.038	-0.095	-0.190	-0.379	-0.756	-1.874
0.700	0.000	-0.020	-0.040	-0.099	-0.198	-0.395	-0.788	-1.955
0.900	0.000	-0.018	-0.036	-0.090	-0.180	-0.360	-0.717	-1.775
1.100	0.000	-0.019	-0.038	-0.094	-0.188	-0.376	-0.750	-1.858
1.300	0.000	-0.020	-0.040	-0.100	-0.200	-0.399	-0.796	-1.974
1.500	0.000	-0.022	-0.043	-0.108	-0.215	-0.430	-0.858	-2.132
1.700	0.000	-0.024	-0.047	-0.118	-0.235	-0.471	-0.940	-2.343
1.900	0.000	-0.026	-0.052	-0.131	-0.262	-0.525	-1.049	-2.625
2.000	0.000	-0.028	-0.056	-0.139	-0.279	-0.558	-1.116	-2.798

Tabla 24. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión.

Del mismo modo que se ha hecho para los casos anteriores, para Chézy también se hace la representación de la gráfica de relación entre calados para una concentración de sedimentos de 50 g/l. En este caso, tal y como se ha indicado en el apartado 3.3.5, es importante recordar que en el caso de la ecuación de Chézy la representación gráfica se ve muy afectada por el valor de la constante C. Por ello, se ha optado por representar la misma situación pero para tres casos distintos en función del valor de la constante de Chézy:

1. C < 9.8

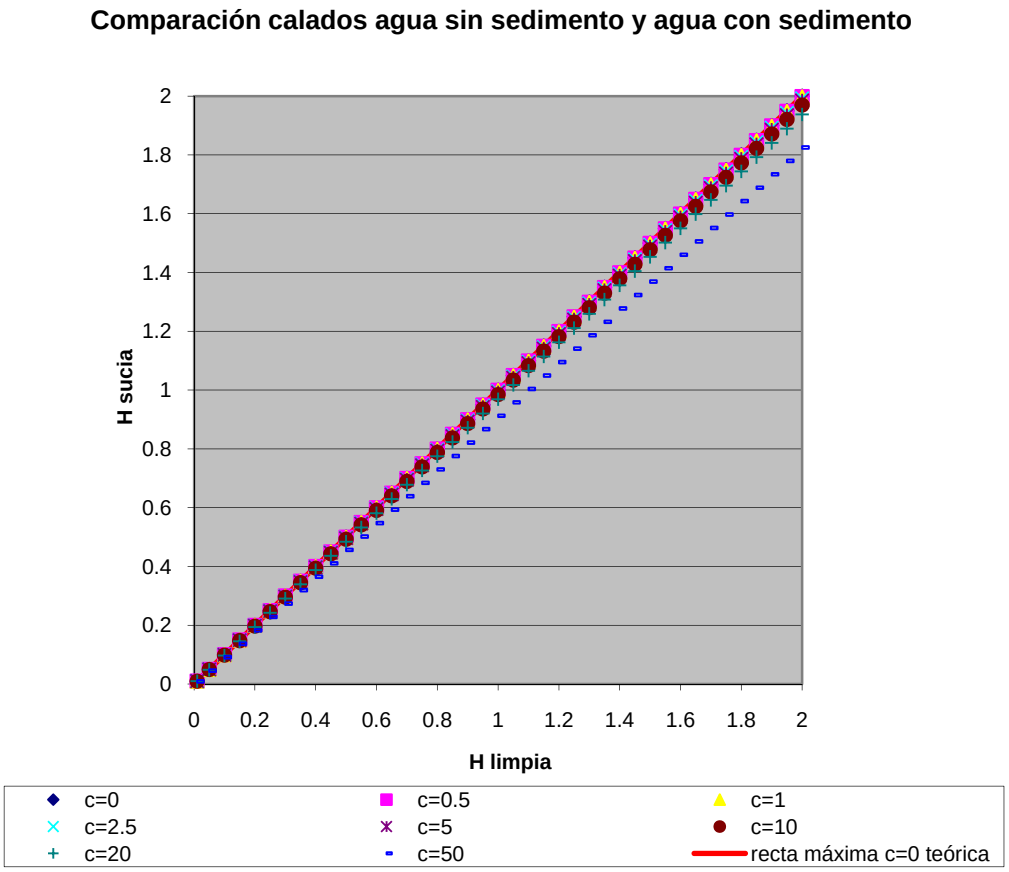


Figura 55. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C < 9.8

2. C > 9.8

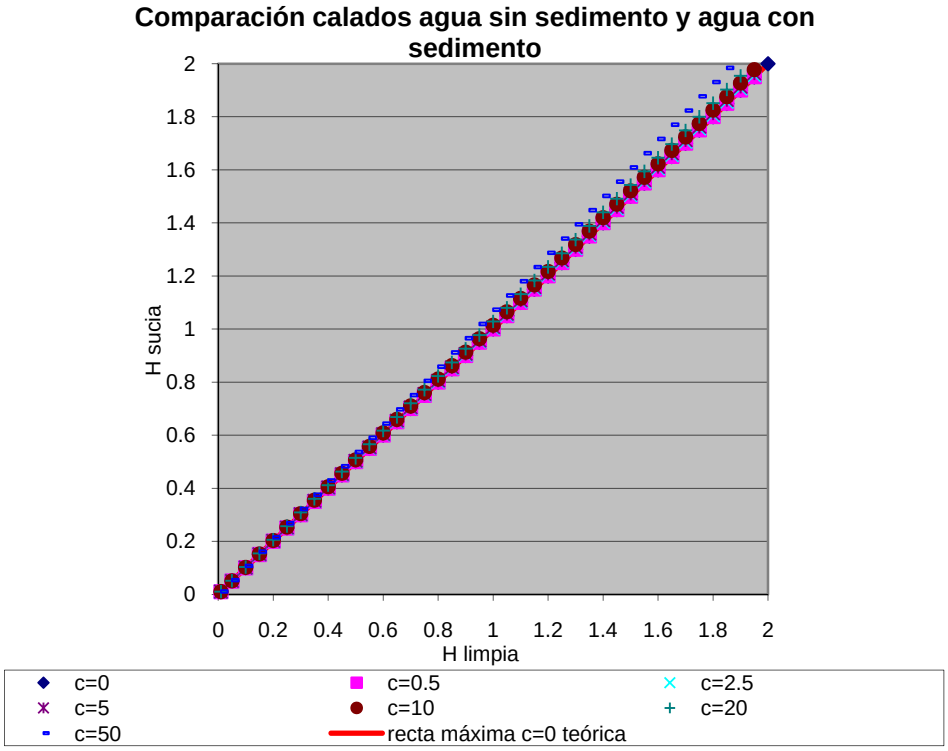


Figura 56. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C > 9.8

3. C = 9.8

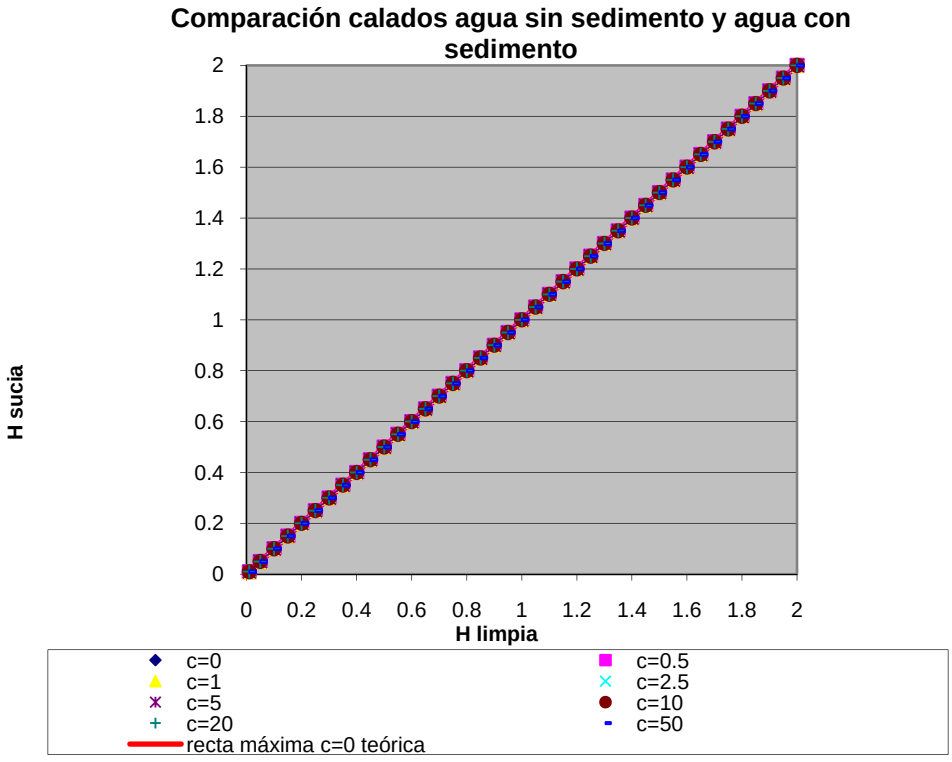


Figura 57. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C = 9.8

Se puede observar como en función del valor de la constante de Chézy, las representaciones siguen una tendencia u otra. Esta situación se explica en el apartado de discusión correspondiente.

3.4 Comprobación de la reversibilidad del modelo analítico

Tal y como se ha definido, el modelo analítico es reversible ya que según el algoritmo matemático que se aplique permite obtener las características del flujo con sedimento a partir de los datos de agua limpia o a la inversa, las características del agua limpia a partir de los datos del flujo cargado con sedimento. Para facilitar la comprensión se ha dividido en dos modelos según el algoritmo que aplique:

El modelo 1 se ha definido como aquél que se rige por el algoritmo que da las características del flujo de agua con sedimento a partir de los datos de agua clara y el modelo 2 es el que proporciona las características del flujo sin sedimento a partir de los datos de flujo cargado.

Se ha considerado conveniente realizar la comprobación de que el modelo a la práctica es reversible. Para poder realizar esta acción se ha partido de datos de agua limpia y gracias al modelo 1 se han obtenido las características del agua cargada. Los resultados obtenidos, a su vez se han introducido en el modelo 2 con el fin de obtener las características de agua sin sedimento que éste determina y poder compararlas con las introducidas inicialmente. De forma esquemática se podría representar el proceso como:

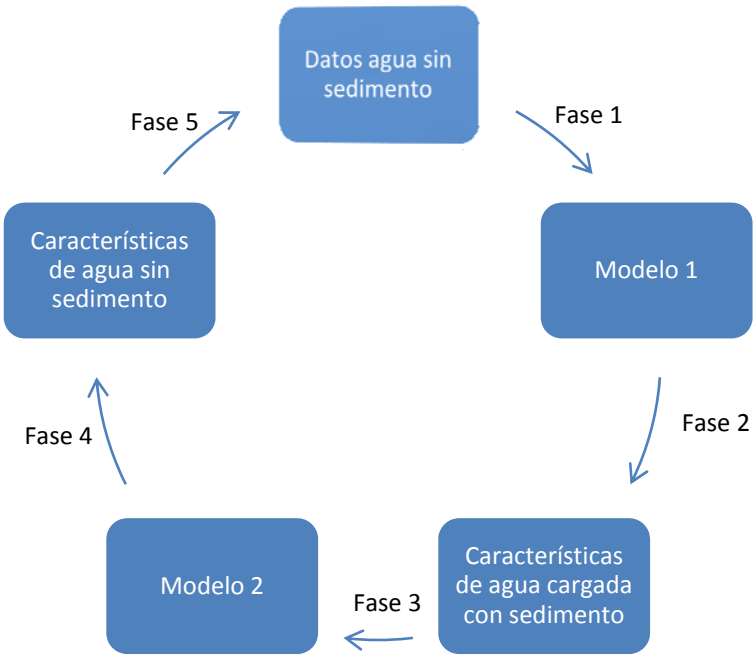


Figura 58. Fases para comprobar la reversibilidad del modelo.

Descripción de las fases:

- Fase 1: Introducción del agua sin sedimento en el modelo 1
- Fase 2: Modelo 1 determina las características del agua cargada con sedimento
- Fase 3: Se introducen los resultados del modelo 1 en el modelo 2
- Fase 4: Modelo 2 determina las características del flujo sin sedimento
- Fase 5: Comprobación de los resultados.

En la fase 5 se han comparado los datos de agua limpia que inicialmente se obtuvieron y los resultados que se han obtenido después de aplicar el modelo dos veces para comprobar la reversibilidad.

Tal y como se puede observar en el anexo 3 que es donde están detallados los cálculos, los errores relativos máximos que se obtienen crecen cuanto mayor es el calado y la concentración. Del mismo modo, también se puede apreciar como los errores son parecidos en el caso de las dos ecuaciones experimentales de Vallcebre y menores en el caso de la ecuación genérica de Chézy.

Ecuación de desagüe	Error relativo máximo
Polinómica de Vallcebre	0,25%
Potencial de Vallcebre	0,16%
Chézy	2,52%

Tabla 25. Error relativo máximo aplicando la reversibilidad en función de las ecuaciones de estudio.

En los resultados de la tabla 25 se observa como en las ecuaciones aproximadas de Vallcebre el error relativo es mucho menor que en el caso de Chézy; lo que indica que el hecho es que el modelo obtiene buenos resultados con las ecuaciones propias de Vallcebre, pero en cambio con una genérica los errores son mayores.

Del mismo modo, se observa como el error aumenta a medida que aumenta el calado y la concentración, lo que lleva a pensar que habrá un cierto calado y una cierta concentración en los que el error será muy grande y ya no será correcto tener en cuenta los resultados. El error relativo máximo aceptable depende de los investigadores y también de los estudios que se estén realizando, pero en nuestro caso, se propone un valor máximo de un 15 % que corresponde a valores de concentración de 165g/l en el caso de calados de 2 metros. Se ha considera un 15% ya que corresponde a 30 cm en un calado de 2 metros y se considera una cifra bastante importante.

La diferencia existente entre las ecuaciones polinómicas y las potenciales es muy reducida, sólo de un 0.09%. Lo que nos indica que a pesar que inicialmente se consideraba que la aproximación polinómica no era correcta, se ha comprobado que es tan correcta como la potencial.

En la tabla 26 se observa una relación de los errores relativos máximos en función del calado y de la concentración para la ecuación potencial en los que se observan dos focos de error: por un lado para concentraciones altas y calados máximos se producen los errores máximos, fenómeno que ya se había observado anteriormente. Pero por otro lado, se aprecian errores importantes a la altura de 0.8 metros que es cuando hay el cambio de sección en el aforador. Además, también se observan pequeños errores para calados pequeños ya que como se había comentado la potencial no se ajusta correctamente para calados pequeños.

Calado\concentración	0	0.5	1	2.5	5	10	20	50
0.05	0.000	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003
0.20	0.000	0.024	0.024	0.024	0.024	0.025	0.024	0.019
0.35	0.000	0.051	0.051	0.051	0.051	0.052	0.051	0.040
0.50	0.000	0.080	0.081	0.081	0.081	0.082	0.081	0.062
0.65	0.000	0.112	0.112	0.113	0.113	0.114	0.112	0.083
0.8	0.000	0.144	0.144	0.145	0.146	0.147	0.144	0.104
0.95	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.006	0.039
1.10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.008	0.050
1.25	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.010	0.063
1.40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.003	0.013	0.078
1.55	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.016	0.095
1.70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.019	0.114
1.85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006	0.022	0.136
2.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.007	0.026	0.160

Tabla 26. Valor de los errores relativos máximos en función del calado y de la concentración para la ecuación potencial.

En conclusión, se comprueba que el modelo es reversible y que además el error que presenta en la reversibilidad es de un máximo del 2.52%, es decir, para un calado de 2 metros el error es de 5cm. También se aprecia como en función de la exactitud que presente la ecuación de desagüe aplicada el error varía: a mayor precisión menor error y a menor precisión mayor error. Por lo tanto, es importante obtener una buena ecuación de desagüe para minimizar los errores en la utilización de este modelo.

3.5 Comparativa entre la ecuación potencial y la polinómica de Vallcebre

En el apartado anterior se ha visto que si se determina la reversibilidad, es decir, si se aplica el modelo dos veces seguidas la diferencia entre aplicar una ecuación u otra es un error relativo máximo del 0.5%

En este apartado, lo que se pretende es ver qué error hay entre escoger como ecuación de desagüe de Cal Rodó la relación polinómica o la potencial. A priori, tal y como se ha comentado en capítulos anteriores, la polinómica en teoría es peor ya que el polinomio es una función que a medida que le aumentas el grado se adapta a los puntos indicados pero puede no ajustarse a la región que contiene a éstos ya que se trata de una función muy variable. En cambio, la función potencial es más rígida y menos variable y quizás no pasa por todos los puntos indicados pero sí que cumplirá la región que contiene a éstos.

Para evaluar ambas ecuaciones, se ha optado por aplicar el modelo con cada una de las ecuaciones que se han determinado y ver qué diferencias existen entre ellas. Con los datos de los que se disponen actualmente, sólo se puede ver la diferencia de resultados entre ambas. Luego en un futuro, con una serie más importante de datos del campo y de laboratorio se podrá observar cuál de las dos es la más aproximada a la realidad.

En el anexo 3 se muestran las diferencias relativas entre los resultados obtenidos por ambas ecuaciones y para dos situaciones distintas: una para el modelo 1 y otra para el modelo 2.

Las diferencias máximas, como ya se ha observado en el caso de la reversibilidad, se dan para las mayores concentraciones y calados: en el caso del modelo 1, la diferencia máxima para una concentración de 50 g/l y un calado de 2 metros es del 0,26%, mientras que la del modelo 2 es del 0,21%, es decir, el error entre ambas es del orden de 5-6 mm para un calado de 2 metros.

Es una diferencia mínima que podría ser el propio error de realizar simplificaciones y redondeos. Por lo tanto, en el caso particular de Vallcebre, ambas aproximaciones son igual de correctas. El paso siguiente sería evaluarlo con datos de campo para poder verificar los resultados y hacer la calibración del modelo si es necesario.

Capítulo 4

DISCUSIÓN

4.1 Discusión resultados del canal

4.1.1 Influencia del sedimento sobre el agua

Tal y como se ha expuesto en apartados anteriores, la toma de medidas en el canal se realizó con diferentes instrumentos y en dos situaciones totalmente distintas: agua sin carga de sedimento y agua con una cierta concentración.

Para determinar la velocidad del flujo se utilizó el Starflow, que como ya se ha comentado, es un sistema continuo de medida basado en el efecto Doppler, y un molinete con la hélice situada a 5 centímetros del lecho del canal. Con ambos instrumentos se realizó una serie de medidas continuas que permitieron apreciar y determinar las diferencias entre las situaciones sin sedimento y con sedimento.

Para determinar el calado se utilizaron tres sistemas diferentes: una regla posicionada a 12,49 metros del extremo más aguas arriba del canal, la sonda de presión ubicada en la misma posición que el Starflow (11,18 m) y una serie de 16 transparencias con papel milimetrado impreso en ellas. Tanto la sonda de presión como la regla graduada dan la medida del calado en un punto concreto, en cambio, las transparencias permiten representar el perfil longitudinal del calado y de este modo poder observar si el calado es variable a lo largo del canal y si es así, poder caracterizar la curva de remanso que se genera al no tener pendiente.[15]

La concentración teórica en el canal considerando que no hay depósito del material en el fondo y suponiendo que la mezcla es homogénea corresponde a 100 kg de harina de sílice mezclados con 4m^3 de agua que es una concentración de 25 g/l. Como ya se ha explicado en el apartado 3.1.3.4, aún siendo el material muy fino se produjo sedimentación en el fondo del canal durante el ensayo; en cambio, en los depósitos y en el decantador no se produjeron sedimentaciones ya que se estuvo agitando de forma manual el agua contenida en su interior. Por lo tanto, debido a que se depositó material en el fondo formando pequeños rizos, la concentración real del flujo fue menor a la teórica máxima. Previendo el posible depósito de material, se decidió tomar muestras del agua con sedimentos para poder estudiar la concentración real del flujo.

En un punto situado a 14.60 metros del extremo aguas arriba del canal, con unas botellas normalizadas se tomaron 41 muestras del flujo cargado con sedimento cada 30 segundos durante aproximadamente los veinte minutos de duración del ensayo. Posteriormente, el interior de las botellas fue desecado y calculada su concentración. En el anexo 2 se detallan la concentración de las 41 botellas.

La concentración media del flujo fue de 14.06 g/l que es el 56% de la concentración teórica máxima estimada que era de 25 g/l. Por lo tanto, un 44% del material no estaba en suspensión sino que yacía en

[15] Al no tener pendiente el canal, resulta que no hay flujo uniforme ya que éste sólo se da para situaciones con pendiente. Por no tratarse de un flujo uniforme, se genera una curva de remanso que en el caso estudiado es una M2

el lecho del canal o en el fondo de los depósitos y del decantador. Esta cifra es una sorpresa ya que es un elevado % el que sedimenta a pesar de realizar todos los cálculos para que no sucediese.

La altura media de los rizos a lo largo del canal fue de 3.5mm, lo que significa que el volumen aproximado de precipitado en el lecho del canal era de 0.019m^3 que por tratarse de material natural[16] y teniendo en cuenta los huecos, tiene una densidad de 2000kg/m^3. Por lo tanto, en el fondo del canal había 38,85 kg de material, en suspensión había 56.24 kg y los 4.91 kg restantes estaban depositados en otro punto del canal, seguramente en los depósitos de agua o en el decantador. Estos datos muestras que la agitación automática o manual es un buen sistema para reducir la precipitación en los puntos en los que se reduce drásticamente la velocidad del agua.

Durante transcurso del ensayo, se optó por tomar datos de la velocidad y del calado para un mismo caudal de 0.012 m^3/s en las dos situaciones de estudio: agua cargada con sedimento y agua sin sedimento para poder realizar su comparación a posteriori. Un resumen de los resultados obtenidos se puede ver en la tabla 27.

Agua sin sedimento			Agua con sedimento (14.06 g/l)		
Velocidad Starflow (m/s)	Velocidad Molinete (m/s)	Calado (m)	Velocidad Starflow (m/s)	Velocidad Molinete (m/s)	Calado (m)
0.322	0.357	9.6	0.359	0.380	9.4

Tabla 27. Comparativa de velocidad y calado en las distintas situaciones de estudio

Se observa como con la presencia del sedimento en suspensión la velocidad del agua aumenta una media de 6.9% midiéndolo con el molinete o de 11.5% midiéndolo con el starflow. El porqué de la diferencia entre ambas mediciones sería un tema a estudiar en el desarrollo de otra tesina de especialidad.

Como era de esperar observando los datos de velocidad y conocedores de que el caudal es el mismo en ambas situaciones, resulta que el calado es menor con sedimento que sin sedimento. La diferencia de calado entre ambas situaciones medida con los distintos instrumentos se muestra en la tabla 28

Instrumento de medición	Calado sin sedimento (cm)	Calado con sedimento (cm)	Diferencia de calado (cm)
Sonda de presión	9.6	9.4	0.2
Regla graduada	9.4	9.1	0.3
Transparencias[17]	9.3	9.0[18]	0.3

Tabla 28. Comparativa de calados en función del instrumento de medición y de la situación de estudio.

Como se puede apreciar no todos los sistemas de medición dan lo mismo: la sonda de presión se basa en calcular el peso de la columna de agua y a partir de éste determina el calado. En cambio, en los otros dos sistemas la precisión la marca el observador con el inconveniente de que se puede dar el caso en que un observador no considere el menisco que se genera por estar el agua en contacto con el vidrio y en cambio otro sí que lo tenga en cuenta dando lugar a un error entre ambas mediciones de 2 o 3mm.

[16] El material introducido en el canal es harina de sílice formada de Cuarzo, material natural con una densidad de 2.65 kg/m^3. Si se considera un 30 % de huecos, resulta una densidad de 2 kg/m^3.

[17] El calado asociado a cada una de las transparencias se ha realizado midiéndolo en tres puntos por transparencia: en el punto más a la izquierda, en el más a la derecha y en el del centro. Posteriormente, se ha hecho la media de los tres y se le ha restado la altura media de las rizos de la representados en la transparencia.

[18] Calado medio de la transparencia número 13 que está localizada en la misma posición que la regla graduada y al que se le ha restado la altura media de los rizos representados en ella.

Las diferencias que existen entre los tres sistemas son del orden del milímetro y la mayor diferencia se da entre la medida con las transparencias y la sonda de presión para flujo cargado con sedimento que puede ser debida a, como ya se ha comentado anteriormente, la sonda de presión se calibró en agua sin sedimento, por lo tanto, cuando determina el calado del agua con sedimento el peso específico del material en suspensión influye en la medida ya que aumenta el peso de la columna de agua sobre el instrumento sobrestimando la medición de éste.

Según los datos que se obtuvieron del ensayo, la presencia de sedimento en suspensión con una concentración de 14,06 g/l supone una disminución del calado del orden de 2-3 mm para un calado de poco más de 9cm de agua sin sedimento, es decir, tiene una afección de un 3.33%.

Para comprobar cuál de los tres calados con sedimentos es correcto se ha decidido aplicar la ecuación de continuidad conocidos el caudal y la velocidad de flujo.

$$Q = v \cdot Área = v \cdot B * y \qquad (16)$$

El caudal es de 0.012 m^3/s, el ancho del canal es de 0.37m y la velocidad se considera la media de la del Starflow y del molinete: 0.37m/s. Aplicando continuidad resulta que el calado tendría que ser de de 9.06 cm. Por lo tanto, las mediciones más correctas resulta que son las dos que realiza el observador: regla graduada y transparencias. En teoría, éstas últimas con el papel milimetrado impreso sobre ellas tendrían que ser las medidas más precisas, pero como se ha comentado en párrafos anteriores, la medida de éstas depende del observador y de sus criterios de representación.

4.1.2 Perfil longitudinal

Para poder caracterizar correctamente el perfil longitudinal de la lámina libre de agua, como ya se ha explicado en apartados anteriores, se decidió colocar unas transparencias impresas con papel milimetrado. Se consideró conveniente tomar este tipo de medidas principalmente por dos motivos:

1. Observar la existencia de pendiente transversal en el canal comparando los calados marcados en dos transparencias paralelas situadas en un mismo punto a cada lado del canal.
2. Determinar la curva de remanso que se genera en la lámina de agua

En el canal existe una pequeña pendiente transversal del orden de 0.41 % hacia la derecha. A simple vista se observa claramente cuando los primeros litros de agua se desplazan por el canal ya que lo hacen más por la derecha que por la izquierda y también cuando se vacía ya que se queda un poco de agua acumulada en el lado derecho. Aún y existiendo esta pequeña pendiente transversal, no afecta en nada a los resultados.

Las curvas de remanso que se generan en el canal son debido a que no se alcanza el régimen uniforme ya que se ha trabajado con el canal plano y eso hace que no se pueda alcanzar ya que para disponer de este régimen es necesaria una cierta pendiente. En el ensayo se optó por no imponer una pendiente principalmente porque el calado del flujo se reduce de forma importante y dificulta la observación de los efectos del sedimento. Además, después de ver las características del canal durante los primeros días de ensayos se observó que la curva de remanso que se genera en el canal es suave, ya que el rozamiento con el fondo es muy pequeño, y hace que no afecte a la toma de datos.

Se determinaron dos curvas de remanso: una para el ensayo con agua sin sedimento y otra para el de agua cargada con sedimento que se pueden ver representadas en la figura 59. En ambas situaciones la curva que se genera es una M2, pero la diferencia entre las dos es principalmente el coeficiente de

Manning. Se considera importante comentar que tal y como se ha expuesto en el apartado 2.4.2.8 las curvas de remanso no son siempre las mismas sino que dependen de la condición de contorno que se imponga aguas abajo con la compuerta inferior: si se ésta se levanta lo suficiente puede generarse una curva de remanso M1 del mismo modo que si va variando su posición poco a poco, para una inclinación dada el perfil que se genera es la frontera entre una M1 y una M2 que es la situación de régimen uniforme.

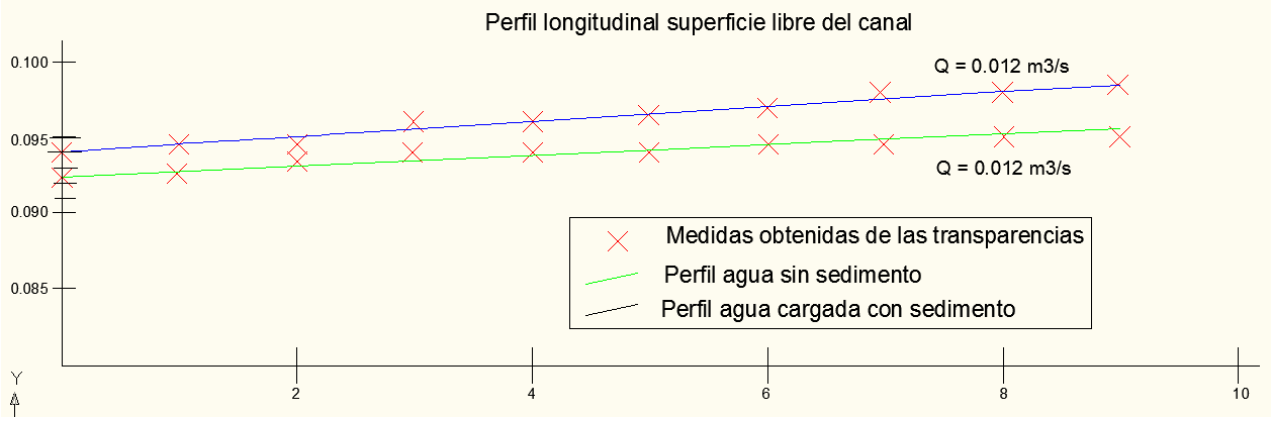


Figura 59. Perfil longitudinal de la superficie libre del canal (curvas de remanso M2)

En la tabla 29 se pueden observar los coeficientes de Manning para las dos situaciones estudiadas.

n Manning agua sin sedimento	0.008
n Manning agua con carga de sedimento	0.009

Tabla 29. Coeficiente de manning en ambas situaciones de estudio.

A simple vista una vez acabado el ensayo con sedimento en suspensión, sin realizar ningún cálculo, se podía saber que el coeficiente de Manning en la segunda situación sería mayor ya que se generaron unas formas de fondo en la solera del canal. En la situación con agua clara el rozamiento con el fondo era muy reducido ya que éste es de acero inoxidable y presenta una superficie muy lisa. En cambio, en la segunda situación se formaron unos rizos en el fondo que ofrecían mayor rozamiento al flujo y por lo tanto, mayor coeficiente de Manning.

Se considera importante comentar que los rizos debido a su altura, generalmente afectan a la uniformidad de la superficie del flujo, pero en el caso de estudio la altura de los rizos generados era pequeña y eso hacía que su afectación a la superficie libre del agua fuera despreciable. Aunque no afectan a la superficie, sí que lo hacen al calado al cual se le ha de restar la altura de los rizos para determinar la altura real de la lámina de agua.

4.1.3 Formas de fondo

La sorpresa al realizar el ensayo con material en suspensión fue al contemplar que pasados unos breves instantes de tiempo se depositaba en el fondo del canal una fina capa de material generando una tapizado de rizos. Como ya se ha relatado, antes de realizar el ensayo con sedimento se calculó el número de Rouse a partir del cual se determinó la velocidad de caída de las partículas que a su vez se utilizó para conocer el tamaño del material a introducir en el flujo para que no se produjera depósito. Finalmente, se escogió un material aún más fino (D_{50} = 25µm) que el que los cálculos indicaban para garantizar así la suspensión.

Convencidos de que si se producía sedimentación sólo sería en los depósitos y en el decantador, la sorpresa se produjo cuando vaciamos de agua el canal y se descubrió un tapizado de rizos asimétrico distribuido a lo largo de todo el canal la altura máxima de los cuales era de 7mm y tenían una longitud de onda media de aproximadamente 4 cm. Se decidió tomar muestras del sedimento del fondo con la finalidad de saber qué granulometría había precipitado y ver qué diferencia había con del D_{50} indicado por el fabricante.

Como ya se ha comentado, el ensayo se realizó con harina de sílice Quarzfin Q-12 con un D_{50} entre 17 y 25.5µm, según el instrumento de medición[19], y se introdujeron 100 kg de sedimento en un volumen de agua clara del orden de $4m^3$. Tras analizar las muestras que se tomaron del material que formaba los rizos del fondo, se obtuvo que la granulometría de éstas era de un D_{50} = 39.70µm, que corresponde a menos del 20% del material tal y como se observa en la gráfica de distribución granulométrica del anexo 2 facilitada por el fabricante. Este valor es totalmente razonable ya que es normal que el material del fondo sea de media mayor al del conjunto, ya que en éste se depositan las partículas más pesadas, y por lo tanto, las de diámetro mayor a igualdad de densidades.

En conclusión, se puede afirmar que a pesar de haber calculado previamente el diámetro del material para que no se produjese sedimentación a partir de la relación entre el número de Rouse correspondiente al canal y de la velocidad de caída de las partículas, y habiéndole aplicado un factor de mayoración a esta relación para asegurar el no precipitado, al final se ha generado depósito en la solera del canal. Este hecho nos indica que el transporte de sedimento en suspensión y el transporte de fondo coexisten para ciertas concentraciones, y por lo tanto, la hipótesis planteada de que para materiales con ciertas granulometrías no se produce transporte de fondo no es del todo cierta ya que depende de la concentración.

En la descripción de Vallcebre se ha relatado que en el aforador de Cal Rodó se hizo un análisis del transporte de fondo y se concluyó que éste era de sólo un 1%. Viendo los resultados obtenidos en el canal y observando las altas concentraciones que se alcanzan en Vallcebre, se considera que una posible explicación que justifique un transporte de fondo tan reducido es que la parte final de la crecida constituida por agua limpia, al no tener carga de sedimento, se lleva el material que yace en el fondo. Otra posible explicación podría ser que para cada calado el agua tiene una cierta capacidad para mantener el material en suspensión que aumenta con el calado y que depende de las propiedades hidráulicas del agua y de las características del material.

Con los resultados obtenidos en esta tesina, se cree que puede ser interesante volver a determinar el transporte de fondo en Vallcebre centrando el interés en determinar qué razón es la que hace que sólo haya un 1% de este tipo de transporte.

4.2 Discusión resultados del modelo

En los apartados anteriores dedicados al modelo ya se ha comentado que éste consiste en un diferencial de un perfil longitudinal en el cual aguas arriba se inyecta un flujo sin carga de sedimento, a lo largo del diferencial se introduce material que, por sus características previamente establecidas, no se deposita

[19] Según indica el fabricante en la ficha de la harina de sílice Quarzfin 12 selecionada para el ensayo, se obtuvieron dos medidas de d_{50} con instrumentos diferentes: Mastersizer 2000 y Mastersizer S, que obtuvieron valores de d_{50}=25.5 y d_{50}=17µm respectivamente.

en el fondo; y por la sección de control aguas abajo sale el agua mezclada con carga de sedimento en suspensión. Para poder implementar este modelo matemático son necesarios unos algoritmos ya comentados en el capítulo de metodología que nos permiten obtener las características del fluido con o sin carga de sedimento en función del algoritmo que se introduzca.

El modelo implementado necesita de tres inputs para poder realizar los cálculos que son la concentración del flujo, el calado y la relación de desagüe del aforador que se estudie. En el caso de estudio, se ha optado por desarrollar el modelo a partir de tres ecuaciones: dos características del aforador de Cal Rodó: una ecuación polinómica y una potencial; y una ecuación más genérica que es la de Chézy para casos más generales.

A priori, como ya se ha explicado, la ecuación polinómica del aforador de Cal rodó que es de grado 9 tendría que ser menos precisa que la potencial ya que la polinómica a medida que aumentas el grado se ajusta mejor a los puntos pero no tiene porqué ajustarse correctamente a la región que contiene a éstos. En cambio, la potencial es una ecuación que se ajusta a los puntos y su la región que los contiene.

4.2.1 Comparación de las ecuaciones características de Cal rodó

En el apartado 3.5 se ha hecho una breve comparación entre las dos ecuaciones de desagüe características de Cal Rodó: la polinómica y la potencial las cuales se han utilizado como inputs tanto en el modelo 1 como en el modelo 2 y que han permitido obtener los resultados que se encuentran detallados en el anexo 3. Tras comparar los resultados con ambas relaciones, se comprueba que éstos son del mismo orden y que el error relativo máximo entre ellos es de sólo un 0.26% que para un calado de 2m corresponde a 5-6mm, error que podría ser el propio de hacer operaciones de simplificación o de redondeo. Por lo tanto, ambas ecuaciones presentan para el caso de estudio resultados idénticos.

En la figura 30 se observa de forma gráfica la comparación entre ambas ecuaciones para calados hasta 2 metros que son los máximos registrados en Cal rodó.

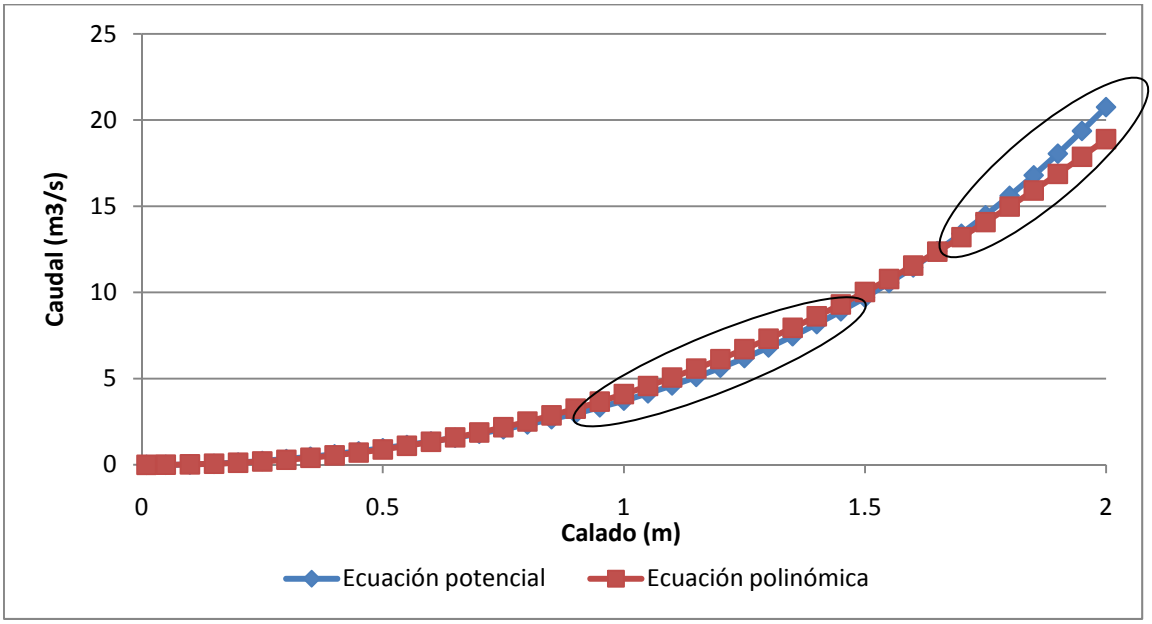


Tabla 30. Comparativa entre la ecuación polinómica y la potencial hasta 2 metros de calado.

Se comprueba como los resultados para ambas ecuaciones en este rango de calados son muy parecidos, aunque hay dos zonas en las que se aprecia como las dos ecuaciones difieren ligeramente: el tramo

entre los calado de 1 y 1,5 metros y el tramo a partir de 1,8 metros. Tal y como se ha comentado anteriormente, las mayor diferencia entre los resultados obtenidos con ambas ecuaciones tiene lugar para el calado mayor que es el de 2 metros, siendo ésta de 5mm.

Si en vez de limitar la comparación de ambas ecuaciones al calado máximo que se ha registrado en la cuenca de estudio, ampliamos el calado hasta un valor fuera de los órdenes de magnitud del calado del río para ver cómo evolucionan, se observa como la polinómica rápidamente difiere de la potencial para valores mayores a 3 metros de calado. No se puede afirmar cuál de las dos es correcta para calados mayores a 2 metros ya que ambas han sido determinadas con datos empíricos hasta este valor. Además, es posible que ninguna de las dos ecuaciones refleje de forma correcta la realidad para calados mayores. Si se desease conocer este aspecto, se tendrían que realizar más ensayos en el laboratorio con el modelo físico con el fin de obtener datos experimentales para calados mayores.

En la figura 31 se ve reflejada la diferencia entre ambas ecuaciones hasta calados de 15 metros.

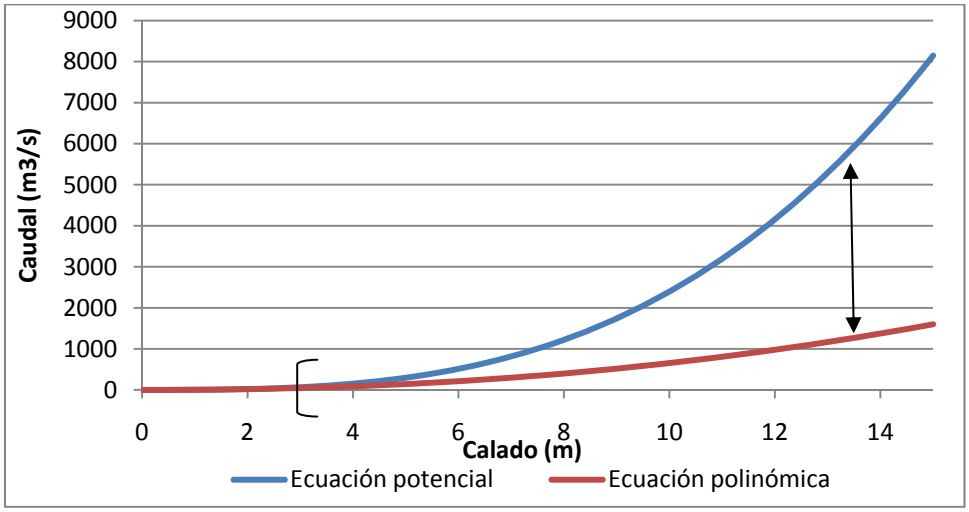


Tabla 31. Comparativa entre la ecuación polinómica y la potencial hasta 15 metros de calado.

4.2.2 Corrección de los resultados del modelo inicial

En la primera versión del modelo analítico, uno de los inputs que se necesitaba, igual que en el actual modelo, era la relación de desagüe del aforador de Cal Rodó obtenida a partir de los datos experimentales del modelo físico en el laboratorio. El modelo se implementó de tal forma que las ecuaciones de conservación de la masa y de la continuidad eran por unidad de ancho, lo que significaba que las ecuaciones eran independientes del ancho de la sección.

Se calcularon una serie de resultados que al obtenerlos ya se pensó que no eran correctos pero se vio más claro al representarlos gráficamente ya que se observó que no eran posibles por varios motivos:

1. Para una concentración c = 0 g/l, al no haber presencia de sedimentos los calados han de ser los mismos en ambas situaciones, por lo tanto, los puntos han de estar sobre la recta $H_{limpia} = H_{sucia}$. Se puede observar en la figura 60 como este primer punto no se cumple para los primeros 0.8 m.
2. Hasta aproximadamente un calado de agua limpia de 0.8 metros, se observa una curva ilógica ya que el calado de agua sucia en algunos puntos es el doble que el de agua limpia para

concentraciones pequeñas, donde según la bibliografía la afectación del sedimento tendría que ser reducida.

3. Pasados los 0.8 metros de calado las curvas de representación tienden, en el caso de las concentraciones pequeñas, a la recta teórica de concentración cero.
4. Para las concentraciones más elevadas, los resultados son exagerados ya que no puede ser que para 2 metros de agua sucia 60 cm sean consecuencia de la presencia de sedimento en suspensión como sucede en la c = 50 g/l.

En la figura 60 se muestra una de las gráficas que se obtuvo, concretamente para la ecuación polinómica.

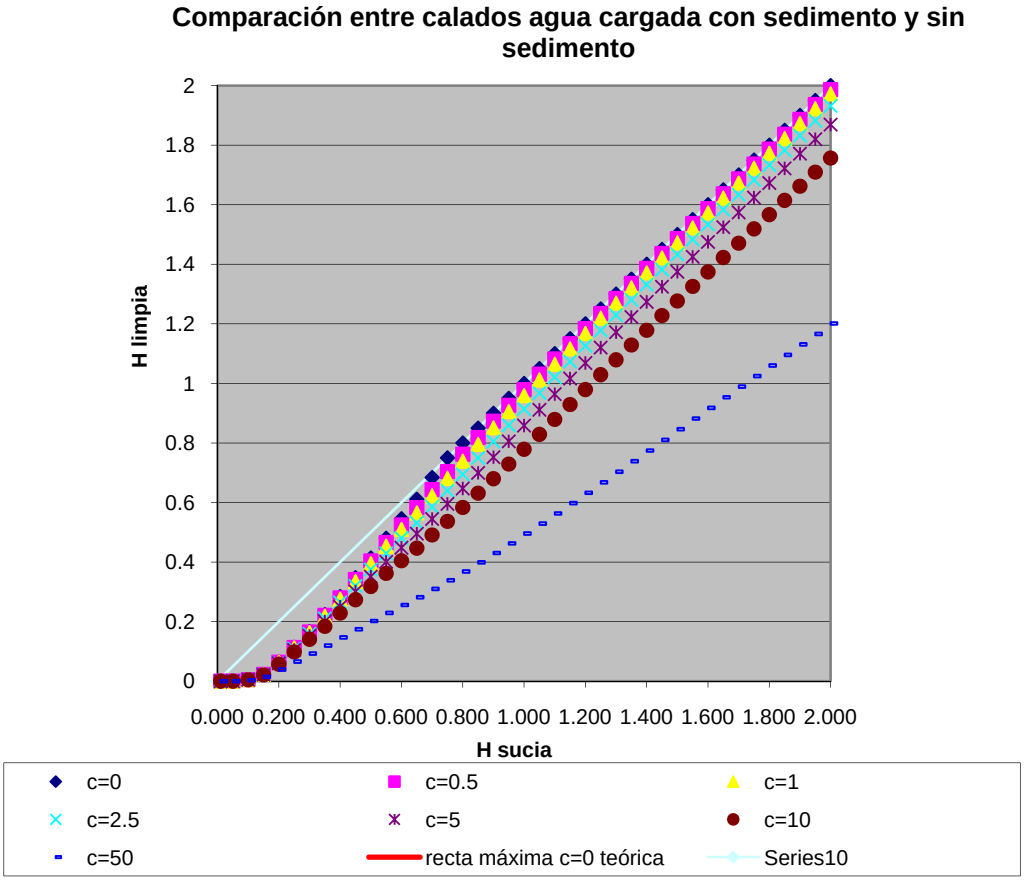


Figura 60. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia por unidad de ancho.

Viendo que los resultados que el modelo ofrecía no eran correctos pero que presentaban cierta coherencia ya que a mayor concentración mayor era la diferencia entre calados, se optó por estudiar al detalle el porqué de aquellos resultados.

Primero de todo se analizaron los resultados tal y como se ha hecho unas líneas anteriores, y se concluyó que muchas incongruencias tienen lugar alrededor del calado de 0.8 metros. Buscando una causa se revisaron los datos geométricos del aforador y se comprobó que es a esta altura cuando se produce el cambio de ancho en la sección. Posteriormente, se analizó la expresión del modelo y se apreció que se estaban aplicando las expresiones experimentales de desagüe del canal por unidad de ancho, cuando éstas se habían determinado teniendo en cuenta la geometría del aforador, es decir, el ancho del mismo. Ambas justificaciones apuntaban al mismo motivo, por lo que se decidió incorporar el ancho al modelo. Por lo tanto, el modelo dejaría de estar implementado por unidad de ancho y pasaría a estarlo con el ancho correspondiente.

El ancho se determinó en función del calado tal y como se explica en el apartado 3.3.2.

En la figura 61 se observa la misma gráfica de la figura 60 pero una vez incorporado el ancho de la sección en los cálculos.

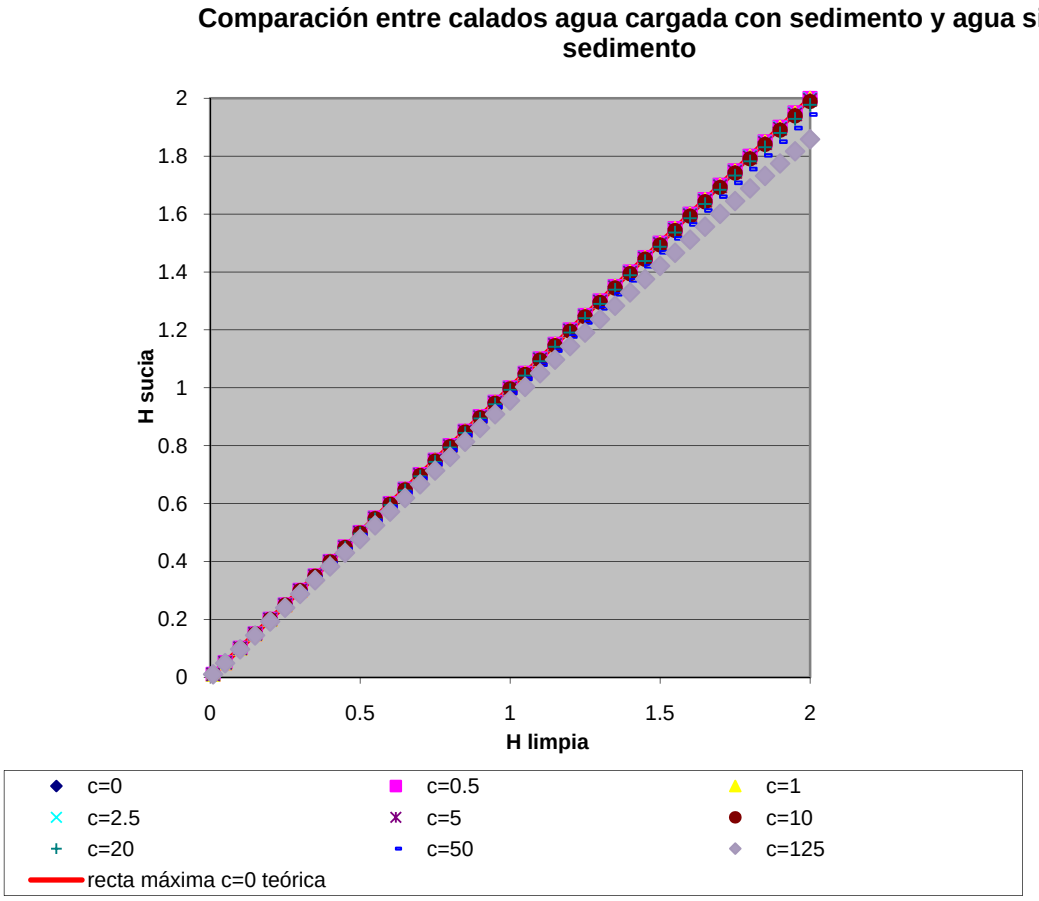


Figura 61. Comparativa entre calados de agua limpia y considerando el ancho real.

En la figura superior se comprueba que se cumplen los aspectos más importantes.

1. Para una concentración c = 0 g/l, al no haber presencia de sedimentos los calados han de ser los mismos en ambos casos, por lo tanto, los puntos están sobre la recta $H_{limpia} = H_{sucia}$. Se puede observar que se cumple para todos los calados.
2. Se observa una ligera influencia del sedimento para todas las concentraciones, pero los órdenes de magnitud de ésta son muy pequeños comparados con los valores de calado.

4.2.3 Análisis de las gráficas del modelo analítico

Como ya se ha comentado, el modelo analítico tal y como se ha implementado para nuestros intereses da como resultado el calado y la velocidad del flujo del que se desean conocer sus características, pero

para obtener estos resultados hace cálculos intermedios que pueden ser útiles en otros estudios. Del mismo modo, se puede completar con nuevas instrucciones para obtener otro tipo de resultados.

Para poder hacer una valoración visual, se ha optado por graficar los resultados de la velocidad y del calado para las tres ecuaciones de desagüe utilizadas aplicadas a cada uno de los dos modelos explicados y comparándose ambas situaciones: flujo con carga de sedimento y sin carga. Al realizar esta comparativa lo que se pretende es valorar qué sucede cuando el flujo transporta sedimento y cuando no. En el anexo 3 se pueden consultar con detalle todas las gráficas mencionadas.

En este apartado se realiza una explicación de los resultados de forma genérica ya que se cumple para las distintas ecuaciones.

4.2.4 Ecuaciones características de Cal Rodó

En este punto se van a analizar las gráficas de las ecuaciones características del aforador: la relación potencial y la polinómica, los resultados de las cuales son prácticamente idénticos tal y como se ha comentado en párrafos anteriores.

En la figura 62 se observa la relación que se establece entre el calado de agua limpia y el calado de agua sucia para la ecuación potencial, donde se puede apreciar como la altura de la lámina de agua sin sedimento es sensiblemente superior a la lámina del agua cargada con sedimento, o dicho de otra forma, la velocidad con sedimento en suspensión es mayor que la del agua limpia. Esta afirmación confirma lo que se ha experimentado en el canal así como lo que se había leído en la bibliografía y posteriormente descrito en la introducción.

Se puede apreciar como para calados pequeños la diferencia entre ambas alturas de lámina de agua es reducida y como para valores mayores la diferencia que se observa es mayor. Esta afirmación es normal ya que para calados pequeños, la influencia del sedimento es reducida, en cambio, para calados de mayor potencia el efecto que se ha de observar ha de ser mucho mayor. La influencia del sedimento en el agua es entre un orden de magnitud o dos inferior al calado.

Otro aspecto que influye en la relación entre los calados es la concentración: a menor concentración, más igualdad entre los calados y más cercanos a la recta $Y_{sucia}=Y_{limpia}$, y a mayor concentración, la influencia del sedimento es mayor y eso hace que la relación entre los calados sea más desigual.

En el caso de la gráfica de la ecuación potencial, para concentraciones hasta 50 g/l no se observa una gran influencia del sedimento hasta valores de calado de agua limpia del orden de 1.5 metros. En cambio, para una concentración mayor como por ejemplo 125 g/l, se observa como la influencia del sedimento juega un papel importante a partir de poco menos de un metro.

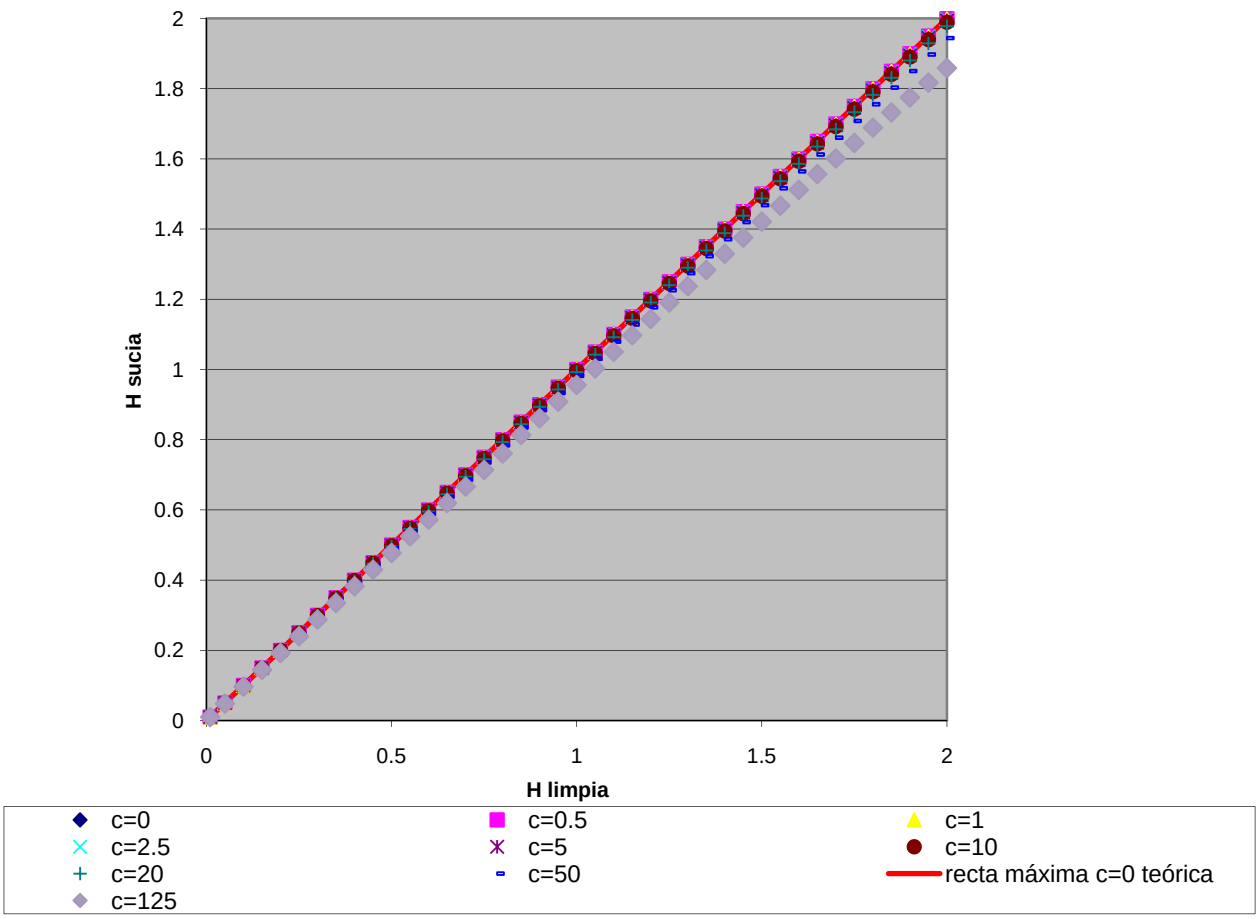


Figura 62. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia por unidad de ancho.

4.2.5 Ecuación de Chézy

Tal y como se ha realizado con las ecuaciones polinómica y potencial características del aforador, con la ecuación de Chézy también se han representado los resultados obtenidos con el modelo analítico, es decir, el calado y la velocidad que se pueden ver con detalle en el anexo 3.

Se ha optado por diferenciar entre las ecuaciones características y la de Chézy al realizar la discusión de las gráficas obtenidas por dos motivos:

1. Se ha considerado que de cara a la discusión de los datos es mejor dividir entre ecuaciones propias del aforador y ecuaciones más genéricas.
2. Chézy, tal y como se ha explicado en el apartado 3.3.5, en función de los valores de la Constante C' da unos resultados u otros.

Tras realizar un análisis detallado de la ecuación de Chézy implementada en el modelo, se ha llegado a la conclusión de que los resultados del modelo dependen de los distintos valores que adopte la constante de Chézy, la cual se define como:

$$v = C\sqrt{y \cdot i} \Longrightarrow v = C'\sqrt{y} \text{ siendo } C' = C \cdot \sqrt{i} \quad (22)$$

En el presente estudio se ha optado por la definición de la constante C de Manning: $C = \frac{1}{n} \cdot y^{1/6}$. (51)

Por lo tanto, resulta que C' se define como C' = $\frac{1}{n} \cdot y^{1/6} \cdot \sqrt{i}$ (52)

Donde,

n el el coeficiente de fricción de Manning

y el calado

i la pendiente del río que se estudie.

Se observa como la constante C' puede representar un valor pequeño si la pendiente es pequeña y Manning es grande, o un valor muy grande en el caso de que el valor de Manning sea muy pequeño.

Según el valor de la constante de Chézy (se recuerda que es la de la ecuación 52 que incluye la pendiente) se pueden dar tres casos distintos:

1. Para valores de la constante menores a 9.8, los resultados que da el modelo son los mismos que se han obtenido para las ecuaciones polinómica y potencial, es decir, la velocidad del agua cargada con sedimento es mayor que la velocidad de ésta sin carga.
2. Para las situaciones en las que la constante C' es mayor a 9.8 se obtiene lo contrario al punto anterior: la velocidad del agua cargada con sedimento es menor que la velocidad del agua limpia.
3. Para los casos en los que C'=9.8, resulta que los valores de velocidad del flujo cargado y sin carga de sedimento es el mismo.

En las figuras 63, 64 y 65 se pueden observar las situaciones descritas en los tres puntos anteriores.

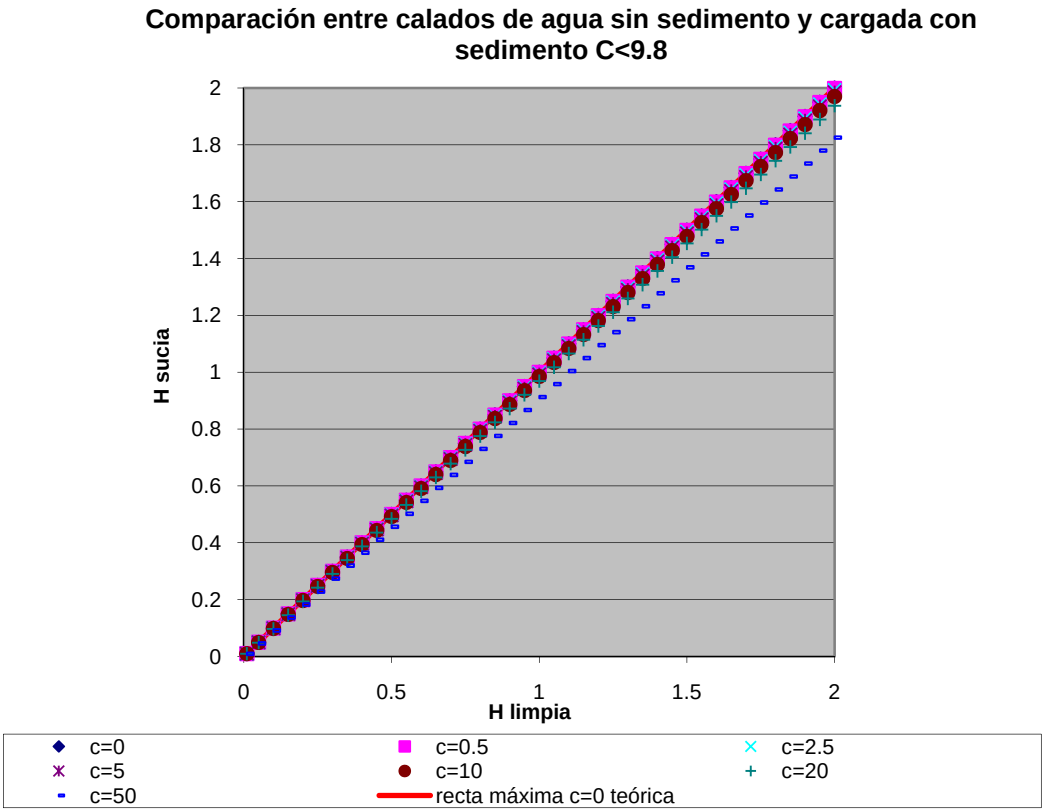


Figura 63. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C < 9.8

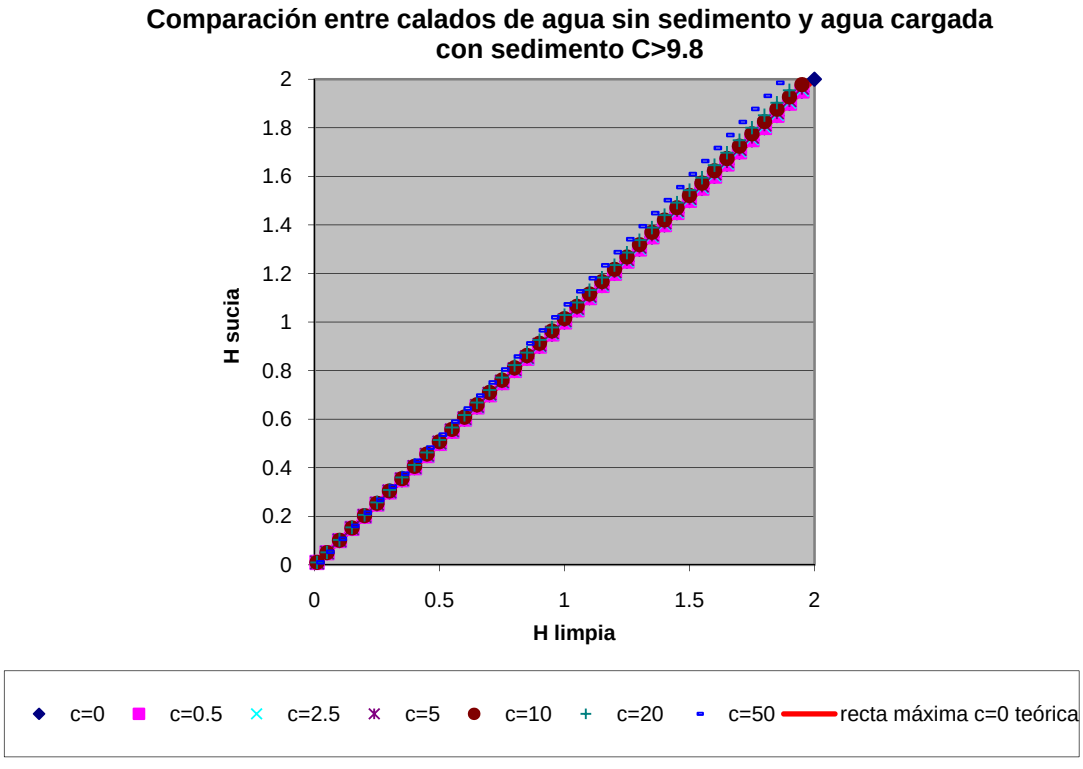


Figura 64. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C > 9.8

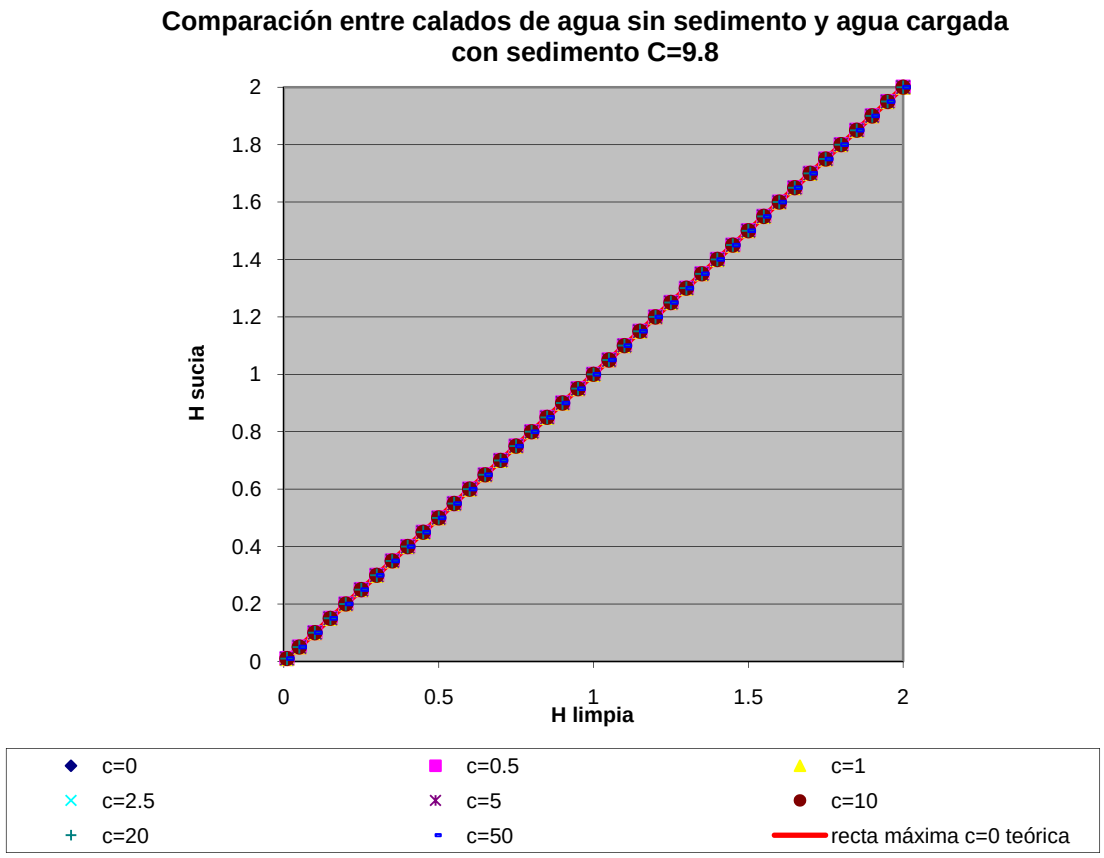


Figura 65. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C = 9.8

Se ha de tener en cuenta que según los datos obtenidos en los ensayos del laboratorio y tal como se había leído en la bibliografía, la gráfica correcta es la primera en la que la C' es menor a 9.8 ya que el calado es menor en la situación con sedimento que no con el agua limpia, o lo que es lo mismo, la velocidad del flujo cargado de material en suspensión es mayor a éste en condiciones sin carga. Por lo tanto, en los casos en que C' sea mayor e igual a 9.8, el modelo no cumple con lo observado en el laboratorio ya que cuando C'>9.8 resulta que se obtiene que el $H_{sucia} > H_{limpia}$ y cuando C'= 9.8 se obtiene para todas las concentraciones que $H_{sucia} = H_{limpia}$. Por consiguiente el modelo con la ecuación de Chézy sólo es válido si C' es menor a 9.8 en el resto de casos no se puede aplicar.

4.2.6 Verificación con los datos del laboratorio

En este apartado se comparan los resultados que se obtuvieron en el ensayo realizado en el canal de la UB con los que predice el modelo para las mismas condiciones.

En el ensayo del laboratorio, tal y como se ha indicado en los capítulos anteriores, se realizó un muestreo cada treinta segundos de la concentración de material en suspensión a partir de tomar muestras con cuarenta botellas normalizadas con el fin de determinar la concentración media del flujo. Tras analizar las muestras contenidas en las botellas, se obtuvo que la concentración media durante los 20 minutos del ensayo fue de 14.06 g/l. En el anexo 2 se pueden ver las distintas concentraciones de cada muestra.

Imponiendo en el modelo como inputs la concentración, el calado y el caudal con el que se realizó el ensayo, se obtiene la predicción que realiza el modelo la cual se puede ver en la tabla 32, en la que también se pueden ver los datos que se obtuvieron en el laboratorio permitiendo así su comparación.

Datos laboratorio agua sin carga de sedimento		Datos laboratorio agua cargada con sedimento		Predicción modelo analítico	
Velocidad media (m/s)	Calado (m)	Velocidad media (m/s)	Calado (m)	Velocidad media (m/s)	Calado (m)
0.340	0.093	0.370	0.090	0.35	0.092

Tabla 32. Comparativa de velocidades y calados con agua sin sedimento y agua con sedimento en el caso del laboratorio y la predicción del modelo.

Viendo los resultados de los ensayos con sedimento y la predicción del modelo, se puede afirmar que para estos calados tan reducidos el modelo infravalora la velocidad en un 5% y sobreestima el calado en un 2%. Como ya se ha comentado, el modelo para calados pequeños no es tan preciso como para calados mayores ya que la ecuación de ajuste presenta poca precisión en este rango de valores.

Debido al escaso número de datos experimentales de los que se dispone, ya que únicamente se dispone del indicado en la tabla 24, no se puede realizar una afirmación completa sobre la predicción del modelo. Se considera muy interesante la posibilidad de estudiar la influencia del sedimento para calados mayores con el fin de poder ver qué influencia tiene y también para poder evaluar el modelo.

4.2.7 Verificación del modelo con la bibliografía

Del mismo modo que se ha hecho en el apartado anterior comparando los resultados del modelo con los obtenidos en el laboratorio, en este apartado se realiza la comparación entre los resultados del modelo con los datos obtenidos por otros investigadores y que se han extraído de la bibliografía. Concretamente, se compara con los valores que se detallan en el artículo [7] de la bibliografía.

En la tabla 33 se pueden apreciar los valores que se citan en el artículo así como los resultados obtenidos a partir del modelo analítico.

Q limpia	S	y limpia bibliografía	H sucia bibliografía	Solución H1 modelo	v sucia bibliografía	velocidad H1 modelo	Error relativo calado	Error relativo velocidad
(m3/s)		(m)	(m)	(m)	(m/s)	(m/s)	%	%
0.01	0.05	0.0401	0.0398	0.039	1.180	1.288	2.960	9.166
0.02	0.05	0.0602	0.0586	0.058	1.690	1.716	1.056	1.545
0.04	0.05	0.0938	0.0845	0.090	2.350	2.203	6.915	6.265
0.01	0.1	0.0319	0.0308	0.031	1.420	1.619	0.246	14.034
0.02	0.1	0.0504	0.0479	0.049	1.980	2.050	1.341	3.526
0.03	0.1	0.0644	0.0603	0.062	2.410	2.406	2.863	0.154
0.01	0.15	0.0283	0.0272	0.027	1.600	1.825	0.209	14.079
0.015	0.15	0.0363	0.0344	0.035	1.900	2.135	1.634	12.343
0.03	0.15	0.0583	0.0538	0.056	2.650	2.658	4.370	0.304
0.01	0.2	0.0258	0.0244	0.025	1.770	2.002	1.840	13.115
0.02	0.2	0.0424	0.0378	0.041	2.390	2.437	8.035	1.948
0.04	0.2	0.0629	0.0590	0.061	3.360	3.285	2.681	2.235

Tabla 33. Resultados del ensayo descrito en el artículo y los predichos por el modelo. Error relativo entre ambos.

Se observa como los resultados que obtuvo el investigador Rickermann y los determinados por el modelo son muy parecidos, con un error relativo máximo del 8% en el calado y del 14% en la velocidad. Pueden parecer a priori errores importantes ya que llegan a alcanzar cifras de hasta el 14% pero se considera importante recordar que el modelo estudiado es una primera aproximación al cálculo de la influencia del sedimento, en el cual se hacen hipótesis que en algunos casos son excesivamente simplificadoras de la realidad. Del mismo modo, se observa que tanto los datos del artículo como los predichos por el modelo cumplen la afirmación realizada tras analizar los datos del canal en la que se afirmaba que el sedimento en suspensión aumenta la velocidad del flujo y disminuye el calado de éste.

En conclusión, se puede afirmar que el modelo analítico implementado es una buena aproximación de los fenómenos de la realidad tal y como se ha podido comprobar al evaluarlo con los datos del laboratorio y con los datos de la bibliografía, y que por lo tanto, no requiere de ninguna calibración previa.

Aunque no necesita de calibración previa, se podría pensar en una para reducir los errores relativos pero resulta que éstos no son iguales en todos los casos: en algún caso el error es del 0.2% y en otros llega hasta el 14%; por lo que se considera, que se podría hacer una calibración particularizada en función de las características del estudio que se desee realizar. Es decir, si el estudio que se desea desarrollar es con un caudal del 0.02 m^3/s y con una pendiente del 0.2%, entonces la calibración que se tendría que realizar sería de un 8% en el caso del calado y de un 1.95% en el caso de la velocidad.

Capítulo 5

CONCLUSIÓN

La elaboración del presente texto se ha realizado para dar respuesta a la pregunta que se formuló en la introducción y que es el objetivo final del documento: ¿qué influencia tiene la presencia de sedimento en suspensión en un flujo de agua clara?

Para alcanzar a darle solución con las máximas garantías posibles se optó por seguir tres líneas de trabajo (caso real de Vallcebre, la experimentación en el canal de laboratorio y la implementación del modelo analítico) las cuales inicialmente serían independientes entre ellas, pero llegados a un punto se cruzarían con el fin de comparar los resultados y a partir de ellos poder dar una respuesta sólida. Por este motivo, la tesina se ha estructurado en una serie de capítulos que a su vez, se han estructurado en tres bloques principales que coinciden con las tres líneas de trabajo citadas para las cuales al inicio del documento se plantearon unos objetivos particulares que se han procurado alcanzar a lo largo de los distintos capítulos con la finalidad de facilitar la respuesta a la pregunta original.

Los objetivos que se plantearon para en caso real de Vallcebre eran principalmente dos: entender mejor el comportamiento hidráulico del aforador, así como la instrumentación instalada en él; y también dar respuestas a aquellas incógnitas que pudieran surgir al tratar los datos.

Llegados a este punto se puede afirmar que ambos objetivos se han alcanzado satisfactoriamente ya que en el caso del primero, se entiende mejor el comportamiento hidráulico tras analizar y comparar los datos del modelo físico como los tomados *in situ* en el propio aforador, y además, a partir de éstos se determinaron dos ecuaciones de desagüe asociadas a la instalación: una polinómica y una potencial. Aún conocedores de que la ecuación potencial es más correcta ya que cumple con los puntos y con la región que contiene a éstos, aspecto que no siempre se cumple en las polinómicas, se optó por hallar las dos relaciones de desagüe y compararlas para ver qué diferencias existían entre ellas y ver cómo realizaba la aproximación la polinómica. Los resultados fueron muy buenos en ambas situaciones presentando únicamente una diferencia entre ellas del 0.26%, lo que significa que la aproximación que realizan ambas relaciones es prácticamente idéntica y descarta la duda inicial sobre la ecuación polinómica. Por lo tanto, en el caso particular de la ecuación de desagüe de Vallcebre, ambas relaciones son igual de correctas aunque se opta por realizar la caracterización con la potencial ya que teóricamente es la “más correcta”.

Respecto a la instrumentación que hay instalada en el aforador se puede afirmar que es suficiente para caracterizar la hidráulica del flujo que circula por el aforador pero se considera que la ubicación de algunos de los instrumentos no es la más correcta como por ejemplo sucede en el caso del sistema de captación de sedimentos ISCO que está dotado de dos bocas de succión colocadas a la misma altura. Se piensa que se aprovecharían mejor las posibilidades del sistema si las dos bocas de succión se colocasen a dos alturas diferentes pudiendo mejorar la caracterización del flujo realizando un perfil de concentraciones.

Una situación similar sucede en el caso de los ultrasonidos y los turbidímetros: los tres sistemas están ubicados justo después del salto de agua que genera el propio aforador y además están colocados en una zona de poca renovación del agua, por lo que si el caudal es pequeño suceden dos fenómenos: por un lado que al estar colocados después del salto de agua hay más turbulencia y por otro lado, como la renovación del agua es escasa resulta que el material fino se queda más tiempo en suspensión falseando

de este modo las medidas de los instrumentos. Se considera que los instrumentos tendrían que estar situados antes del salto de agua del aforador, y concretamente un buen sitio para su colocación sería a la altura del sistema ISCO.

Del mismo modo que se marcaron unos objetivos para la línea de trabajo de Vallcebre, en el caso del estudio experimental en el canal de la UB también se establecieron unos objetivos, que a diferencia del caso anterior, no se llegaron a cumplir en su totalidad y que fueron concretamente dos: realizar una exhaustiva caracterización del canal detallando sus propiedades físicas así como su funcionamiento y sus limitaciones; y realizar un ensayo con agua cargada de sedimento con distintas concentraciones y posteriormente comparar los resultados con los obtenidos en la situación del agua sin carga de sedimento. El primer objetivo se ha cumplido sin problemas tal y como se puede observar en el apartado 2.4 en el que se concluye que el canal actual tal y como está conectado no permite realizar los ensayos que interesan en este campo de la investigación principalmente porque para poder llevar a cabo su realización es necesario un cierto calado y caudal mínimos, así como un tiempo de duración mínimo del ensayo. Es en esta última condición en la que el canal no cumple, ya que si se trabaja con los caudales máximos para poder tener un cierto calado, la duración del ensayo no supera los 11 minutos, lo que representa un grave problema ya que para ensayar con sedimento en suspensión es necesario que el conjunto alcance el régimen estacionario, luego se ha de introducir el sedimento y esperar a que éste se homogeneíce en todo el volumen de agua; y una vez conseguidas estas dos condiciones iniciales, se ha de empezar a realizar el ensayo tomando muestras, realizando medidas, etc. Por lo tanto, se demuestra que se requiere de mucho más tiempo del que permite la configuración actual del canal. Es por este motivo por el cual se han propuesto una serie de mejoras que consisten en modificar las conexiones entre depósitos con el fin de que se asemejen a un depósito único y en intercambiar las dos bombas que hay actualmente entre ellas, ya que la que impulsa el agua de los depósitos al canal es más potente que la que devuelve el agua del decantador a los depósitos y la diferencia de caudal entre ellas hace que los depósitos se vayan vaciando mientras el decantador se llena hasta llegar a un punto en que los depósitos no tienen agua o el decantador la vierte teniendo que paralizar el ensayo. Esta es la razón por la cual no se pudo alcanzar el segundo objetivo planteado de forma completa ya que no se pudieron hacer los ensayos para distintas concentraciones ya que el tiempo de duración era escaso. No obstante, a pesar de tener este problema, se optó por realizar un único ensayo con un caudal menor al máximo y ver qué influencias experimentaba el fluido por la presencia del sedimento y así al menos tener una primera idea.

Tras analizar el ensayo en el que se consiguió alcanzar una concentración de 14.06g/l que representaba el 56% de la concentración esperada, se pudieron extraer tres conclusiones:

1. La hipótesis de partida que se realizó en la introducción del presente documento en la que se afirmaba que se puede estudiar el transporte en suspensión independientemente del de fondo ya que este segundo en algunos casos no aparece, en nuestro caso no se cumple porque como ya se ha comentado, sólo el 56% de la concentración esperada estaba en suspensión, mientras que un total de 38.85kg de material reposaban en el fondo del canal formando un tapiz de formas de fondo asimétricas de altura media 3.5mm. La presencia del material depositado en el fondo hace pensar que para materiales tan finos, calados tan reducidos y concentraciones altas siempre se producirá transporte de fondo. Desarrollar esta afirmación hubiera sido positivo para el trabajo pero con las condiciones actuales del canal no era viable.

2. El flujo con una concentración de 14.06 g/l, un calado de 9.2 cm y un caudal de 0.012m^3/s se acelera por la presencia de sedimento en suspensión una media de un 6.4%[20] que representa un aumento en la velocidad de 0.023m/s. No se puede hacer una afirmación más global ya que no se dispone de más datos de laboratorio para corroborarlos.
3. Por otra lado, el calado se reduce en un 3.33% de media lo que significa una variación del orden de 2 o 3mm.

Para finalizar, únicamente falta ver las conclusiones que se pudieron obtener del estudio del modelo analítico que para su implementación se realizaron hipótesis importantes como puede ser el hecho de despreciar las fuerzas de fricción, las fuerzas viscosas, el considerar que se establece un régimen uniforme y permanente o que el transporte de fondo es nulo y el lecho fijo. La mayoría de estas hipótesis se cumpliría en un laboratorio con las condiciones controladas, pero en cambio, algunas de éstas es complicado que se cumplan en un río. Aún y así, se optó por seguir con el modelo ya que aún y realizando las hipótesis anteriores a la hora de calcular da resultados muy próximos a la realidad y además, sólo es un instrumento de primera aproximación.

Para evaluar el modelo se optó por seguir tres vías diferentes de trabajo:

- Se implementó el modelo con las dos ecuaciones de desagüe de Vallcebre y se estudió la reversibilidad del mismo aplicando de forma consecutiva los dos algoritmos del modelo, es decir, se partió de los datos de la situación de agua clara y tras aplicar dos veces el modelo, se determinaron unos resultados de agua clara los cuales se compararon con los introducidos inicialmente. Se comprobó que el error de aplicar de forma consecutiva el modelo era de poco más de un 5%, lo que representa un error muy reducido. Siguiendo por esta línea trabajo se calcularon las velocidades y los calados que prevé el modelo partiendo de agua clara para distintas concentraciones y se observó en los resultados que a mayor calado y a mayor concentración la influencia del sedimento es más grande. Tal y como sucedía en los ensayos de Rickenmann[(7)] y en los ensayos en el canal de la UB, el modelo prevé que para una concentración pequeña la velocidad se acelera y el calado disminuye.
- Se implementó el modelo con una ecuación genérica como puede ser la ecuación de Chézy. En este caso también se estudió la reversibilidad a partir de los dos algoritmos del modelo y resultó que el error era menor que en el caso de las ecuaciones de desagüe del aforador (sólo un 2.6% de error), lo que hace pensar que la calibración de la relación caudal–calado que se introduzca en el modelo cuanto menos precisa y aproximada es, más errores de cálculo presenta el modelo.
- Evaluación del modelo imponiendo los datos de los ensayos de Rickenmann [7] y de los propios. Se comprobó que los resultados que obtiene el modelo, aún y siendo éste un modelo simple, cumplen la misma física y son del mismo orden de magnitud que los ensayados. En la evaluación con los datos obtenidos en el laboratorio de la UB, el modelo infravalora la velocidad en un 5% y sobreestima el calado en un 2%. (Valores relativamente pequeños.) Mientras que en el caso de la evaluación con los datos de Rickenmann [7], los errores máximos son del orden de un 8% en el calado y un 14% en la velocidad. En este caso. (Los errores ya son más importantes.)

[20] Medida tomada por el molinete ya que el Starflow daba un aumento del 11.5% pero como ya se ha comentado a lo largo del trabajo, el molinete es el instrumento de referencia cuando se miden las velocidades.

Una de los objetivos que se formularon en relación al modelo fue el establecer las limitaciones y sensibilidades que éste presenta, que principalmente se pueden resumir en tres.

1. Cuando se trabaja con ecuaciones de desagüe que han sido determinadas teniendo en cuenta la geometría del aforador, en el modelo se ha de introducir el ancho propio de la estructura porque sino los resultados salen falseados ya que la relación caudal-calado no se verifica para cualquier ancho. Por ejemplo, en el caso de Vallcebre la sección del aforador está escalonada y tiene dos anchos distintos en función de la altura. Pues resulta que si no se tiene en cuenta esta discontinuidad se obtienen resultados erróneos.
2. Al trabajar con la ecuación de Chézy se ha de tener especial cuidado ya que según los valores de la constante C'[21], el modelo obtiene unos resultados u otros. Por ejemplo, si se trabaja por unidad de ancho de la sección y la C' es menor a 9.8 se obtienen los resultados correctos: la velocidad se acelera y el calado disminuye: en cambio, si se trabaja con valores de C' mayores a 9.8 resulta que se obtienen resultados incorrectos ya que la velocidad disminuye y el calado aumenta, por eso, en estos casos el modelo no se puede usar ya que según lo observado en los ensayos del laboratorio, la presencia de sedimento acelera el flujo y reduce el calado. Para el caso en que C' = 9.8 tampoco se puede implementar el modelo ya que obtiene para todas las concentraciones el mismo resultado: $H_{sucia} = H_{limpia}$.
3. Si se dispusieran de más datos experimentales, se podría realizar una calibración del modelo con el fin de obtener resultados lo más precisos posibles.

Aun habiendo podido realizar un ensayo en el canal de laboratorio y disponiendo de bibliografía especializada tratando el tema, el hecho de no poder realizar más ensayos como se planteó al principio del trabajo variando la concentración, ha hecho que este trabajo no haya cerrado un ciclo sino que ha dejado abierto las puertas para que otro investigador con más recursos pueda realizar los ensayos que en nuestro caso no se pudieron hacer por no disponer del canal en las condiciones adecuadas. (Sólo se ha hecho una pequeña aproximación de lo que se deseaba.)
A pesar de no alcanzar el objetivo completo, como se ha podido realizar un ensayo con sedimento en suspensión, se dispone de bibliografía que trata el tema y se ha implementado el modelo se puede dar una respuesta acotada[22] a la pregunta inicial: ¿qué influencia tiene la presencia de sedimento en suspensión en un flujo de agua clara?
Como se ha ido explicando a lo largo del trabajo, la influencia que tiene la presencia de sedimentos en suspensión en un flujo de agua clara es que para caudales pequeños de hasta 0.013 m^3/s y con concentraciones de 14.06 g/l en el caso del ensayo en el canal, el calado disminuye en aproximadamente un 4% mientras que la velocidad se ve incrementada en aproximadamente un 7%.

Se desearía realizar una afirmación más genérica pero ésta la hará la persona que como ya se ha dicho en algunas ocasiones, tomará este documento como texto de partida y hará los ensayos pertinentes una vez realizadas las obras de mejora propuestas en el canal de la Facultad de Geología de la UB.

[21] Se recuerda al lector que C' está definida como $C' = \frac{1}{n} \cdot y^{1/6} \cdot \sqrt{i}$ (ecuación 52).

[22] Se habla de respuesta acotada ya que no es genérica sino que sólo es para unos rangos de valores muy concretos.

Capítulo 6

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Martín Vide, J.P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC

[2] Lage Ferreira, R.M. (2005). *River Morphodymanics and Sediment Transport. Conceptual Model and Solutions.* Ph.D. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.

[3] García, M. H. (2006) *Sediment Transport*. Lecture Notes, Ven Te Chow Hydrosystems lab., University of Illinois at Urbana-Champaign

[4] Chien, N. y Wan, Z. (1999). *Mechanics of sediment transport*. ASCE Press.

[5] Wan, Z. y Wang, Z. (1994) *Hyperconcentrated Flow.* A.A. Balkema, Rotterdam. Monograph, IAHR.

[6] Hessel, R. (2002) *Modelling soil erosion in a small catchment on the Chinese Loess Plateau. Applying LISEM to extreme condicions*. Faculty of Geographical Sciences, Utretcht University, Nederlandse Geografische Studies 307, Tesis doctoral.

[7] Rickermann, D. (1991). *Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes.* Journal of Hydraulic ngineering, ASCE, Novembre 1991. Vol. 117, pág. 1419 – 1439.

[8] Martín Vide, J.P. y Helmbrecht, J. (2003. *Cálculo hidráulico del barranco de La Galera en condiciones torrenciales, a partir de datos de la avenida de octubre de 2000*. (2003) UPC

[9] Martín Vide, J.P. (2003) *Criterios de cálculo hidráulico de las rieras de Las Arenas y Rubí, en condiciones torrenciales*. UPC, Departamento de Ing. Hidráulica, Barcelona febrero 2003.

[10] Clotet, N., Gallart, F., (1986). *Sediment yield in a mountanous basin under high Mediterranean climate.* Zeits*.* Für Geomorphologie Supp. Bd. 60, 205-216.

[11] Balash, J.C., Castellfort, F.X., Llorens, P., Gallart F., (1992). *Hydrological and sediment dynamics network design in a Mediterranea mountainous area subject to gully erosion.* In: Bogen, J., Walling, D.E., Day, T. (Eds), *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*, IAHS Publication 210. IAHS, Wallingford, UK, pp. 433-442.

[12] Gallart, F., Llorens, P., Latron, J., Regüés, D., (2002). *Hydrological processes and their seasonal controls in a small Mediterranean mountain catchment in the Pyrenees.* Hydrol. Earth Syst. Sci. 6 (3), 527–537.

[13] Regüés, D., Pardini, G., Gallart, F., (1995). *Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock in a gullied area, as dependent on seasonal weather conditions*. Catena 25, 199–212.

[14] Feist, M., Colombo, F., (1983). *La limite Crétacé´-Tertiaire dans le NE de l'Espagne du point de vue des charophytes.* Colloque sur le Sénonien. Géol. Méditerr. Vol. X (3–4), pp. 303–326.

[15] Gallart, F., Sole´, A., Puigdefábregas, J., Lázaro, R., (2001). *Badland systems in the Mediterranean.* In: Bull, N.L., Kirkby, M.J. (Eds), *Dryland Rivers: Processes and Management in Mediterranean Climates.* Wiley, Chichester, pp. 299–326.

[16] Crosaz, Y., Dinger, F., (1999). *Mesure de l'érosion sur ravines élémentaires et essais de végétalisation. Bassin versant expérimental de Draix.* In: Mathys, N. (Ed.), *Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne*. Cemagref, Antony, pp. 103–118.

[17] Regüés, D., Guàrdia, R., Gallart, F., (2000). *Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area*. Catena 40 (2), 173–187.

[18] Rubio, C., (2003). *Estudi i modelització de les característiques hidrodinàmiques de perfils representatius d'una conca de recerca (Vallcebre, alt Llobregat), Memòria de Recerca*. Universitat Autònoma de Barcelona, Spain, p. 82.

[19] Haro, S., Fernández, J.F., Josa, R., Gallart, F., (1992). *Papel hidrológico y geomorfológico de las propiedades del suelo en una zona pirenaica de campos abandonados (Cal Parisa, Vallcebre)*. In: López-Bermúdez, F, Conesa, C., Romero, M.A. (Eds), Estudios de Geomorfología en España, Vol. 1. SEG, Murcia, pp. 243–250.

[20] Clotet, N., Gallart, F., Balasch, J., (1988). *Medium term erosion rates in a small scarcely vegetated catchment in the Pyrenees*. Catena Suppl. 13, 37–47.

[21] Calvo, A., Sirvent, J.M., Palau, E., Romero, M., (1988). *Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción.* In: Sala, M., Gallart, F. (Eds), M*étodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos*, Monografía no 1. S.E.G., Logroño, pp. 6–19.

[22] Castelltort, F.X., (1995). *Erosió, transport i sedimentació fluvial com a integració dels procesos geomorfològics d'una conca (conca de Cal Rodó, Alt Llobregat).* Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, Spain.

[23] Castelltort, F.X., Balasch, J.C., (1993). *Diseño de una red de monitorización de procesos de erosión y transporte de sedimentos.* In: Ortiz, R. (Ed.), *Problemática Geoambiental y desarrollo*. Actas V Reun. Nal. Geol. Amb. y Ord. del Territorio, Tomo II, pp. 65–672.

[24] Llorens, P., (1991). *Resposta hidrològica i dinàmica de sediments en una petita conca pertorbada de muntanya mediterrània*. Ph.D. Thesis, Universitat de Barcelona, Spain.

[25] Llorens, P., Gallart, F., (1992). *Small basin response in a Mediterranean mountainous abandoned farming area: research design and preliminary results*. Catena 19, 309–320.

[26] UNIDATA (2004). *How Starflow measures velocity*. In: *UNIDATA's Starflow Manual.*

[27] Tracy B. Vermeyer, P.E. (2004). *A Laboratory Evaluation of Unidata's Starflow Doppler Flowmeter and MGD Tecnologies Acoustic Doppler Flowmeter.* Water Resources Research Laboratory. Denver, Colorado.

[28] Gracía Nájera, J. M. (1962) *Principios de hidráulica torrencial.* Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias.

[29] Smart y Jaeggi (1983) *Sediment Transporto n Steep Slopes,* Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich, Suiza

[30] López Alonso, R. (?) *Fórmulas para el cálculo aproximado de la capacidad de transporte de sedimentos en ríos de montaña.* Revista Cimbra, Artículos de opinión.

[31] P.Y. Julien, D.B. Simons, (1985), *Sediment Transport Capacity of Overland Flow*. Transaction of the ASAE. Vol. 28, Nº3, pp-755-765.

Capítulo 7

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Situación real de las cuencas de Vallcebre. _____ *14*
Ilustración 2. Detalle de la situación de Vallcebre. Desde una visión más genérica hasta la ubicación exacta de las tres cuencas estudiadas pasando por su localización dentro de la cuenca de la Baells. ___ *15*
Ilustración 3. Mapa geológico de la cuenca de Vallcebre _____ *16*
Ilustración 4. Mapa topográfico con detalles de los puntos de toma de datos de la cuenca de Vallcebre. *17*
Ilustración 5. Estación de aforo Cal Vila con una sección de control triangular. _____ *18*
Ilustración 6. Estación de aforo Cal l'Isard con una sección de control rectangular. _____ *19*
Ilustración 7. Estación de aforo Cal Rodó con una sección de control rectangular y escalonada. _____ *19*
Ilustración 8. Detalle de la ubicación de los badlands y áreas erosionadas. _____ *19*
Ilustración 9. Detalle de la instrumentación y de su posición _____ *22*
Ilustración 10. Detalle modelo físico visto aguas arriba _____ *29*
Ilustración 11. Detalle del aforador de Cal Rodó aguas arriba _____ *29*
Ilustración 12. Detalle del punto de referencia A _____ *54*
Ilustración 13. Detalle medición altura en L=7m _____ *55*
Ilustración 14. Detalle del brazo mecánico que acciona gracias al pistón neumático las compuertas del canal. _____ *56*
Ilustración 15. Detalle del avance del resalto móvil reflejado aguas arriba _____ *59*
Ilustración 16. Equilibrio de frentes en el extremo aguas arriba del canal. _____ *60*
Ilustración 17. Equilibrio de los frentes de onda en un punto intermedio del canal. _____ *60*
Ilustración 18. Detalle de los depósitos con distintas alturas de agua poniendo de manifiesto la falta de conectividad. _____ *63*
Ilustración 19. Agua de color blanco debido a la carga de sedimento en suspensión _____ *79*
Ilustración 20. Detalle de los tramos 1 y 2 en los que se divide el canal en función de las formas de fondo _____ *83*
Ilustración 21. Detalle de los tramos 2, 3 y 4 en los que se divide el canal en función de las formas de fondo y de las formas de fondo próximas al Starflow. _____ *83*
Ilustración 22. Detalle de los rizos formados en el lecho del canal _____ *84*
Ilustración 23. Detalle de las formas de fondo entre el starflow y el molinete _____ *84*

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Perfil transversal del aforador visto desde aguas arriba _____ *20*
Figura 2. Planta del aforador de Cal Rodó _____ *21*
Figura 3. Planta del aforador con la ubicación de toda la instrumentación _____ *22*
Figura 4. Detalle del conjunto de botellas _____ *24*
Figura 5. Detalle del rango de medición del Starflow _____ *27*
Figura 6. Representación de la velocidad respecto del calado. En negro y gris los datos obtenidos del caso real: Vallcebre; en rojo los datos del ensayo de laboratorio con riberas; en azul el ensayo de laboratorio sin riberas. _____ *30*
Figura 7. Datos experimentales obtenidos en los ensayos con el modelo físico. En rojo los datos para el modelo con ribera; en azul los datos del modelo sin ribera; en rosa los datos in situ tomados con molinete. _____ *30*
Figura 8. Posible problema de las ecuaciones polinómicas frente a las potenciales. _____ *31*
Figura 9. Relación caudal-calado para el caso 1. _____ *32*
Figura 10. Relación caudal-calado para el caso 2. _____ *32*
Figura 11. Detalle de la diferencia entre la aproximación del caso 2 y los datos in situ del molinete para los primeros 10 cm de calado. _____ *33*
Figura 12. Relación caudal-calado para el caso 3. _____ *33*
Figura 13. Esquema del modelo analítico _____ *37*
Figura 14. Planta de la situación actual del canal de la Facultad de Geología _____ *46*
Figura 15. Perfil longitudinal del lado derecho del canal cuando éste tiene una cierta pendiente. _____ *46*
Figura 16. Depósitos del canal numerados y con sus respectivas conexiones actuales. _____ *47*
Figura 17. Detalle de la composición del decantador. Medidas en mm. _____ *48*
Figura 18. Detalle de la pantalla principal _____ *48*
Figura 19. Detalle de las distintas acciones que se pueden hacer sobre el canal. _____ *48*
Figura 20. Detalle de la pantalla de control sobre el caudal _____ *49*
Figura 21. Detalle de la pantalla de control sobre la inclinación del canal _____ *49*
Figura 22. Detalle de la pantalla de control sobre las compuertas. _____ *49*
Figura 23. Ábaco de relación entre el caudal que indica el panel de control y el real _____ *52*
Figura 24. Ábaco de relación entre medida indicada en el panel y la pendiente real _____ *53*
Figura 25. Planta del canal de la UB donde se indican los puntos de toma de medidas así como el punto de referencia A. _____ *53*
Figura 26. Perfil longitudinal del canal con detalle de los pistones neumáticos y de los puntos de medida de la altura. _____ *55*
Figura 27. Perfil longitudinal del canal según la altura indicada en la consola _____ *55*

Figura 28. Detalle de la compuerta aguas abajo. _____ *56*
Figura 29. Detalle de la compuerta aguas arriba. _____ *56*
Figura 30. Ábaco de la compuerta superior que relaciona el ángulo indicado en el panel frente a los ángulos reales del brazo mecánico y la compuerta. _____ *57*
Figura 31. Ábaco de la compuerta superior que relaciona el ángulo indicado en el panel frente a los ángulos reales del brazo mecánico y la compuerta. _____ *57*
Figura 32. Detalle de las curvas de remanso aguas abajo del canal en función de la altura de la compuerta inferior _____ *58*
*Figura 33. Calado en función de la pendiente del canal para los distintos caudales de estudio*_____ *59*
Figura 34. Esquema de las propuestas de mejora de la conectividad entre depósitos. _____ *63*
Figura 35. Región de compatibilidad de condiciones. _____ *68*
*Figura 36. Región en la que se realizarán los ensayos*_____ *69*
*Figura 37. Curva de remanso obtenida para el caudal de 0.012 m^3/s en la situación de agua sin sedimento y también se indican las mediciones de calado realizadas en las transparencias*_____ *72*
*Figura 38. Relación entre la velocidad de caída w (cm/s) y el tamaño de las partículas (mm)*_____ *75*
*Figura 39. Distribución granulométrica de la harina de sílice Q-12*_____ *77*
*Figura 40. Posición de los instrumentos en el canal de la UB. Unidades en metros.*_____ *78*
*Figura 41. Recta de calibración para la sonda de presión utilizada en el ensayo.*_____ *78*
Figura 42. Velocidades en el canal captadas con el Starflow y el molinete con la hélice a 5cm del fondo.81
Figura 43. Velocidades en el canal captadas con el Starflow y el molinete con la hélice a 3.65cm del fondo. _____ *82*
Figura 44. Curva de remanso programa HEC-RAS para situación con sedimento (n=0.012) _____ *86*
Figura 45. Caracterización del evento del 31/10/2008 al 04/11/2008 _____ *89*
*Figura 46. Relación entre velocidad y calado de todos los sucesos registrados en Cal Rodó.*_____ *90*
Figura 47. Relación entre velocidad y calado a partir de los datos experimentales obtenidos con el modelo físico. _____ *90*
Figura 48. Planta del aforador y del tramo del río aguas arriba donde se representan las alturas de las láminas de agua y los perfiles de velocidad para distintos caudales. _____ *91*
Figura 49. Límites de los instrumentos del aforador ejemplificados para la crecida del 26/06/2009 ___ *92*
*Figura 50. Comparación entre los calados de agua limpia y agua sucia*_____ *94*
*Figura 51. Comparación entre los calados de agua limpia y agua sucia*_____ *94*
*Figura 52. Representación del haz emitido por el Starflow, el calado y en el instante de medida el punto donde se considera que hay la velocidad media y/2.*_____ *96*
Figura 53. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación polinómica _____ *98*
Figura 54 Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación potencial _____ *100*

Figura 55. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C < 9.8 _____ *102*
Figura 56. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C > 9.8 _____ *103*
Figura 57. Influencia del sedimento en suspensión en el calado prevista por el modelo con la ecuación de Chézy con C = 9.8 _____ *103*
Figura 58. Fases para comprobar la reversibilidad del modelo. _____ *104*
*Figura 59. Perfil longitudinal de la superficie libre del canal (curvas de remanso M2)*_____ *111*
*Figura 60. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia por unidad de ancho.*_____ *115*
Figura 61. Comparativa entre calados de agua limpia y considerando el ancho real. _____ *116*
*Figura 62. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia por unidad de ancho.*_____ *118*
*Figura 64. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C > 9.8*_____ *120*
*Figura 63. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C < 9.8*_____ *120*
*Figura 65. Comparativa entre calados de agua limpia y sucia para Chézy con C = 9.8*_____ *121*

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Legenda ICC mapa geológico. *16*
Tabla 2. Características de las bombas del canal *47*
Tabla 3. Resumen de las ecuaciones logarítmicas y su representación en función de los caudales de ensayo *51*
Tabla 4. Resumen de las velocidades máxima y media según la forma de medición en función de los caudales de ensayo. *51*
Tabla 5. Relación entre el caudal indicado en la pantalla del controlador y el caudal real del canal *52*
Tabla 6. Mediciones de las alturas en distintos puntos del perfil longitudinal en función de la altura indicada en la pantalla del controlador. *54*
Tabla 7. Valores de calado en función de la pendiente del canal. *61*
Tabla 8. Tiempo máximo de uso en función del caudal del canal. *61*
Tabla 9. Diámetros interior y exterior de los distintos tubos utilizados en la propuesta de mejora. *64*
Tabla 10. Resumen de los datos tomados el primer día de ensayo en el canal *69*
Tabla 11.Número de Froude canal UB *71*
Tabla 12. Valores de Reynolds y de Darcy para distintos caudales de ensayo. Régimen que predomina *74*
Tabla 13. Características del flujo en el canal en función del caudal de ensayo *76*
Tabla 14. Carcaterísticas del Solvin 258RD *76*
Tabla 15. Características harina de sílice Quarfin Q-12 ..... *77*
Tabla 16. Datos de calibración para la sonda de presión *78*
Tabla 17. Resumen de los datos más relevantes del ensayo con material en suspensión *80*
Tabla 18. Resumen de los datos corregidos más relevantes del ensayo con material en suspensión *81*
Tabla 19. Incrementos en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *97*
Tabla 20. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *97*
Tabla 21. Variaciones en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *99*
Tabla 22. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *99*
Tabla 23. Variaciones en la velocidad en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *101*
Tabla 24. Variación del calado en % debido a la presencia de sedimento en suspensión. *101*
Tabla 25. Error relativo máximo aplicando la reversibilidad en función de las ecuaciones de estudio. *105*
Tabla 26. Valor de los errores relativos máximos en función del calado y de la concentración para la ecuación potencial. *105*
Tabla 27. Comparativa de velocidad y calado en las distintas situaciones de estudio *109*
Tabla 28. Comparativa de calados en función del instrumento de medición y de la situación de estudio. *109*
Tabla 29. Coeficiente de manning en ambas situaciones de estudio. *111*
Tabla 30. Comparativa entre la ecuación polinómica y la potencial hasta 2 metros de calado. *113*
Tabla 31. Comparativa entre la ecuación polinómica y la potencial hasta 15 metros de calado. *114*

Tabla 32. Comparativa de velocidades y calados con agua sin sedimento y agua con sedimento en el caso del laboratorio y la predicción del modelo. 122
Tabla 33. Resultados del ensayo descrito en el artículo y los predichos por el modelo. Error relativo entre ambos. 122