

# TRABAJO FIN DE GRADO

## Modelización del arrastre del mobiliario urbano durante eventos extremos de inundaciones



**Diego Vázquez Ares**  
**Grado en Ciencias Ambientales**  
*Junio 2018*

**Tutores: Alejandro J. Cabrera Crespo y José M. Domínguez Alonso**  
**Departamento de Física Aplicada**

Facultade de Ciencias

Universidade de Vigo

Facultade de Ciencias

Universidade de Vigo

# Modelización del arrastre del mobiliario urbano durante eventos extremos de inundaciones

**Trabajo Fin de Grado de Ciencias Ambientales**  
**Facultad de Ciencias de Ourense**



Diego Vázquez Ares  
Grado en Ciencias Ambientales  
Junio 2018

*La figura de la portada es un instante de una simulación realizada por  
Orlando García Feal del grupo EPHYSLAB*

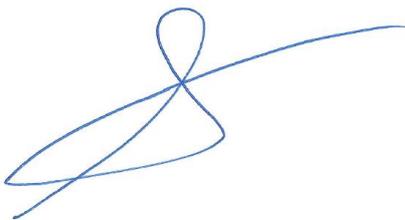


**Dr. Alejandro Jacobo Cabrera Crespo**, investigador del programa “Ramón y Cajal” del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y **Dr. José Manuel Domínguez Alonso**, investigador del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo

INFORMAN:

Que el trabajo titulado "**Modelización del arrastre del mobiliario urbano durante eventos extremos de inundaciones**" presentado por **D. Diego Vázquez Ares**, con **D.N.I.: 45956484T**, ha sido realizado bajo nuestra dirección en el departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y autorizamos su presentación como **Trabajo Fin de Grado del Grado de Ciencias Ambientales** al considerarlo apto para ser defendido.

Ourense, 5 de junio de 2018



Alejandro Jacobo Cabrera Crespo



José Manuel Domínguez Alonso



## **Agradecimientos**

*En primer lugar, quería agradecer a Alex, mi tutor de TFG, su confianza en mí para la realización de este trabajo, la gran ayuda a la hora de su realización y por los conocimientos que me transmitió. También quería agradecer a José, mi cotutor de TFG, la ayuda recibida, y al resto de compañeros del grupo EPHYSLAB.*

*En segundo lugar, y no menos importante, a mis amigos de siempre y familia por su apoyo todo este tiempo.*

*Muchas gracias a todos.*



# Índice

1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. INUNDACIONES DE ZONAS URBANAS .....	15
2.1. Cambio climático .....	17
2.2. Eventos recientes de inundaciones urbanas .....	20
2.3. Soluciones .....	23
3. MODELO NUMÉRICO DUALSPHYSICS .....	25
3.1. Modelado numérico .....	27
3.2. Método SPH .....	28
3.3. Código DualSPHysics .....	31
3.4. Condiciones iniciales y condiciones de contorno .....	33
3.5. Acoplamiento con la librería CHRONO .....	36
4. VALIDACIÓN .....	39
4.1. Caso de aplicación I: arrastre de cubos .....	41
4.2. Caso de aplicación II: arrastre de cajas .....	48
5. APLICACIÓN .....	55
6. CONCLUSIONES .....	63
BIBLIOGRAFÍA .....	67



# **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**



El presente trabajo de fin de grado de Ciencias Ambientales fue realizado en colaboración con el grupo de investigación EPHYSLAB (*Environmental Physics Laboratory*), de la Facultad de Ciencias de Ourense del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo.

El principal objetivo del trabajo es utilizar el modelado numérico, concretamente la herramienta DualSPHysics, para simular el arrastre de elementos del mobiliario urbano durante eventos extremos de inundaciones.

## **Motivación**

El aumento de eventos climáticos extremos como las inundaciones puede acarrear numerosos problemas en los entornos urbanos. Tanto el cambio climático como la dinámica computacional de fluidos son líneas de investigación de este grupo de trabajo, por ello surgió la idea de aplicar la herramienta DualSPHysics (desarrollada en el grupo EPHYSLAB) para simular el arrastre de elementos durante inundaciones urbanas, con el fin de llegar a prevenirlas o prepararse para ellas con antelación.

Los ensayos experimentales podrían ser una solución para estudiar este tipo de eventos, pero conllevan elevados costes económicos y requieren un tiempo importante, de ahí que se use también el modelado numérico (DualSPHysics). El modelado numérico permite avanzar más de prisa y reduciendo costes en multitud de investigaciones.

## **Objetivos**

El objetivo es demostrar la eficacia del modelo numérico DualSPHysics y su utilidad para estudiar inundaciones y el arrastre de elementos sólidos. Para ello, primero se valida el modelo reproduciendo experimentos de laboratorio y comparando los resultados numéricos con los experimentales. Después se aplica DualSPHysics a un caso real en donde la crecida de un río provoca la inundación y el arrastre de vehículos en un área urbana.

## Planificación de las tareas

Durante el período de colaboración en el grupo EPHYSLAB se aprendió a usar la herramienta DualSPHysics, para posteriormente validarla y aplicarla a casos realistas de inundaciones en ciudades.

### *Tarea 0. Aprendizaje y manejo de la herramienta:*

Inicialmente nos hemos centrado en el aprendizaje de la física relativa a la dinámica de fluidos implementada en el código DualSPHysics y, en el manejo de las diferentes herramientas de pre-procesado y post-procesado necesarias para crear los casos y analizar los resultados.

### *Tarea 1. Calibrado de los diferentes parámetros libres del modelo:*

Se ha prestado especial atención a la resolución del modelo (casos con diferente número de partículas), parámetros para definir los objetos y a la utilización de la librería CHRONO. Durante esta etapa se realizaron los distintos casos de validación.

### *Tarea 2. Aplicación del código en la ciudad de Lugo:*

Dentro de esta fase se aplicó el modelo DualSPHysics a un caso realista en la ciudad de Lugo. Se recreó el estacionamiento del Hotel-Balneario de la ciudad y la entrada de agua simulando una gran crecida del río Miño.

### *Tarea 3. Divulgación:*

- 3.1. Escritura de todo el trabajo desarrollado en estos meses.
- 3.2. Preparación de la exposición ante el tribunal.
- 3.3. Preparación de un artículo para la revista *Avances en Ciencias de la Tierra (ACT)*.

# Organización del documento

El trabajo se va a estructurar en varios capítulos:

- En primer lugar, se introduce el tema del trabajo, los objetivos y la motivación que ha llevado a su realización (Capítulo 1).
- En segundo lugar, se presenta la problemática del cambio climático y el calentamiento global, donde uno de sus efectos es el aumento de precipitaciones e inundaciones (que se documentan con noticias recientes) (Capítulo 2).
- A continuación, se explicarán las ventajas del modelado numérico, introduciendo el método de SPH y la herramienta DualSPHysics, así como la librería CHRONO (Capítulo 3).
- En el siguiente capítulo se valida el modelo con distintos experimentos para comprobar su eficacia. Para esto, se comparan datos experimentales con resultados obtenidos con DualSPHysics (Capítulo 4).
- El siguiente paso es la aplicación de DualSPHysics a un caso real de inundación en la ciudad de Lugo analizando los resultados numéricos y sus consecuencias (Capítulo 5).
- Y, por último, se exponen las conclusiones a las que se llegó con la realización de este trabajo (Capítulo 6).



## **Capítulo 2.**

# **INUNDACIONES DE ZONAS URBANAS**



## 2.1. Cambio climático

El estudio del clima terrestre es un campo de investigación complejo y en rápida evolución, debido en gran parte a la inmensa cantidad de factores que intervienen. Se llama cambio climático a la variación global del clima de la Tierra, el cual ha cambiado a lo largo del tiempo en una escala geológica de millones de años debido a factores naturales. Dichas variables naturales son tales como la deriva continental, la actividad solar, las variaciones en la órbita terrestre debidas a los ciclos de Milankovich y las erupciones volcánicas. Las variaciones climáticas de la Tierra se han agrandado en el siglo pasado de una forma brusca y rápida, sobre todo en las dos últimas décadas. En la actualidad hay cada vez más evidencias de que estamos sufriendo un gran cambio en las condiciones climáticas. Éstas no son únicamente propiciadas por la acción de la naturaleza, sino que las acciones antrópicas están acelerando este proceso de una forma casi irremediable, aun así, en los últimos años ha crecido la preocupación social por el cambio climático.

A continuación, se indican algunas de las consecuencias del cambio climático. La información ha sido extraída del quinto informe del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC: Bases Físicas, 2013):

### 1. Calentamiento global:

Las evidencias sobre un calentamiento global provienen de múltiples indicadores desde la parte alta de la atmósfera hasta el océano profundo. Se dice que *“El calentamiento en el sistema climático es inequívoco y, desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios”* (IPCC: Bases Físicas, 2013).

El aumento de las temperaturas superficiales medias globales, que aumentaron desde la década de 1900, es el indicador más conocido del cambio climático. Este calentamiento de las temperaturas terrestres se corresponde estrechamente con la tendencia al calentamiento observado en los océanos desde 1970. Al calentarse los océanos, el agua se expande aumentando consigo el nivel del mar. También contribuye a este aumento el derretimiento de los glaciares y capas de hielo. Las capas de nieve y hielo marino en el ártico se han visto reducidas desde 1950.

2. Cambios en la composición de la atmósfera:

El cambio climático también está afectando a la composición de los gases de la atmósfera: desde el 2005 se ha documentado un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero. Un dato importante es que el gas de efecto invernadero que más ha aumentado es el CO<sub>2</sub>, con una contribución del 80%.

3. Cambios en la tendencia de sequías:

Confirmándose el calentamiento global, el ciclo hidrológico se intensificaría. Debido a la mayor evaporación oceánica, el incremento de aportes de humedad hacia los continentes superaría el incremento de la evapotranspiración de los territorios continentales. Por lo tanto, la aridez de los continentes a escala global disminuiría. Aun así, los estudios muestran una gran variabilidad de unas décadas a otras de los períodos de sequía en extensas regiones del mundo.

4. Cambios en las nevadas:

En la mayoría de regiones estudiadas en el informe AR4 del IPCC es probable que esté disminuyendo el número de nevadas asociado a un aumento de las temperaturas en invierno.

5. Cambios en la nubosidad:

Desde 1987 a 2001 la nubosidad total sufrió una reducción del 4%, pero en el período de 2001 a 2004 aumentó un 2%, aunque se cree que este dato no es muy representativo.

6. Cambios en las precipitaciones:

Es probable que aumentasen las precipitaciones globalmente (al promediar latitudes medias del hemisferio norte). También es probable que se haya producido un descenso brusco en las precipitaciones en latitudes medias del hemisferio sur en la década del 2000 en consonancia con el aumento de la sequía. Sin embargo, la precipitación en las zonas terrestres tropicales ha aumentado en la última década.

## 7. Cambios en las tendencias de los extremos climáticos:

Los mayores cambios se observan en las mediciones de temperatura diaria, donde se incluyen las olas de calor. Se ha observado un importante aumento en la frecuencia de los ciclones tropicales. Las **precipitaciones extremas** también son cada vez mayores, existiendo una gran variabilidad espacial. Salvo en algunas regiones, las tendencias en las sequías son algo inciertas, como se comentó antes.

En la lista anterior aparecen los cambios más significativos que están ocurriendo sobre nuestro planeta, pero estos no son todos, ya que a partir de ellos pueden derivar muchos otros. Como se ha descrito con anterioridad, una de las causas del cambio climático y el consiguiente calentamiento global, son cambios en la frecuencia e intensidad de muchos eventos meteorológicos y climáticos extremos. Como se recoge en el estudio realizado por Schoof y Robenson (2016), el forzamiento radiactivo de los gases de efecto invernadero es la principal causa de los cambios en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos climáticos. Estos eventos tienen asociados impactos sociales y económicos sustanciales cada año. Según se afirma en el trabajo realizado por Hay et al. (2016), en el futuro, es muy probable que se produzca un aumento de la frecuencia e intensidad de estos eventos, sobre todo las olas de calor y las precipitaciones intensas. Entre las comunidades más vulnerables a estos eventos se encuentran las zonas de montaña y costa. Aunque en el caso de las precipitaciones intensas, son las poblaciones con mayor número de habitantes las que sufren los mayores daños, ya que causan grandes inundaciones en áreas con un gran número de infraestructuras. Con todo esto, cada vez la población se adapta más a estas situaciones reforzando los sistemas de refugio y protección.

## 2.2. Eventos recientes de inundaciones urbanas

Como se hacía referencia en el apartado anterior, el número de eventos extremos climáticos ha aumentado y, con una alta probabilidad, seguirá la misma tendencia en un futuro. Actualmente, existe una gran preocupación por los efectos del cambio climático, buscándose mitigar los daños y conseguir una mejor adaptación ante las nuevas condiciones climáticas.

El aumento de **inundaciones** es un evento meteorológico importante que suele estar asociado directamente con el aumento de precipitaciones extremas, aunque también se puede dar por otros motivos distintos (por ejemplo, el deshielo). Cada vez es más común encontrarse en el día a día, tanto en la prensa escrita como en medios de comunicación, noticias sobre inundaciones en cualquier parte del mundo, las cuales dan lugar en algunos casos a desastres de gran envergadura. Muchas de éstas suceden en zonas con gran densidad de población, en grandes urbes, y cuando estos eventos se producen en estas zonas, el arrastre de mobiliario urbano u otros elementos pueden ocasionar grandes daños llegando a producirse pérdidas humanas.

A continuación, se documentan noticias de los últimos años (desde el ámbito mundial hasta el estatal y autonómico) sobre eventos de inundaciones extremas en entornos urbanos con el fin de reflejar el aumento de este tipo de eventos influenciados por el cambio climático.

### **Florida, USA. 11 de septiembre de 2017.**

Uno de los lugares que más ha sufrido los efectos de inundaciones es Estados Unidos. Un ejemplo fue el paso del huracán *Irma* que llegó en septiembre de 2017 a la zona de Florida provocando grandes destrozos y convirtiendo calles de Miami en ríos improvisados (**Figura 2.1**). El paso de este temporal también se cobró varias vidas humanas.



**Figura 2.1.** Huracán Irma a su paso por Florida.  
*Fuente: eluniverso.com*

### **Tlalpan, México. 4 de abril de 2018.**

En países como México también son muy comunes las inundaciones provocadas por episodios de períodos cortos de tiempo en el que cae una gran cantidad de agua como sucedió en la ciudad de Tlalpan. Durante estas precipitaciones, algunas en forma de granizo, las autoridades recomendaron extremar precauciones. Aun así, fueron muchos los problemas ocasionados, siendo uno de los más graves la entrada de agua en numerosas viviendas, lo que se tradujo en cuantiosas pérdidas económicas. Además, muchas carreteras fueron inundadas siendo intransitables durante algún tiempo y algunos coches fueron desplazados varios metros.

### **Livorno y Montenero, Italia. 10 de septiembre 2017.**

En Italia, concretamente en las ciudades de Livorno y Montenero (en el noreste y centro del país) un temporal se llevó por delante seis vidas el pasado septiembre. En la zona en que fallecieron estas personas hubo inundaciones y desprendimientos a causa de las fuertes precipitaciones y los bomberos intervinieron en 160 situaciones. En muchas de ellas para rescatar a personas de automóviles que habían sido arrastrados por la fuerza del agua (**Figura 2.2**).

### **París, Francia. 27 de enero de 2018.**

En muchos casos las inundaciones extremas se deben a eventos de crecidas espontáneas de los ríos como fue el caso del Sena a su paso por París (Francia). En enero de 2018 se produjo una crecida rápida del río debido a largos días de intensas precipitaciones, causando numerosos incidentes como el arrastre de contenedores, coches, bicicletas, etc. (**Figura 2.3**). Se tuvieron que evacuar un total de 1500 personas.



**Figura 2.2.** Inundaciones en Livorno y Montenero en 2017. *Fuente:* Alesso Novi. EFE.



**Figura 2.3.** Inundaciones en París en 2018. *Fuente:* Philippe López. AFP.

### **Málaga y Cádiz, España. 5 de diciembre de 2016.**

En el sur peninsular los eventos de precipitaciones intensas son cada vez más comunes. En este enlace se comenta una gran tromba de agua caída en una sola noche en Málaga en diciembre de 2016. Esta tromba de agua produjo riadas e inundaciones produciendo dos muertes.

### **Salou, Cataluña, España. 1 de septiembre de 2017.**

Aunque el sur peninsular sea el más propenso a sufrir los efectos de las intensas precipitaciones, éstas también actúan sobre otros puntos del territorio español. Por ejemplo, en Salou (Tarragona), el 1 de septiembre de 2017, las lluvias hicieron que surgiesen ríos espontáneos sobre las calles arrastrando coches.

### **Santiago de Compostela, Galicia, España. 28 de agosto de 2017.**

En Galicia también se producen inundaciones como ocurrió en la ciudad de Santiago de Compostela. Esta noticia data de agosto de 2017 y muestra como una fuerte tormenta causó diferentes incidentes en un polígono industrial de la ciudad. El paso de la tormenta dejó numerosas naves anegadas y algunos coches fueron desplazados muchos metros (**Figura 2.4**).



**Figura 2.4.** Inundaciones en el Polígono do Tambre (Santiago). Fuente: La Voz de Galicia.

### **Galicia, España. 15 de marzo de 2018.**

La ciclogénesis explosiva denominada *Gisele* que pasó por Galicia en marzo de 2018 hizo que muchos de los grandes ríos gallegos se desbordaran sobre todo en la zona de A Costa da Morte. Esto llevó también consigo el arrastre de mobiliario de instalaciones cercanas a las orillas. Los caudales de los ríos aumentaron tanto en tan poco tiempo que la salinidad de la ría de Muros e Noia llegó a ser cero.

### **Covas, Viveiro, Galicia. 1 de abril de 2018.**

En Viveiro, en la zona de A Mariña, se registraron unas pequeñas inundaciones el 1 de abril de 2018 que ocasionaron algunos problemas de circulación en varias carreteras del ayuntamiento.

### **Santiago de Compostela, Galicia. 4 de abril de 2018.**

Una tromba de agua que cayó sobre la capital gallega “convirtió numerosos puntos de la ciudad en piscinas improvisadas en las que quedaron atrapados conductores y viandantes”. En este caso, también quedaron varios vehículos atrapados en el polígono del Tambre como ocurrió el 28 de agosto de 2017. Los bomberos de Santiago recibieron numerosos avisos de incidentes causados por las inundaciones.

## **2.3. Soluciones**

Como se ha descrito en los puntos anteriores, el número de eventos climáticos extremos está en aumento y, por lo tanto, el número de inundaciones extremas. En muchos casos, estas inundaciones se producen por grandes precipitaciones en períodos cortos de tiempo causando riadas y desbordamientos de ríos. Los problemas derivados de las inundaciones son más acusados en ciudades, ya que existen muchas más infraestructuras, además de contenedores, vehículos... Es por ello necesario buscar soluciones o herramientas que permitan estudiar y diseñar medidas paliativas para mitigar el efecto de las inundaciones en entornos urbanos.

Una primera solución es el modelado físico, es decir, la recreación y construcción a escala de una inundación usando geometrías reales (escaladas) en donde se midan experimentalmente magnitudes de interés como velocidad del avance del agua, calado que alcanza la masa de agua que se desplaza, desplazamiento de elementos de mobiliario urbano, etc. Sin embargo, los modelos físicos conllevan altos costes y las escalas temporales de trabajo son también altas. Por lo tanto, una posible solución para simular este tipo de eventos reduciendo costes y tiempo es el uso de herramientas numéricas.

En el grupo de investigación EPHYSLAB de la Universidad de Vigo se trabaja con dos modelos numéricos que son Iber y DualSPHysics:

Iber fue desarrollado por el grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de A Coruña, el Instituto FLUMEN y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, ambos de la Universidad Politécnica de Catalunya.



Esta herramienta surgió para dar respuesta a los requerimientos definidos en las directrices, reglamentos y recomendaciones existentes en la legislación española en materia de aguas. Iber es una herramienta de modelización numérica del flujo de agua en lámina libre en dos dimensiones. También permite estudiar el comportamiento de sedimentos en ríos y estuarios. El modelo está descrito en detalle en el trabajo de Bladé et al., (2014).



DualSPHysics es un modelo desarrollado por el grupo EPHYSLAB de la Universidad de Vigo en colaboración con otras universidades europeas. DualSPHysics es una herramienta para el estudio hidrodinámico de problemas de superficie libre como son la propagación de olas y su interacción con estructuras, diseño de objetos flotantes, escorrentías... Las funcionalidades y la implementación del código están descritas en Crespo et al., (2015).

En este trabajo se utiliza el modelo DualSPHysics para simular eventos de inundaciones. El modelo DualSPHysics, una vez validado se empleará para estudiar un caso real en la ciudad de Lugo.

**Capítulo 3.**  
**MODELO NUMÉRICO DUALSPHYSICS**



## 3.1. Modelado numérico

El modelado numérico se trata de una herramienta muy útil en el campo de la ingeniería y de la ciencia para resolver problemas complejos. Por un lado, permite simular experimentos numéricos en lugar de reproducir experiencias reales que son caras y en algunas ocasiones imposibles de llevarse a cabo con modelos a escala. Por otro lado, proporciona información adicional que no se puede obtener de la observación experimental, lo cual es especialmente valioso cuando el objeto de estudio no es solo descubrir alguna variable del flujo (como velocidad, presión, etc.) sino también entender los procesos físicos envueltos en el fenómeno.

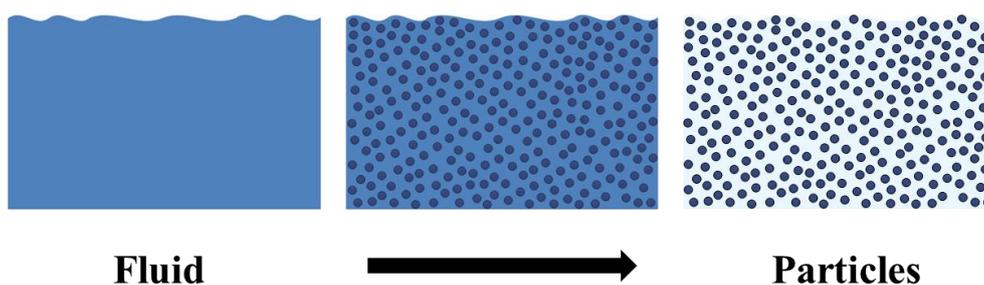
Las ecuaciones físicas que rigen un método numérico se pueden resolver con la ayuda de una malla usando una descripción Euleriana o se pueden resolver sin el uso de la malla con una descripción Lagrangiana. Los métodos basados en una malla (elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos) son actualmente muy robustos, están bien desarrollados y han sido aplicados a un amplio abanico de aplicaciones en las que proporcionan resultados muy precisos. Estos métodos de malla son ideales para sistemas con dominios perfectamente delimitados y para simulaciones donde los contornos permanecen fijos. Sin embargo, la creación de la malla puede resultar muy ineficiente si el sistema es complejo o si los contornos se mueven a gran velocidad.

Este trabajo se centra en métodos sin malla (y Lagrangianos), los cuales se usan tanto en mecánica de sólidos como en dinámica de fluidos. Históricamente, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha centrado en métodos que se basan en una malla (volúmenes finitos). En los métodos sin malla se sustituye la misma por un conjunto de nodos distribuidos de manera arbitraria. Se espera así que el modelo sea más flexible y versátil que los métodos convencionales, especialmente para aplicaciones en las que se estudien geometrías muy complejas, grandes deformaciones y discontinuidades en el flujo del fluido.

## 3.2. Método SPH

SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) es un método numérico Lagrangiano, que en los últimos años se ha aplicado en numerosos campos de la dinámica de fluidos. El método SPH fue desarrollado en los años 70 aplicado a la astrofísica y cosmología (Gingold & Monaghan, 1977; Lucy, 1977). Desde entonces, el método se ha aplicado a diversos problemas y ha demostrado su robustez en diferentes campos de la astrofísica, magneto-hidrodinámica y mecánica de sólidos. En los últimos años el método se ha aplicado con éxito para estudiar la interacción entre olas y estructuras costeras, objetos flotantes, propagación de oleaje y también se están llevando a cabo aplicaciones industriales en diferentes campos.

SPH discretiza el fluido como un conjunto de puntos o nodos llamados partículas. En SPH se resuelven las ecuaciones de la dinámica de fluidos, calculando los valores de las variables físicas representativas (velocidad, posición, densidad y presión) para una partícula como interpolación de los valores de las partículas más próximas. Las ecuaciones que se resuelven en cada par de interacción entre partículas son las ecuaciones de Navier-Stokes: la ecuación de momento (para calcular la tasa de variación temporal de la velocidad o aceleración) y la ecuación de continuidad (para calcular la tasa de variación temporal de la densidad).



El método SPH se basa en la teoría de los interpolandos integrales. El principio fundamental es aproximar cualquier función  $A(\mathbf{r})$  por:

$$A(\mathbf{r}) = \int_{\Omega} A(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' \quad (3.1)$$

donde  $\mathbf{r}$  es el vector de posición,  $W$  es la función *kernel*,  $h$  es la distancia de interacción llamada distancia de suavizado.

La aproximación de la Ec. 3.1, que es una integral, se puede escribir en notación discreta usando sumatorios:

$$A(\mathbf{r}) \approx \sum_{j=1}^N A(\mathbf{r}_j) W(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j, h) \frac{m_j}{\rho_j} \quad (3.2)$$

donde el sumatorio se realiza sobre las partículas vecinas  $j$  que se encuentran en la región definida por la función *kernel*. La masa y la densidad de las partículas vecinas se denotan como  $m_j$  y  $\rho_j$  respectivamente.

De este modo, en el formalismo SPH pasamos de la notación continua (Ec. 3.1) a la notación discreta (Ec. 3.2), es decir, pasamos de integrales a sumatorios.

Para este paso de un medio continuo, como lo es un fluido, a un medio discreto, partículas, se emplea la función *kernel* ( $W$ ) que cumple varias propiedades:

Positividad:  $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) \geq 0$  dentro del dominio

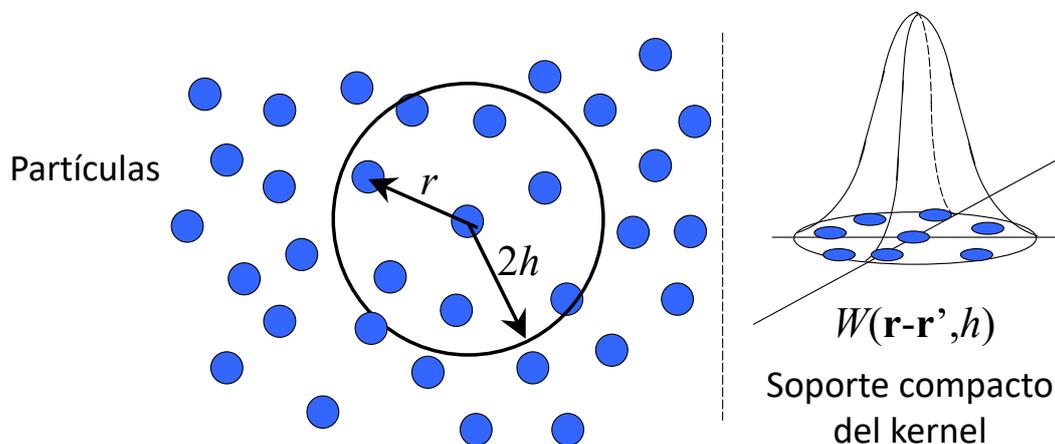
Soporte compacto:  $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) = 0$  fuera del dominio

Normalización:  $\int W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' = 1$

Comportamiento tipo función delta:  $\lim_{h \rightarrow 0} W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h) d\mathbf{r}' = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$

Comportamiento monótono decreciente de  $W(\mathbf{r} - \mathbf{r}', h)$

La **Figura 3.1** muestra el dominio de interacción definido por la función *kernel*  $W$ . Las partículas que se encuentran a una distancia menor de  $2h$  (dos veces la longitud de suavizado  $h$ ) son las partículas vecinas que interactúan con la partícula de interés. Cuanto más cerca, mayor será su contribución.



**Figura 3.1.** Esquema del dominio de influencia y soporte compacto del kernel.

La ecuación de conservación de momento de Navier-Stokes permite calcular la velocidad a la que se mueve el fluido:

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla \frac{P}{\rho} + \mathbf{g} + \nu_0 \nabla^2 \mathbf{v} \quad (3.3)$$

donde  $P$  es presión,  $\rho$  es densidad,  $\mathbf{v}$  es la velocidad,  $\mathbf{g}$  la gravedad, y  $\nu_0 \nabla^2 \mathbf{v}$  el término viscoso. Esta expresión traducida a formalismo SPH será:

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left( \frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} - \mathbf{g} \quad (3.4)$$

y se utiliza para calcular la velocidad de la partícula  $a$  ( $\mathbf{v}_a$ ) a partir de la suma de las interacciones con todas las partículas vecinas  $b$  usando la función *kernel*  $W_{ab}$  (que se calcula a partir de la distancia entre las partículas  $a$  y  $b$ ). En este caso  $\Pi_{ab}$  es el término viscoso.

La ecuación de continuidad de Navier-Stokes (o ecuación de conservación de la masa) que se utiliza para el medio continuo se escribe de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3.5)$$

y su conversión en formalismo discreto o de SPH usando la función *kernel* quedaría:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3.6)$$

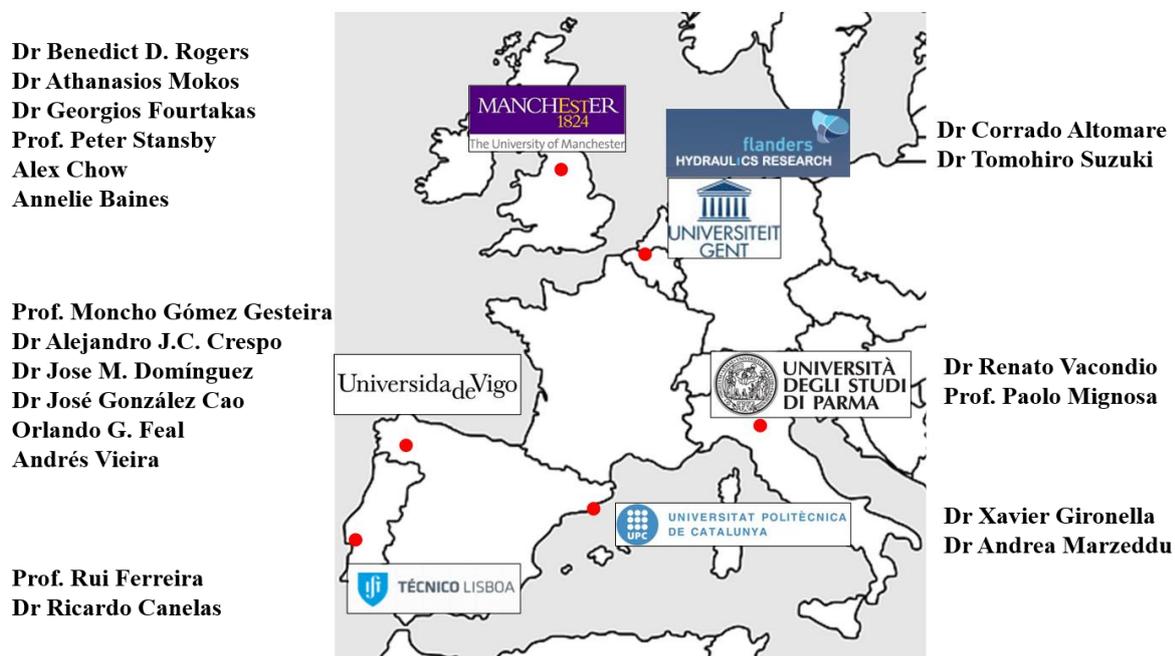
donde  $\mathbf{v}_{ab}$  es  $\mathbf{v}_a - \mathbf{v}_b$  y  $\rho_a$  es la densidad de la partícula  $a$  que se calcula también como sumatorio de las interacciones con todas las vecinas  $b$ .

Es decir, los valores de  $d\mathbf{v}/dt$  y  $d\rho/dt$  se calculan a partir de las Ec. 3.4 y 3.6. Con esos valores y el valor del siguiente paso de tiempo ( $\Delta t$ ) se calculan las velocidades y densidades de todas las partículas en el paso siguiente. Con la velocidad se puede calcular la posición nueva de las partículas y con la densidad se calcula la presión (usando una ecuación de estado en la aproximación débilmente compresible). De esta manera tan sencilla se obtiene el estado de las partículas (posición, velocidad, densidad y presión) en cada instante de la simulación.

La formulación básica del método SPH se describe en detalle en los trabajos de Monaghan (1992), Liu (2003) y Monaghan (2005).

### 3.3. Código DualSPHysics

El grupo EPHYSLAB ha desarrollado el código SPH llamado DualSPHysics en colaboración con investigadores (**Figura 3.2**) de University of Manchester (Reino Unido), Università degli studi di Parma (Italia), Instituto Superior Técnico de Lisboa (Portugal) y la Universiteit Gent (Bélgica), y ha centrado su investigación en la propagación de las olas y en su interacción con estructuras costeras (Crespo et al., 2011, Altomare et al., 2015, Altomare et al., 2017).



**Figura 3.2.** Investigadores que colaboran en el desarrollo de DualSPHysics.

DualSPHysics es código libre y puede descargarse gratuitamente desde la web <http://www.dual.sphysics.org> (**Figura 3.3**). Uno de los propósitos de este código libre es fomentar el uso del método SPH entre los investigadores e invitarlos a contribuir al proyecto enviando sus mejoras.

# DualSPHysics

FAQ References Downloads Validation Animations SPHysics GPU Computing  
Features WIKI GUI Visualization Developers Contact Forum News



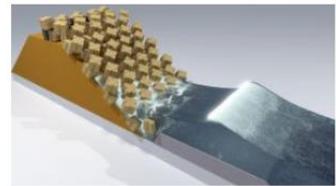
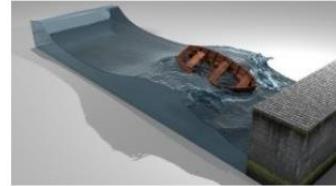
DualSPHysics is based on the Smoothed Particle Hydrodynamics model named SPHysics ([www.sphysics.org](http://www.sphysics.org)).

The code is developed to study free-surface flow phenomena where Eulerian methods can be difficult to apply, such as waves or impact of dam-breaks on off-shore structures. DualSPHysics is a set of C++, CUDA and Java codes designed to deal with real-life engineering problems.

Contact E-Mail: [dualsphysics@gmail.com](mailto:dualsphysics@gmail.com)

Youtube Channel: [www.youtube.com/user/DualSPHysics](http://www.youtube.com/user/DualSPHysics)

Twitter Account: [@DualSPHysics](https://twitter.com/DualSPHysics)



**Figura 3.3.** Página web de DualSPHysics ([www.dual.sphysics.org](http://www.dual.sphysics.org)).

Los códigos SPH pueden proporcionar una descripción precisa del fluido, pero su mayor limitación es el alto coste computacional, lo cual puede hacer imposible su uso de manera eficiente para estudiar problemas reales de ingeniería. El tiempo computacional se incrementa con el número de partículas que componen los sistemas, por lo que muchos problemas son inviables por la complejidad de los mismos. Además de existir un límite temporal en las simulaciones, también hay un límite en el número de partículas que los procesadores pueden administrar. Por este motivo, HPC (o la computación de altas prestaciones) es la herramienta necesaria para alcanzar nuevas cotas en el modelado de problemas de ingeniería, más concretamente, en este caso se emplean GPU (las unidades de proceso gráficas). Las GPU aparecen como una alternativa accesible para acelerar los métodos SPH usando un gran potencial de programación en paralelo donde las tarjetas gráficas se usan como dispositivo de ejecución. Ésta es una tecnología nueva desarrollada por la industria de los videojuegos y que proporciona un alto rendimiento con un gasto económico razonable en muchos campos, no sólo en CFD.

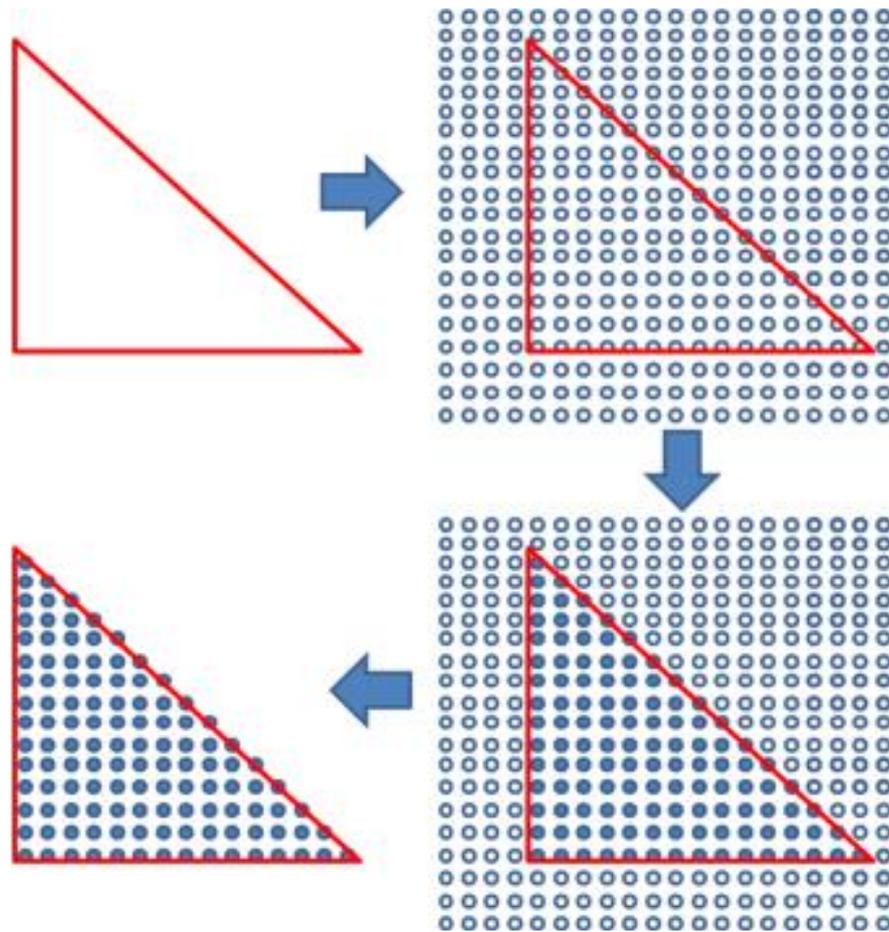
De este modo el código DualSPHysics se desarrolló para ser un código SPH robusto, eficiente y altamente paralelizable y para poder ser usado en problemas de ingeniería real. DualSPHysics está escrito en los lenguajes de programación C++ y CUDA que es un lenguaje de programación para las GPU (Domínguez et al., 2013). El código DualSPHysics usando GPU puede llegar a ser hasta 100 veces más rápido que usando una versión secuencial en CPU (Crespo et al., 2011). Esto permite simular millones de partículas, cuando la geometría compleja del caso requiere una alta resolución, en un tiempo de cómputo razonable. Así, DualSPHysics se ha aplicado a problemas de ingeniería real como es el estudio del rebase en un rompeolas de Bélgica (Altomare et al., 2014). La formulación SPH implementada en DualSPHysics se puede consultar en Crespo et al. (2015).

*NOTA: Todas las simulaciones realizadas en este trabajo se han llevado a cabo en un ordenador personal (PC) con una GPU GeForce GTX 1080.*

### **3.4. Condiciones iniciales y condiciones de contorno**

Generar la condición inicial en DualSPHysics significa crear las partículas con los valores iniciales de posición, velocidad, densidad... Como ya se explicó, SPH es un modelo libre de malla, es decir, no se utiliza una malla para realizar las interacciones y resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos. Sin embargo, en el primer instante hay que crear las partículas en unas determinadas posiciones y para ello sí se usa una malla, pero sólo para generarlas inicialmente, después éstas se moverán libremente por el dominio.

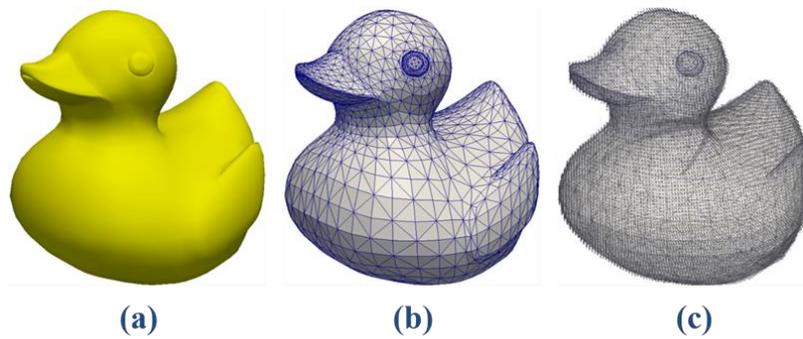
Para determinar las posiciones iniciales donde se crean las partículas se usa una malla tridimensional cartesiana y las partículas se crean en los nodos de esa malla. Los nodos de la malla estarán separados una distancia (que denominaremos “dp”). Para representar objetos 3D en la malla sólo hay que marcar los nodos que se ajusten a la forma del objeto. En la **Figura 3.4** se muestra cómo para discretizar un triángulo en partículas, se marcan los nodos de la malla que pertenecen al plano del triángulo y que al mismo tiempo estén comprendidos entre los tres planos que lo delimitan. Por lo tanto, en los nodos marcados se crearán las partículas.



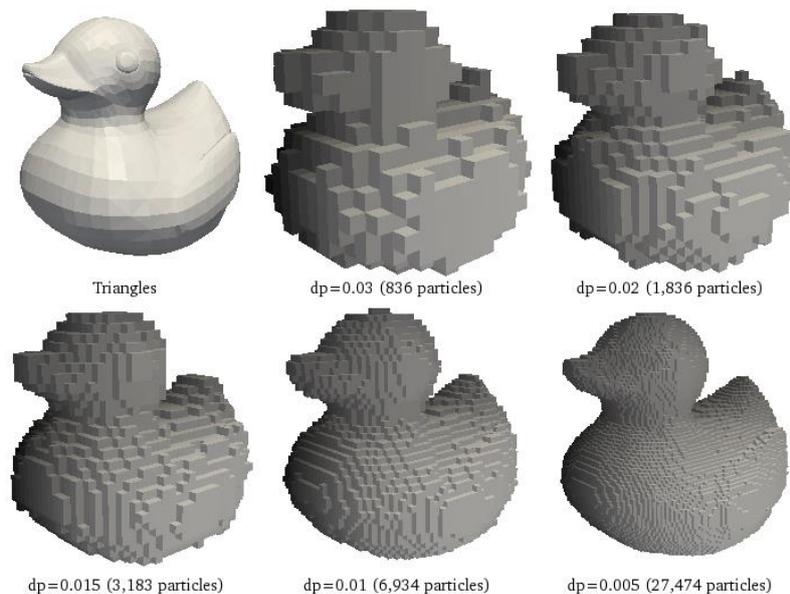
**Figura 3.4.** Creación de un triángulo usando partículas.

La mayoría de los modelos 3D están formados por polígonos que se pueden descomponer en triángulos, y por lo tanto estos triángulos se pueden dibujar como partículas repitiendo este proceso. La **Figura 3.5** muestra un ejemplo de conversión de modelo 3D complejo en partículas.

Al definir un objeto complejo mediante partículas siempre se produce una pérdida de precisión que depende de lo fina que sea la malla (“dp”) y por tanto del número de partículas utilizadas. En la **Figura 3.6** se muestra como a partir del modelo 3D (con dimensiones globales 0.39 m x 0.46 m x 0.42 m) se obtiene su representación en partículas (para una mejor visualización en la figura se usan cubos), con más o menos detalle dependiendo de la distancia entre partículas. Es decir, la resolución y el número de partículas creadas inicialmente depende del valor de “dp” (para un mismo objeto o volumen definido en dimensiones globales).



**Figura 3.5.** a) Modelo 3D, b) triángulos, c) puntos.



**Figura 3.6.** Discretización de una geometría compleja usando diferentes resoluciones.

En SPH, los sólidos (muros, suelo, estructuras costeras, pistones, objetos flotantes...) son descritos por un conjunto de partículas de contorno las cuales ejercen una fuerza repulsiva sobre las partículas fluidas cuando se acercan.

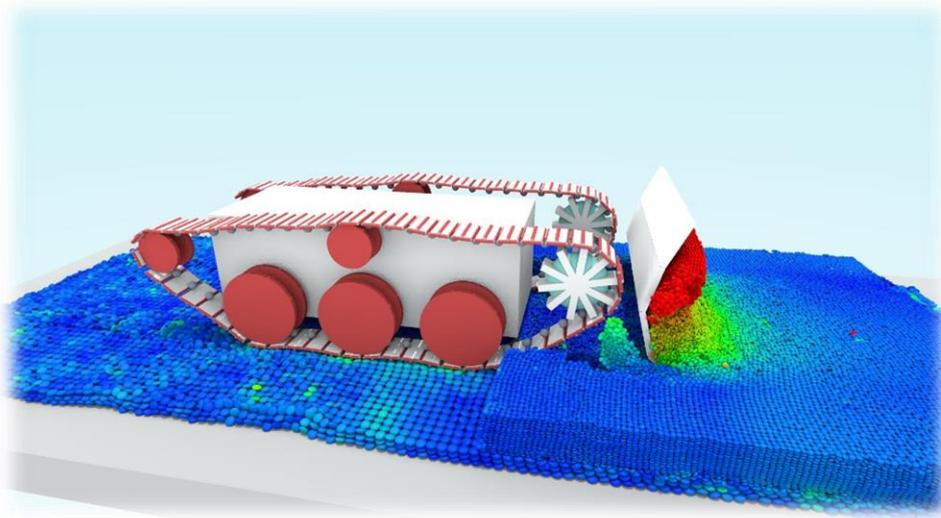
En DualSPHysics se ha implementado una condición de contorno dinámica en donde las partículas de los contornos satisfacen las mismas ecuaciones que las partículas fluidas permitiendo así que su densidad y presión evolucionen. Sin embargo, existe una diferencia y es que el movimiento de las partículas contorno no vendrá definido por las fuerzas entre partículas; se mantendrán fijas en una posición (contornos fijos) o se moverán de acuerdo a algún tipo de movimiento impuesto externamente (puertas, pistones...). En el caso de los objetos flotantes, sus partículas se moverán juntas como parte de un sólido rígido que se mueve considerando el peso del objeto más la fuerza de empuje del fluido de alrededor.

Usando esta condición, cuando una partícula fluida se acerca a un contorno y la distancia entre ellas se hace menor que el rango del *kernel*, la densidad de las partículas contorno aumentan dando como resultado un incremento de la presión. La fuerza ejercida sobre la partícula fluida también se incrementa debido al término de presión en la ecuación del momento (Ec. 3.4) creándose así un mecanismo de repulsión entre el contorno y el fluido. Para una descripción completa de estas condiciones de contorno se puede consultar Crespo et al. (2007).

### 3.5. Acoplamiento con la librería CHRONO

DualSPHysics resuelve la interacción entre partículas fluido con otras partículas fluido y entre el fluido y los sólidos, pero la interacción entre los sólidos no es una interacción SPH. Para las interacciones entre los sólidos se usará la librería externa CHRONO que se ha acoplado al código DualSPHysics.

CHRONO es también código libre y está disponible de manera gratuita en <https://projectchrono.org/>. Esta librería (Tasora y Anitescu, 2011) se desarrolló como un marco de simulación de propósito general para problemas de múltiples cuerpos y con soporte para sistemas muy grandes. En la **Figura 3.7** se muestra un ejemplo usando CHRONO.



**Figura 3.7.** Simulación realizada con CHRONO. Fuente: <https://projectchrono.org/gallery/>

El acoplamiento entre DualSPHysics y CHRONO permite simular sistemas complejos y resolver la interacción fluido-sólido-sólido. Se pueden definir, de manera directa, restricciones tales como uniones (esféricas, articuladas y de restricción total), deslizadores (a lo largo de un eje) y combinaciones de estos (deslizadores articulados, por ejemplo) con grados arbitrarios de libertad.

Una característica importante del acoplamiento entre DualSPHysics y CHRONO es el tratamiento eficiente de tales restricciones cinemáticas con propiedades dinámicas definidas por el usuario tales como coeficientes de fricción y restitución, coeficiente de Poisson y módulo de Young (módulo de elasticidad). El coeficiente de fricción es la oposición al deslizamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto mientras que el de restitución es una medida del grado de conservación de la energía cinética en un choque de partículas. El módulo de Young, o módulo de elasticidad, es la relación entre la tensión aplicada y la tensión experimentada por el cuerpo que se deforma longitudinalmente y el coeficiente de Poisson mide la deformación transversal. De esto modo, en las simulaciones de este trabajo, que incluyen diferentes objetos sólidos, se usarán los valores de estas propiedades dependiendo del material del que están hechos.



# **Capítulo 4. VALIDACIÓN**



En este capítulo se demostrará la validez del modelo DualSPHysics para simular el avance de una masa de agua, su interacción con diferentes objetos y el arrastre de los mismos. Para ello se compararán datos experimentales con simulaciones numéricas realizadas con DualSPHysics. Dos serán los casos utilizados; en uno de ellos el agua arrastra cubos y en el segundo arrastra tres cajas que impactan con obstáculos fijos. Los datos de estos ensayos físicos consisten principalmente en la serie temporal del desplazamiento de los objetos.

## 4.1. Caso de validación I: arrastre de cubos

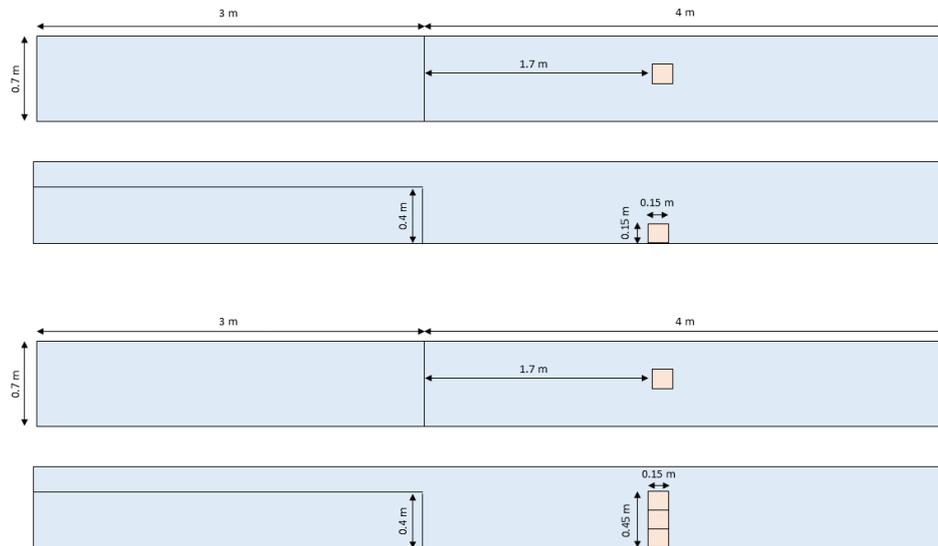
El primer caso de validación se basa en el experimento descrito en Canelas et al. (2016). Este experimento fue realizado en el Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa (Portugal). El tanque de ensayos consta de un canal de vidrio de 8 m de largo y 0.7 m de ancho. Además, tiene una puerta a 3.5 m y a 1.7 m de ella se colocaron unos cubos. Estos cubos, que serán arrastrados por el agua, tienen un lado de 0.15 m de longitud y son compactos, siendo su densidad de 800 kg/m<sup>3</sup>. Durante la campaña experimental se ensayaron diferentes configuraciones, pero aquí usaremos los datos de dos de ellas; en un caso hay un solo cubo, y en un segundo caso hay tres cubos perfectamente apilados. Las caras de los cubos están alineadas con la dirección de avance del agua. Dichos experimentos fueron repetidos solamente dos veces, estableciéndose una media entre las mediciones.

Puesto que DualSPHysics incluye la librería CHRONO para simular, no sólo la interacción entre el fluido y los sólidos, sino también la interacción entre éstos, es importante definir las propiedades de los materiales de los diferentes elementos sólidos del tanque experimental. Así, la **Tabla 4.1** recoge esta información para las paredes del canal que son de cristal, el suelo de acero y los cubos de PVC.

**Tabla 4.1.** Propiedades de los materiales empleados en DualSPHysics.

	Material	Módulo de Young (N/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson (-)	Coefficiente de Fricción (-)	Coefficiente de restitución (-)
Suelo del canal	ACERO	210 x 10 <sup>9</sup>	0.30	0.35	0.80
Paredes canal	CRISTAL	65 x 10 <sup>9</sup>	0.23	0.40	0.85
Cubos	PVC	3 x 10 <sup>9</sup>	0.30	0.45	0.55

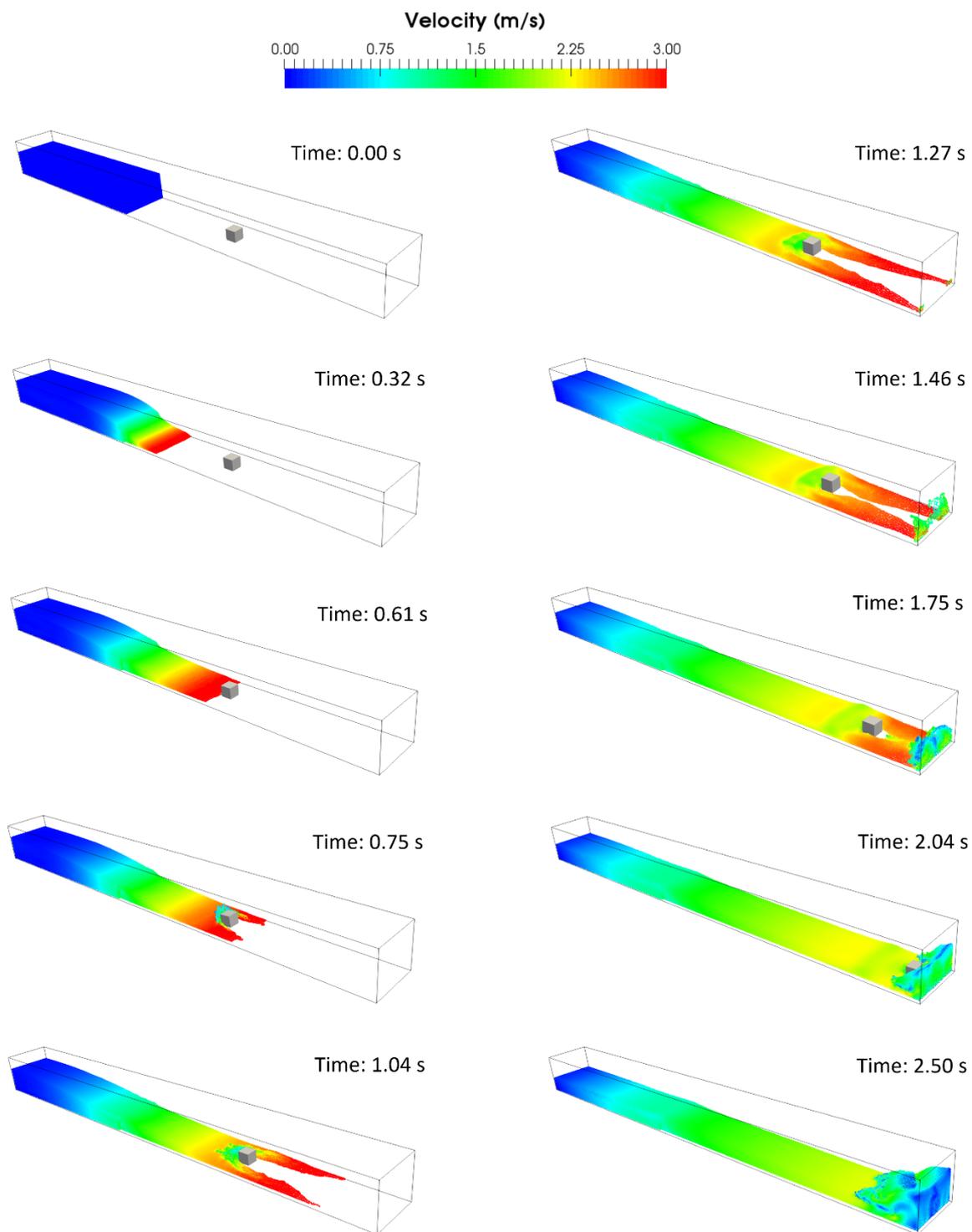
La **Figura 4.1** muestra las dimensiones del tanque numérico para simular los experimentos con uno y tres cubos. El tanque numérico es un metro más corto que el experimental (se reduce el dominio y no afecta para la comparación con resultados). La puerta del tanque experimental se abre tan rápido que en estas simulaciones no fue necesario incluirla.



**Figura 4.1.** Configuración de la simulación en DualSPHysics para un cubo (arriba) y para tres cubos apilados (abajo).

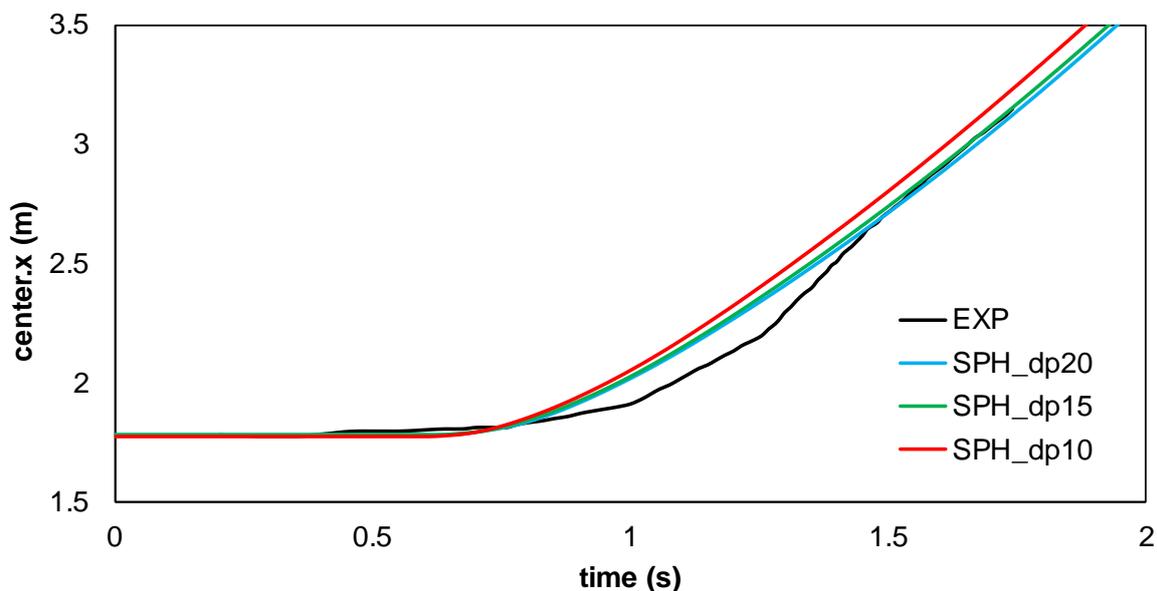
Las dos simulaciones numéricas se realizaron para diferentes resoluciones, es decir, para diferente número de partículas. Como ya se explicó en el Capítulo 3, la resolución del caso viene determinada por la distancia inicial a la que se crean las partículas (“dp”). Cuanto menor es “dp”, mayor es el número de partículas creadas para discretizar un mismo volumen y, por lo tanto, se dice que trabajamos con una mayor resolución. De este modo, los resultados se muestran para tres resoluciones diferentes, usando  $dp=10, 15$  y  $20$  mm.

En la **Figura 4.2** se pueden apreciar diferentes instantes de la simulación (con  $dp=10$  mm) en la que el fluido arrastra un solo cubo. Los primeros instantes muestran como el agua alcanza el cubo en el instante 0.61 s, lo golpea y arrastra. En el instante 1.27 s, el agua comienza a llegar al final del canal impactando con la pared. En el instante 2.04 s, el cubo impacta en la pared del final del canal mientras que el agua se refleja y comienza a avanzar en sentido contrario. La simulación numérica acaba a los 2.50 segundos, pero como veremos después, solo hay datos experimentales durante los primeros 2 segundos.



**Figura 4.2.** Diferentes instantes de la simulación realizada con DualSPHysics para el arrastre de un cubo ( $d_p=10$  mm).

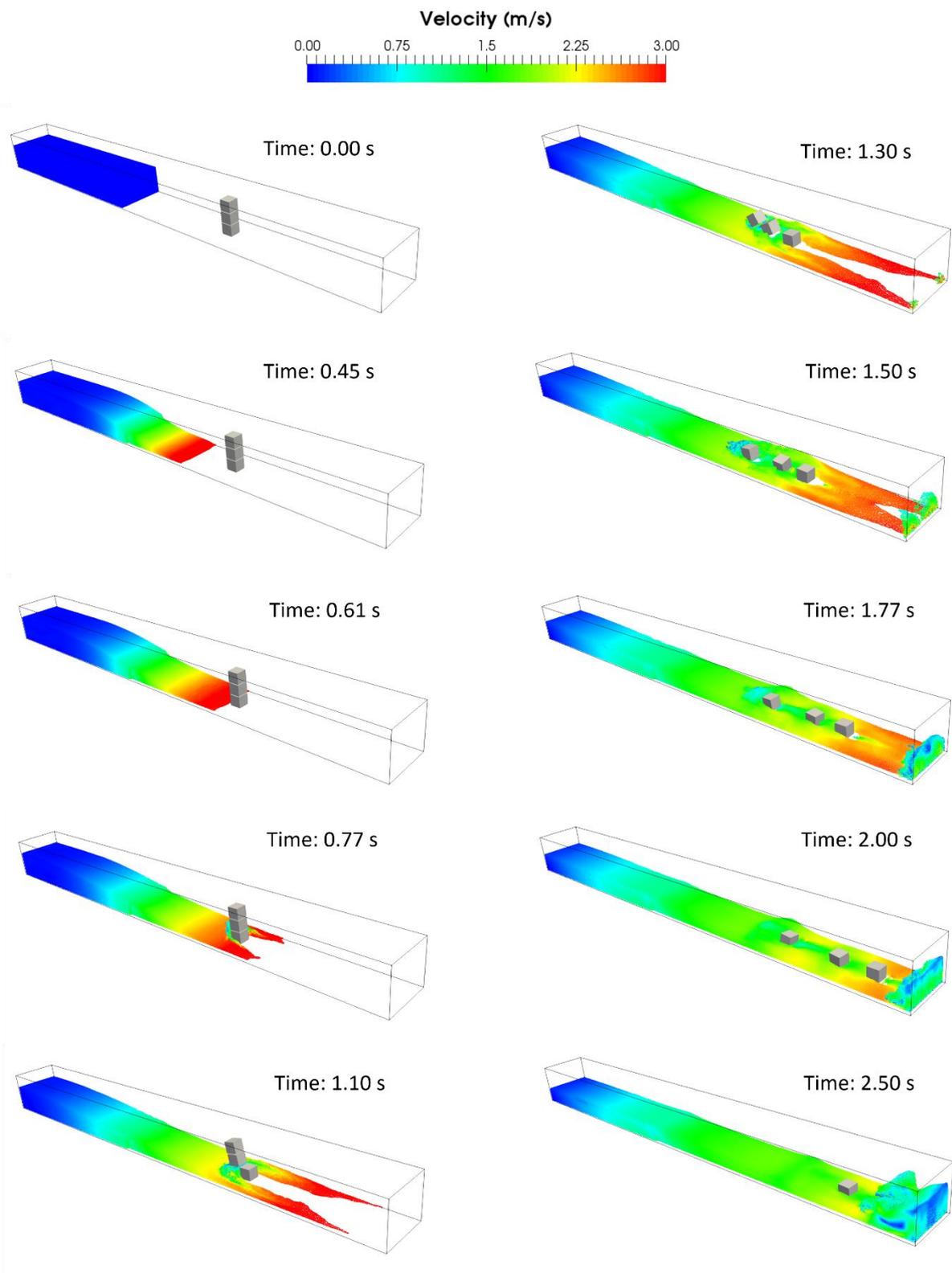
DualSPHysics incluye herramientas de post-procesado que permiten analizar las simulaciones y obtener magnitudes de interés. En este caso se calcula la posición (en el eje X) del centro del cubo durante la simulación. Estos resultados numéricos se comparan con los experimentales de Canelas et al. (2016). En la **Figura 4.3** se representa la serie temporal experimental (color negro) y las series obtenidas con DualSPHysics usando diferentes resoluciones (colores). Los resultados numéricos convergen hacia el experimental a medida que aumentamos la resolución (menor “dp”) y, en general, los datos de la simulación tienen gran similitud con los experimentales. Se observan algunas diferencias entre 0.8-1.5 s, pero también hay que tener en cuenta que los datos experimentales tienen cierta incertidumbre pues la línea negra aquí representada es el valor medido de sólo dos ensayos de laboratorio.



**Figura 4.3.** Serie temporal experimental y numérica de la posición x del centro del cubo.

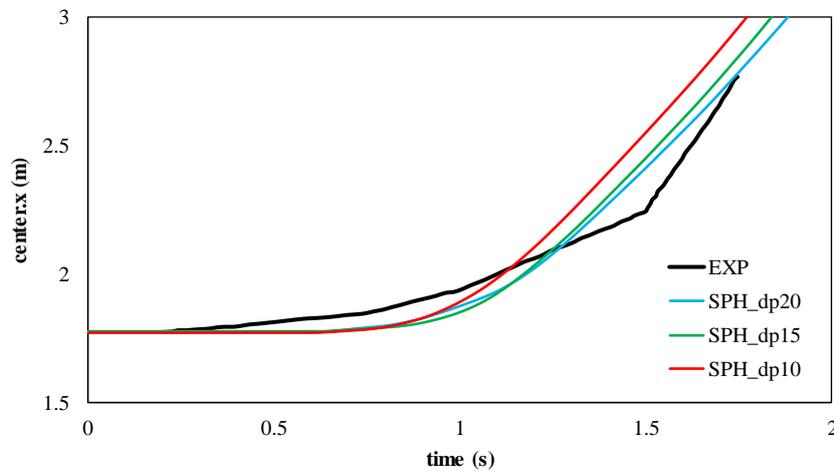
En el segundo caso, en lugar de haber un cubo, hay tres apilados. Las dimensiones y los materiales son los mismos que en el caso anterior. Se realizan también tres simulaciones con resoluciones diferentes (las mismas que antes).

En la **Figura 4.4** se pueden observar diferentes instantes de la simulación usando  $dp=10$  mm. El agua llega a los cubos en el instante 0.61 s, primero arrastra el cubo inferior como se ve en el instante 1.10 s y luego caen los otros dos como se ve en los instantes siguientes. Por último, los tres cubos son arrastrados hasta el final del canal como se aprecia del instante 1.30 s al 2.50 s.

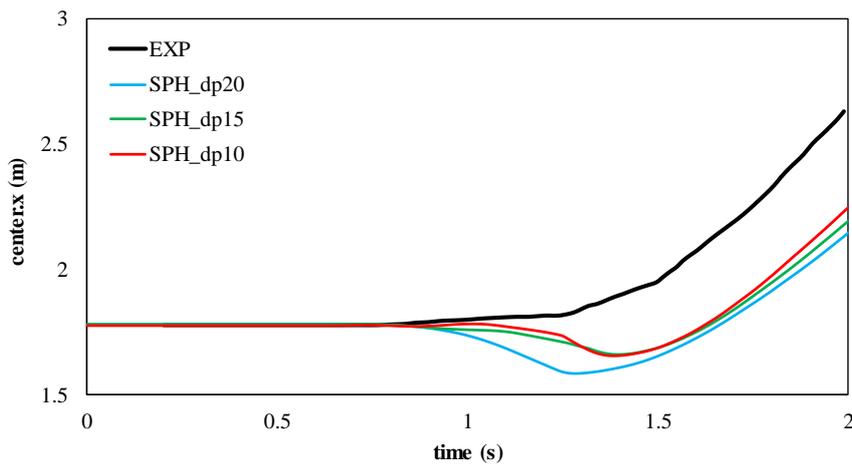


**Figura 4.4.** Diferentes instantes de tiempo de la simulación realizada con DualSPHysics para el arrastre de tres cubos ( $d_p=10$  mm).

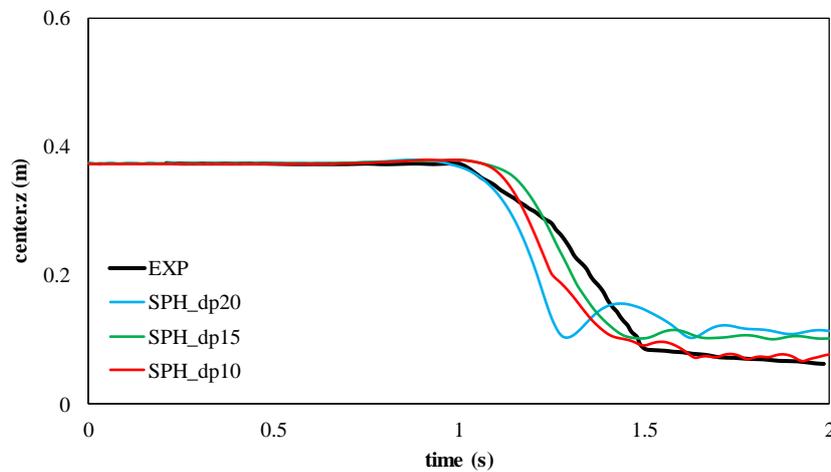
Comparamos, al igual que antes, las posiciones de los centros de masas de los cubos en el experimento y en las simulaciones con DualSPHysics.



**Figura 4.5a.** Serie temporal experimental y numérica de la posición X del cubo inferior.



**Figura 4.5b.** Serie temporal experimental y numérica de la posición X del cubo superior.



**Figura 4.5c.** Serie temporal experimental y numérica de la posición Z del cubo superior.

En la **Figura 4.5a** se representa la serie temporal de la posición X del cubo inferior, en la **Figura 4.5b**, la posición X del cubo superior y, en la **Figura 4.5c** se representa la posición Z del centro del cubo superior. Se puede volver a observar cómo los resultados numéricos convergen cuando aumenta la resolución (disminuir “dp”). Fijándose en la posición X del cubo inferior y en la posición Z del superior, las simulaciones se ajustan bien a la serie experimental. Sin embargo, el error es mayor en la posición X del cubo superior, ya que en las simulaciones el cubo retrocede al caer, pero la serie experimental es sólo creciente. Como ya se dijo antes, la señal experimental es el resultado de promediar los datos de solo dos ensayos por lo que siempre lleva asociada cierta incertidumbre que aquí no se ha considerado.

En la **Tabla 4.2** y **Tabla 4.3** se pueden ver diferentes parámetros de las simulaciones realizadas para el caso del arrastre de un cubo y para los tres cubos apilados. En estas tablas se recogen el número de partículas creadas para cada simulación, así como el tiempo físico y el tiempo de ejecución del caso en la GPU. Se puede apreciar que cuanto menor es la distancia inicial entre las partículas, más partículas se crean y, por lo tanto, mayor es el tiempo de ejecución.

**Tabla 4.2.** *Parámetros de ejecución del caso de arrastre de un cubo.*

dp	Número de partículas	Tiempo físico	Tiempo de ejecución en GPU
20 mm	137,544	2.5 s	4.08 min
15 mm	312,287	2.5 s	12.95 min
10 mm	972,727	2.5 s	62.26 min

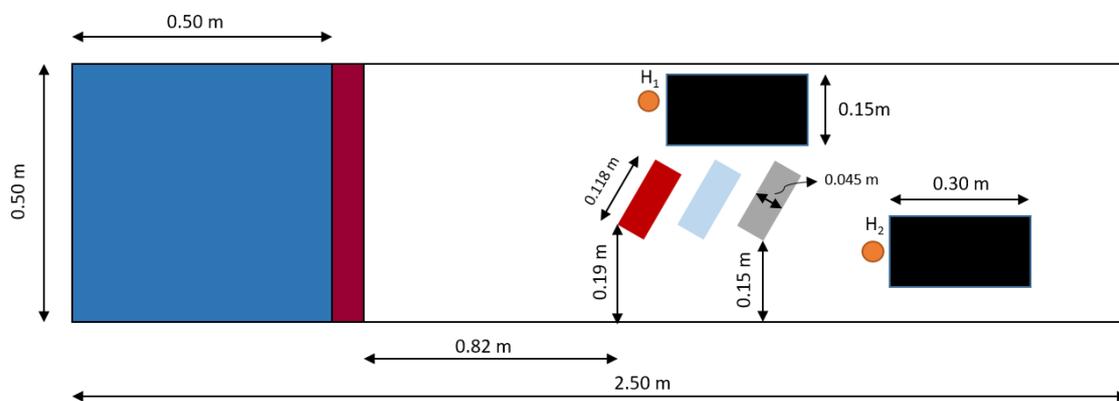
**Tabla 4.3.** *Parámetros de ejecución del caso de arrastre de tres cubos.*

dp	Número de partículas	Tiempo físico	Tiempo de ejecución en GPU
20 mm	138,696	2.5 s	4.64 min
15 mm	314,949	2.5 s	14.65 min
10 mm	980,919	2.5 s	66.50 min

## 4.2. Caso de validación II: arrastre de cajas

En este segundo apartado se valida DualSPHysics con otro experimento. El canal de este experimento está descrito en Albano et al. (2016) y fue realizado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Basilicata (Italia). En ese trabajo estudian inundaciones repentinas que son las que se producen por lluvias muy intensas en poco tiempo en un área limitada, por roturas de presas o por atascos de hielo en ríos o arroyos durante el invierno. En el experimento se intenta recrear una situación de rotura de presas por lo que hay una pequeña puerta que ejerce de presa reteniendo el fluido. Cuando la puerta se abre, el volumen de agua se libera y avanza golpeando dos obstáculos fijos (que representan edificios o cualquier otro tipo de edificación) y arrastrando tres cajas (que representan vehículos).

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un canal de 2.5 m de largo con una sección transversal rectangular de 0.5 m de ancho y 0.5 m de altura. La estructura principal del canal estaba hecha de acero, mientras que las paredes laterales estaban hechas de vidrio transparente y el suelo y las cajas de PVC (Albano et al., 2016).



**Figura 4.6.** Configuración de la simulación en DualSPHysics del caso de arrastre de tres cajas.

La **Figura 4.6** muestra las dimensiones del tanque numérico siguiendo las dimensiones del tanque experimental. Así, el volumen inicial de agua es de  $0.5 \times 0.5 \times 0.5 \text{ m}^3$ . Los obstáculos son de  $0.3 \times 0.15 \times 0.3 \text{ m}^3$ ; el primer obstáculo está colocado a una distancia de 1.4 m de la pared inicial del canal y a 0.02 m de la pared lateral superior, y el segundo obstáculo está a 1.95 m de la pared inicial y a 0.06 m de la pared lateral inferior. Las tres cajas tienen 0.118 m de largo, 0.045 m de ancho y 0.043 m de alto, una masa de 0.025 kg y una densidad de  $111 \text{ kg/m}^3$ . Estas tres cajas

estaban inicialmente en reposo, con sus centros de masas a 1.407 m, 1.515 m y 1.622 m de la pared izquierda del canal, respectivamente, y a 0.0215 m de la pared lateral inferior.

La librería CHRONO que usa DualSPHysics resolverá la interacción entre las cajas y el suelo, las cajas y los obstáculos y con las paredes laterales del canal. Por lo tanto, se han definido las propiedades de los materiales de los diferentes sólidos en la simulación usando valores reales (**Tabla 4.2**).

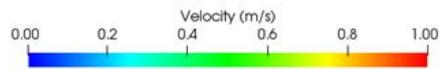
**Tabla 4.2.** Propiedades de los materiales empleados en DualSPHysics.

	Material	Módulo de Young (N/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson (-)	Coefficiente de Fricción (-)	Coefficiente de restitución (-)
Suelo del canal	PVC	3 X 10 <sup>9</sup>	0.30	0.55	0.55
Paredes del canal	CRISTAL	65 X 10 <sup>9</sup>	0.23	0.40	0.85
Cajas	PVC	3 X 10 <sup>9</sup>	0.30	0.55	0.55
Edificios	ACERO	210 X 10 <sup>9</sup>	0.30	0.45	0.80

Uno de los aspectos importantes en este experimento es el movimiento de la puerta, la cual, como dijimos, trata de imitar la rotura de una presa. En los experimentos del apartado anterior la puerta del canal de Lisboa se abría tan rápido que no hacía falta incluirla en la simulación. Sin embargo, en este experimento la puerta se levanta con una velocidad de 0.11 m/s, es decir, lo suficientemente lenta para afectar a la salida del agua. Por ello se ejecutaron dos simulaciones con y sin puerta para ver las diferencias en la salida del agua. En la **Figura 4.7** se puede ver el instante 0.40 s de la simulación sin puerta (DAM) y con puerta (GATE) y el agua avanza más rápidamente en el canal cuando no hay puerta, ya que en este instante la lámina de agua está más adelantada.

Usando una de las herramientas de post-procesado del modelo podemos calcular el flujo de entrada del agua en el canal, representado en la **Figura 4.8**. Se puede ver como usando la puerta el flujo de entrada es más representativo de una inundación, que es lo que se intenta estudiar en el experimento de Albano et al. (2016).

DAM



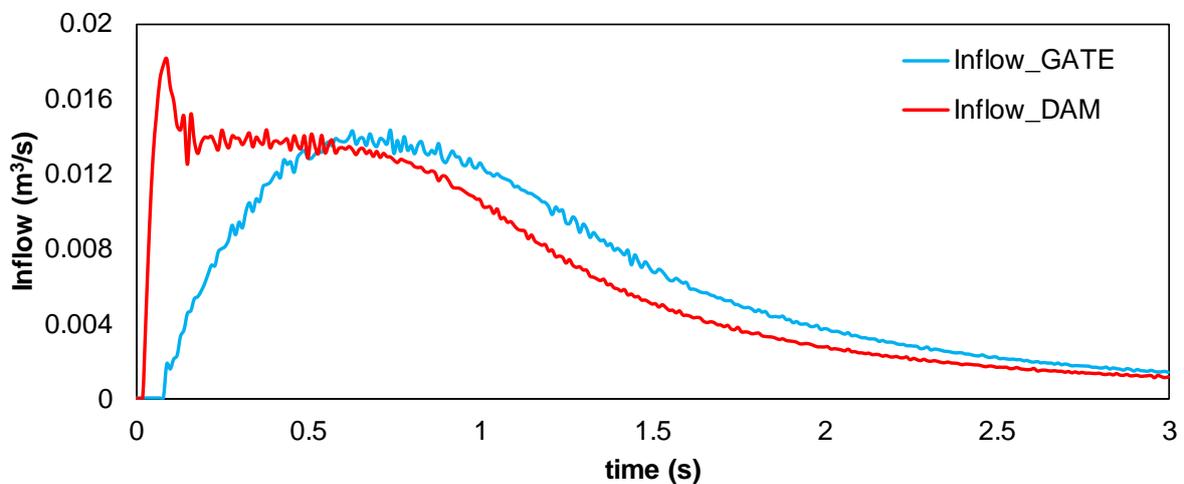
Time: 0.40 s



GATE

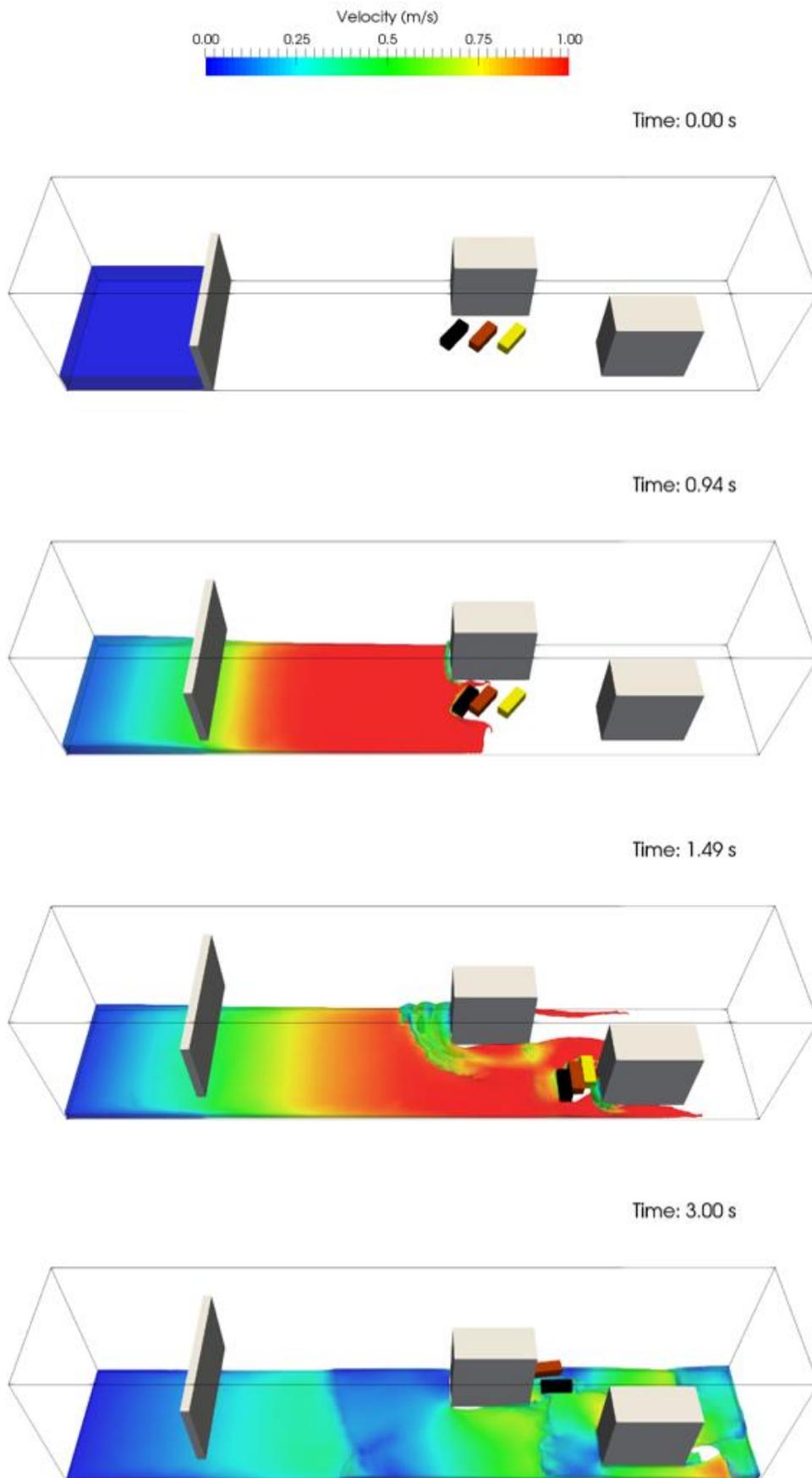


**Figura 4.7.** Instante comparando la simulación sin la existencia de puerta (DAM) y con la puerta elevándose para imitar rotura de una presa (GATE).



**Figura 4.8.** Serie temporal del flujo de entrada de agua con puerta y sin puerta.

Ahora ya podemos realizar la simulación completa; incluyendo la puerta, los obstáculos fijos y las cajas. Como ya se había dicho antes, la puerta representa una presa, los obstáculos fijos edificios y las cajas vehículos. En la **Figura 4.9** podemos ver diferentes instantes de la simulación. En este caso se usó una distancia inicial entre partículas, “dp” de 5 mm.



**Figura 4.9.** Diferentes instantes de tiempo de la simulación realizada con DualSPHysics para el arrastre de tres cajas ( $d_p=5$  mm).

Si observamos al detalle los diferentes instantes de la simulación, vemos que en el instante 0.94 s el agua llegó a la primera caja, arrastra y ésta golpea a la segunda. En el instante 1.49 s ya se ve que las tres cajas están siendo arrastradas juntas. En ese mismo instante, en el 1.49 s, las tres cajas impactan contra uno de los edificios y después salen dispersadas en distintas direcciones. En el instante 3.00 s ya se puede ver que cada caja siguió trayectorias diferentes.

Los resultados experimentales de este experimento incluyen la serie temporal de las posiciones X de los centros de las tres cajas, y también la elevación de la superficie del agua en dos posiciones del canal, concretamente delante de los dos edificios.

En cuanto al avance de las tres cajas, la **Figura 4.10** compara la posición X experimental y numérica de sus centros de masas. Se puede ver como los resultados con DualSPHysics son similares a los experimentales en los primeros 2 segundos; las cajas empiezan a moverse en el experimento y en la simulación en los mismos instantes y su velocidad de avance es similar. Las diferencias aparecen a partir del instante 2 s. En este caso el experimento no se repitió varias veces, y por lo tanto la señal experimental no incluye la variabilidad de estos ensayos físicos, lo cual hubiese sido recomendable.

En relación a la elevación de la superficie del agua (**Figura 4.11**) se puede decir que esta variable fue medida en dos puntos del canal que están marcados como círculos de color naranja en la **Figura 4.6** (delante de los dos edificios) como  $H_1$  y  $H_2$ . Se observan pequeñas diferencias entre las series experimental y numérica, aunque el orden de magnitud es el mismo. En la señal numérica de  $H_2$  faltan datos en torno a los 1.6-1.9 s porque en esos instantes una de las cajas pasa por esta posición dificultando la medición.

En esta simulación, realizada para un “dp” de 5 mm, se crearon sobre dos millones y medio de partículas (2,545,606), un número bastante mayor que en los casos anteriores. El tiempo simulado fue de 3.5 s y el tiempo de ejecución del caso en la GPU fue de 468.20 min (casi 8 h).

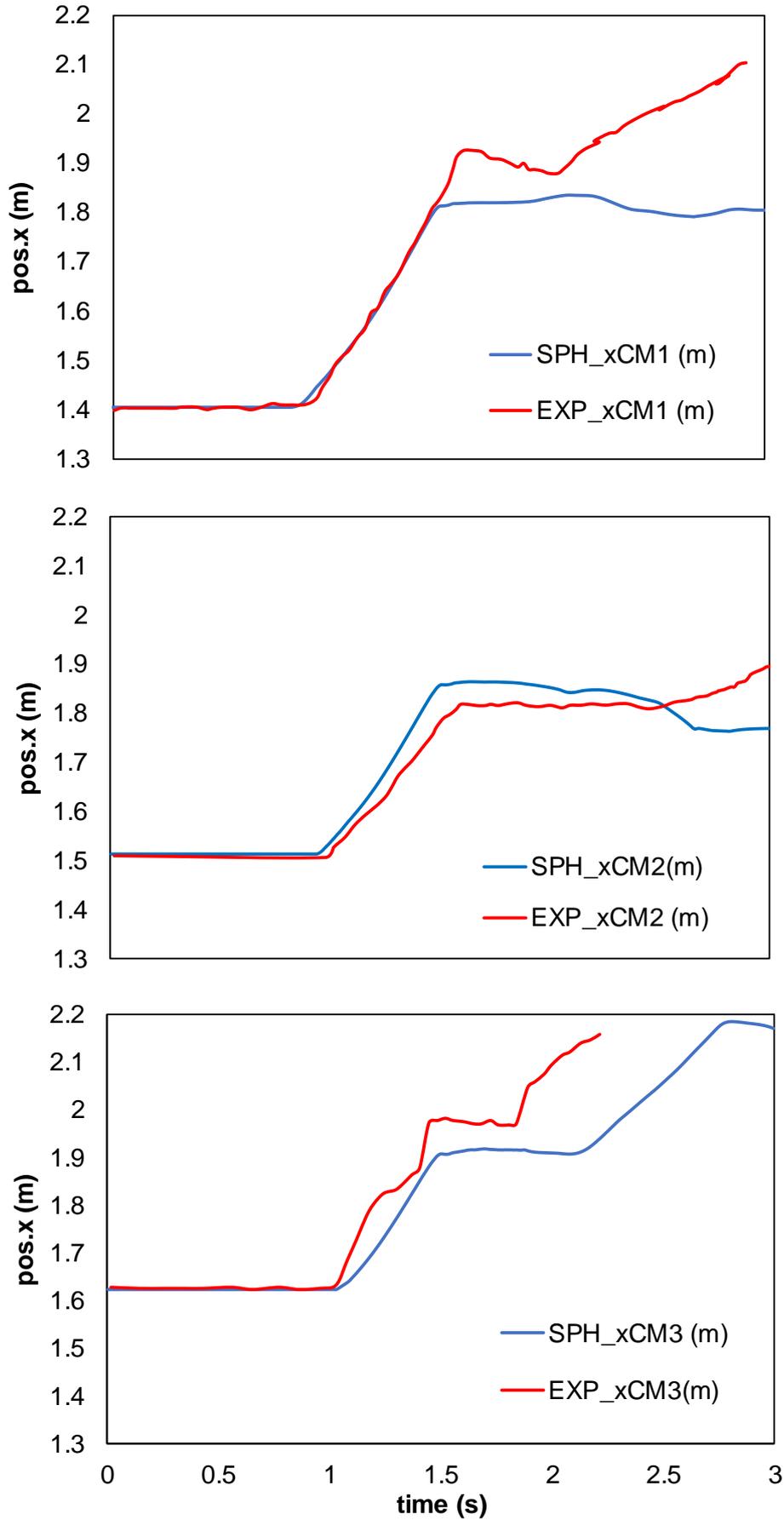
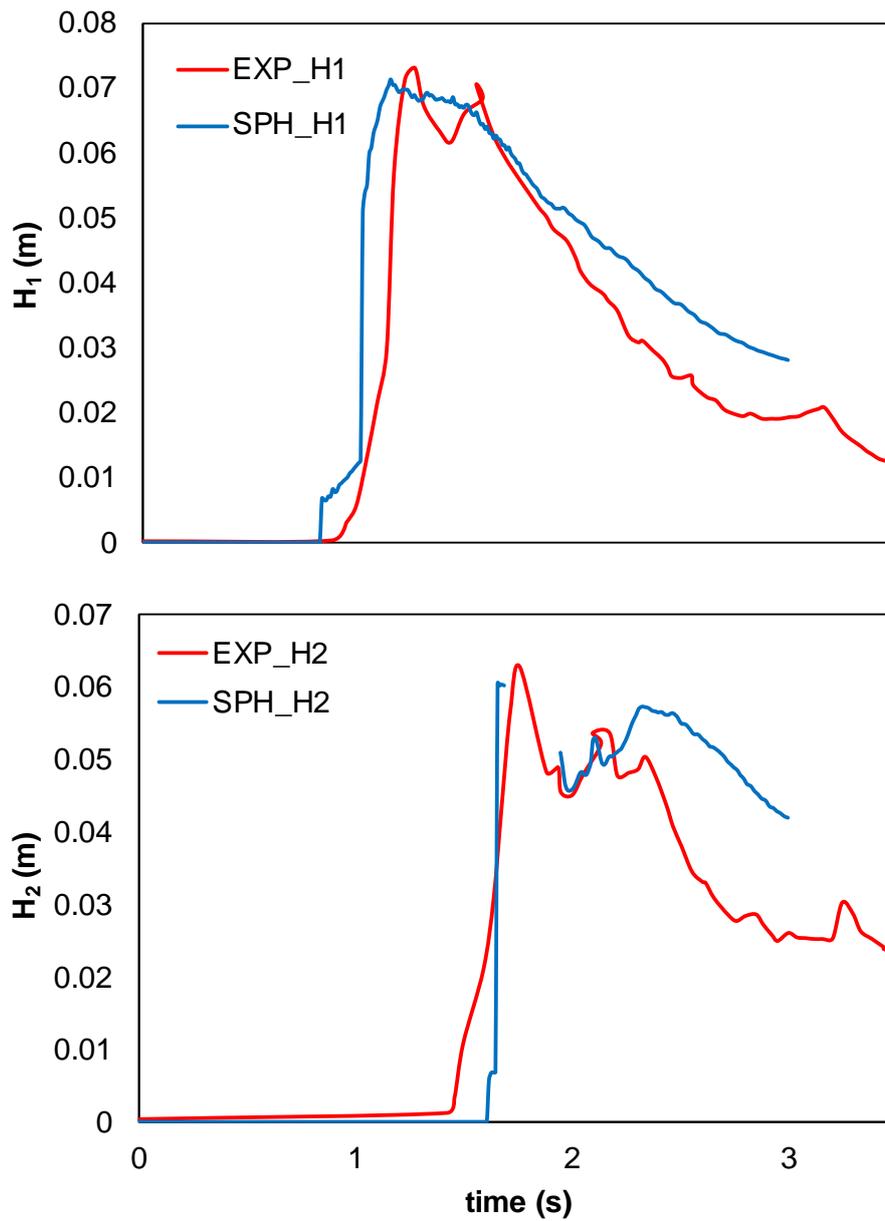


Figura 4.10. Serie temporal experimental y numérica de la posición X de las tres cajas.



**Figura 4.11.** Serie temporal experimental y numérica de la elevación de superficie de agua delante de los dos edificios.

En el siguiente capítulo, una vez que el modelo fue validado con experimentos, vamos a aplicar DualSPHysics a un caso realista simulando una inundación.

# **Capítulo 5. APLICACIÓN**



El lugar elegido para el caso de aplicación está en la ciudad de Lugo, en Galicia. Esta ciudad está bañada por el río Miño y es muy fácil que llegue a sufrir inundaciones debido a crecidas inesperadas del río cuando se producen períodos prolongados de precipitaciones. De hecho, el 19 de enero de 2013, el río Miño se desbordó ocasionando inundaciones en diferentes puntos de las orillas.

En la orilla Norte se encuentra el Hotel Balneario de Lugo – Termas Romanas (**Figura 5.1**) y una posible localización susceptible de ser inundada es el estacionamiento de esta instalación con los vehículos que se encuentren aparcados. De hecho, en las inundaciones del 19 de enero de 2013 el agua también llegó a este lugar, aunque la lámina de agua que se pudo observar dentro de este estacionamiento no supuso problemas muy graves. En la **Figura 5.2**, se puede ver una imagen satélite de Google Maps de la zona del estacionamiento y otra fotografía real de la zona.

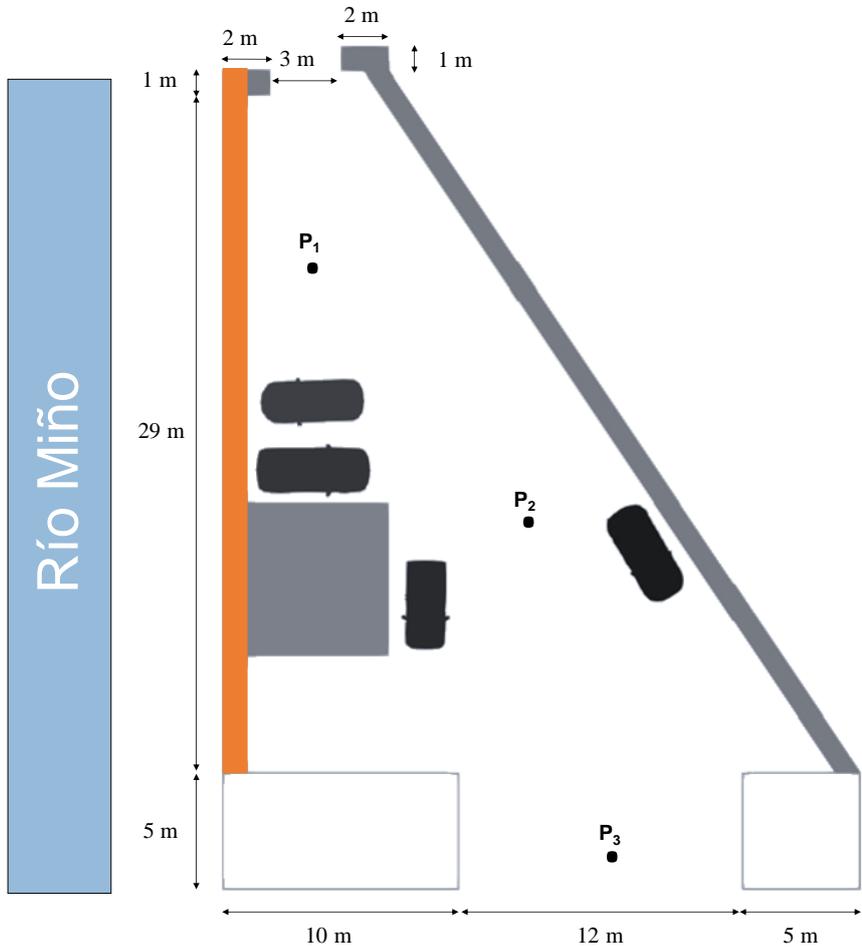
Usando Google Maps se pueden determinar las dimensiones reales del estacionamiento para crear el caso en DualSPHysics. De esta forma, se genera un dominio numérico del estacionamiento de 27 m de ancho y 35 m de largo con forma triangular y se incluyeron los modelos 3D de cuatro coches reales, tal y como se muestra en la **Figura 5.3**. El muro cercano al río tiene una altura estimada de 0.6 m (de color naranja en la **Figura 5.3**) y el muro de atrás tiene 1 m de alto.



**Figura 5.1.** Río Miño a su paso por la ciudad de Lugo. *Fuente:* Google Maps.



**Figura 5.2.** Izquierda: Fotografía satélite del estacionamiento del Balneario.  
 Derecha: Fotografía real del estacionamiento.  
 Fuente: Google Maps ( $43^{\circ} 00' 07.8'' N$   $7^{\circ} 33' 41.0'' W$ )



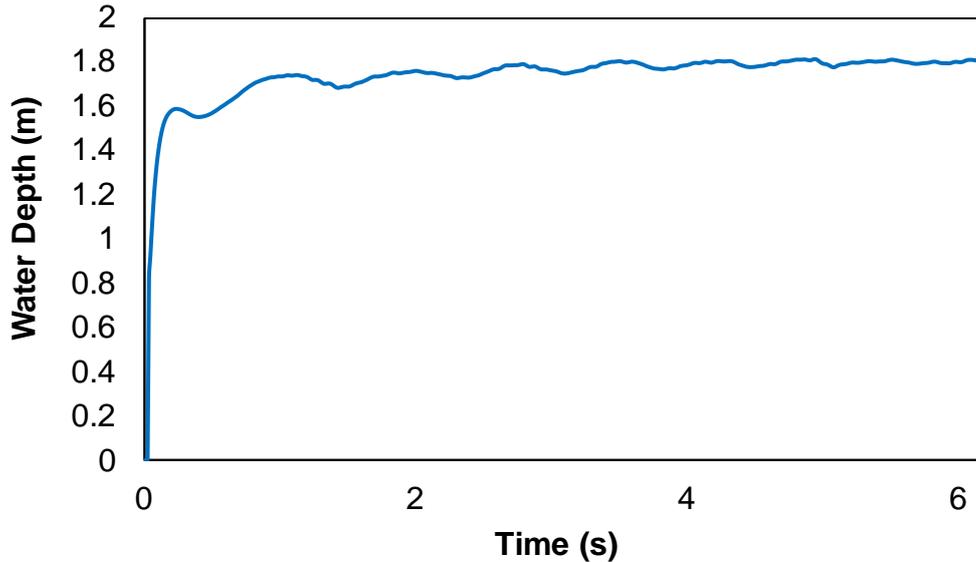
**Figura 5.3.** Medidas del dominio numérico que representa el estacionamiento.

Para determinar las condiciones de entrada del agua durante un hipotético evento de inundación extrema en esta zona, se usó otro modelo numérico llamado Iber. El modelo Iber permite simular grandes dominios con eficiencia, pero sin el detalle y la información que proporciona DualSPHysics (que sí resuelve la interacción con objetos rígidos flotantes y su arrastre). Por otro lado, simular dominios tan grandes con DualSPHysics es muy difícil puesto que el nivel de resolución necesario para obtener resultados fiables sería tan grande que la ejecución de la simulación sería inviable y duraría meses. Es por ello que Iber es una herramienta ideal para estudiar inundaciones en ríos considerando dominios de cientos de metros. Otros compañeros del grupo de investigación EPHYSLAB se encargaron de realizar la simulación con este programa asumiendo una situación hiperrealista en que la crecida del río fuese lo suficientemente grande como para inundar y provocar problemas en el estacionamiento. Para ello usaron un evento con un período de retorno de unos 100 años. La simulación de Iber indica que el mayor volumen del agua del río entraría por encima del muro (muro naranja en la **Figura 5.3**), que tiene una altura de unos 0.6 m respecto al suelo del estacionamiento. En la **Tabla 5.1** se indican los resultados obtenidos con Iber. Los valores de la tabla son los alcanzados una vez que la inundación se estabiliza dentro del estacionamiento y corresponden a la velocidad del agua y calado en un punto anterior al muro.

**Tabla 5.1.** Resultados de la simulación con Iber.

Velocidad el agua (m/s)	Calado (m)
1.6	1.75

Por lo tanto, los datos de salida de Iber se usarán para crear la condición de entrada del agua en DualSPHysics. El valor constante de calado obtenido con Iber a pie del muro fue de 1.75 m aproximadamente, y ésta es también la altura del volumen de agua que entra en la simulación realizada con DualSPHysics. En la **Figura 5.4**, se puede ver el calado del agua que está entrando en el dominio numérico que representa al estacionamiento en DualSPHysics, y que está en torno a 1.71-1.79 m (muy similar al valor obtenido con Iber).



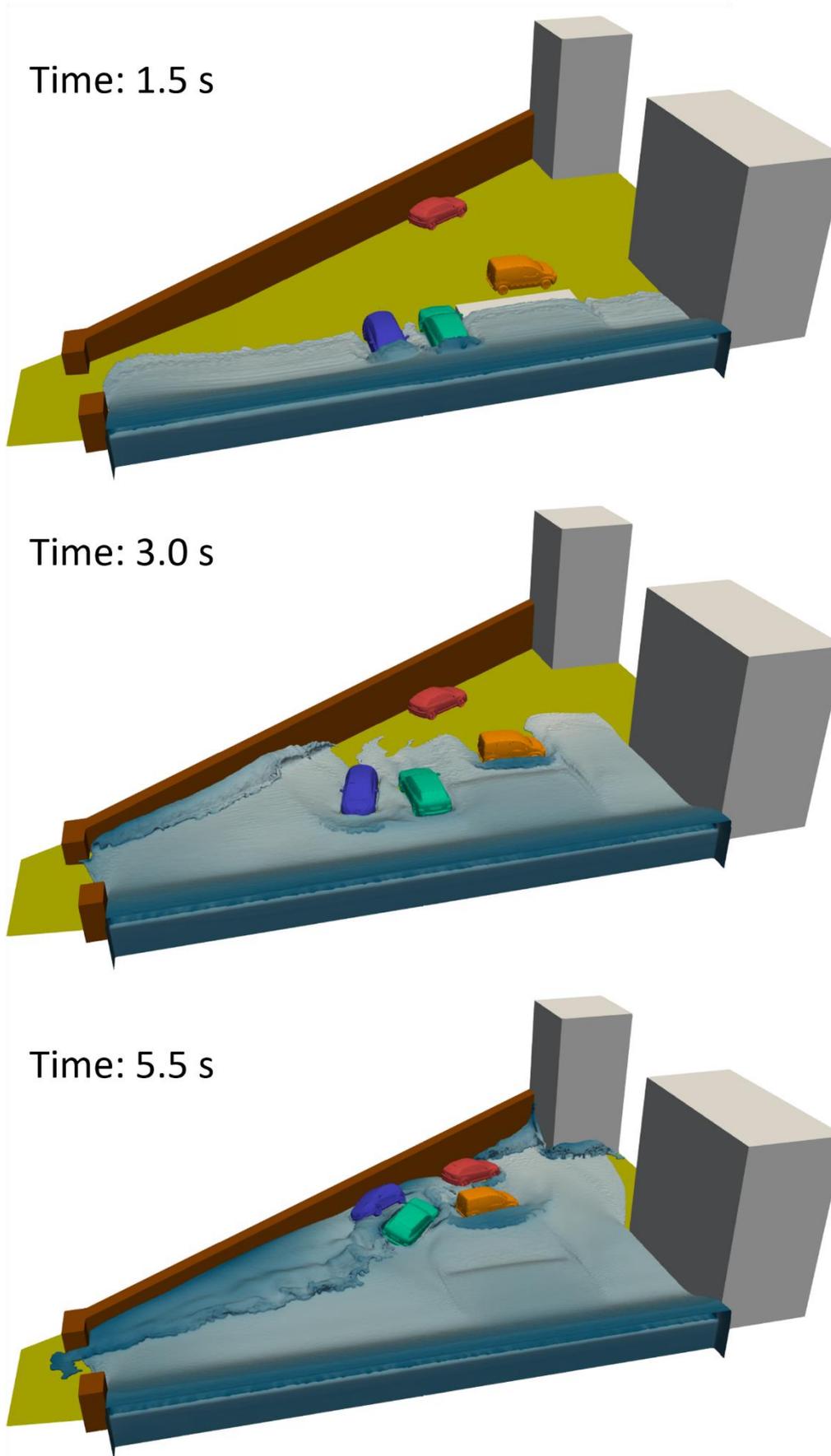
**Figura 5.4.** Altura de la capa de agua que entra en la simulación de DualSPHysics.

Además, como ya se dijo en el Capítulo 4, al utilizar la librería CHRONO, es necesario definir correctamente las propiedades de los materiales de los elementos sólidos: suelo del estacionamiento, muro, vehículos... Estos valores se pueden consultar en la **Tabla 5.2**. El material de los coches es un material definido por nosotros (“PROPIO”) porque éstos están creados como un solo objeto sin distinguir entre el caucho de los neumáticos (interacción con el suelo) y el tipo de acero de la carrocería de los coches (choques entre coches e impacto con los muros y edificios).

**Tabla 5.2.** Propiedades de los materiales empleados en DualSPHysics.

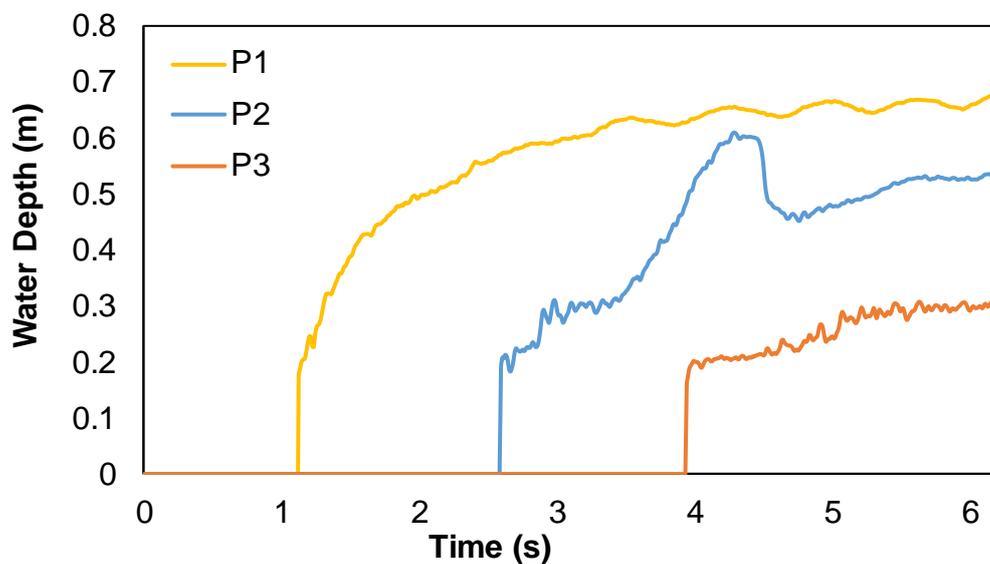
	Material	Módulo de Young (N/m <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson (-)	Coefficiente de Fricción (-)	Coefficiente de restitución (-)
Suelo	ASFALTO	2 x 10 <sup>9</sup>	0.3	0.7	0.9
Muros	CEMENTO	23 x 10 <sup>9</sup>	0.3	0.7	0.9
Edificios	CEMENTO	23 x 10 <sup>9</sup>	0.3	0.7	0.9
Coches	PROPIO	69 x 10 <sup>9</sup>	0.05	0.67	0.1

El resultado de la simulación se muestra en la **Figura 5.5**. En el instante inicial, los cuatro coches se encontraban inicialmente aparcados y en reposo. Una vez que el agua pasa por encima del muro, dos de los coches (azul y verde) son arrastrados, como se ve en los instantes 1.5 s y 3 s. El siguiente coche que va a ser arrastrado es el naranja (a partir del instante 3 s). Finalmente, todos los coches son arrastrados e impactan con el muro final. El agua, una vez que ha inundado todo el estacionamiento, sigue fluyendo hacia la entrada principal del balneario (entre los dos edificios).



**Figura 5.5.** Diferentes instantes de la simulación del caso de estudio real en Lugo con DualSPHysics.

Una vez realizada la simulación, se calculó la elevación de la superficie del agua en tres puntos del estacionamiento (marcados como P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> y P<sub>3</sub> en la **Figura 5.3**). El primer punto (P<sub>1</sub>), se encuentra cercano a la entrada de vehículos del estacionamiento, en donde hay cierta pendiente ascendente hacia la entrada del recinto. El segundo punto (P<sub>2</sub>) está, más o menos, en el centro del estacionamiento, y el tercer punto (P<sub>3</sub>) se estableció en la entrada al balneario, entre los dos edificios. En estos tres puntos se observó cómo varía la elevación de la capa de agua con el tiempo durante la inundación. Las series temporales se muestran en la **Figura 5.6**.



**Figura 5.6.** Calado del agua en tres puntos del estacionamiento.

Analizando la gráfica, se ve que P<sub>1</sub> es el primero de los tres a los que llega el agua, esto es lógico ya que es el punto más cercano al muro por donde entra el agua. El suelo en el punto P<sub>1</sub> tiene una altura de 0.2 m respecto al resto del dominio que está en  $z=0$ , por lo que el calado del agua en P<sub>1</sub> está corregido en la figura. El agua alcanza en segundo lugar el punto P<sub>2</sub>, el que está en el centro del estacionamiento. En este punto se registra un pico de elevación que se produce cuando el coche amarillo es arrastrado y el agua pasa por encima de él. Por último, el agua alcanza el tercer punto (P<sub>3</sub>) en donde el agua avanza hacia el espacio entre los dos edificios.

Esta simulación se ejecutó con un “dp” de 5 cm, dando lugar a 6,495,338 partículas, que se simularon para un tiempo físico de 10 s. El tiempo de ejecución fue de unas 140 horas (en una GPU Tesla K40).

# **Capítulo 6.**

# **CONCLUSIONES**



Cada vez se registra un mayor número de inundaciones, en gran parte, debidas al cambio climático y al calentamiento global de nuestro planeta. Estas inundaciones causan grandes desperfectos y numerosas muertes cada año, lo que conlleva a la búsqueda de alternativas para prevenirlas o estar preparados con anterioridad.

Una de las herramientas disponibles para estudiar estos problemas es el modelado numérico. En concreto se usó el modelo DualSPHysics, que permite simular de manera precisa la interacción del fluido con sólidos y también el choque entre éstos. Estos sólidos pueden ser aceras, pavimento, edificios, contenedores, coches u otros elementos del mobiliario urbano. En el caso de los sólidos es necesario definir ciertas propiedades físicas como el módulo de Young (de elasticidad), el coeficiente de Poisson, el de restitución y el de fricción.

Primero se validó DualSPHysics con datos de experimentos que consistían en el avance de un gran volumen de agua y el arrastre de objetos. Los resultados numéricos se compararon con datos de los experimentos (desplazamiento de cubos y cajas) y se observó una gran concordancia entre ellos, lo cual demuestra la capacidad de DualSPHysics para estudiar este tipo de problemas.

Una vez que DualSPHysics fue validado, se aplicó a un caso real en la ciudad gallega de Lugo. En este caso se inundó el estacionamiento del Balneario de la ciudad en donde la entrada de agua reproducía un evento de inundación provocada por la crecida del río Miño. DualSPHysics permitió definir los objetos como el suelo, muros, edificios y coches con sus propiedades físicas para resolver correctamente la interacción entre ellos y con el fluido. Se analizó el desplazamiento de los coches y la altura de la capa de agua que se alcanzaría dentro del estacionamiento.

Podemos concluir que la herramienta DualSPHysics puede ser utilizada para estudiar los efectos de una inundación urbana y así poder diseñar medidas para mitigar los daños. Los escenarios que se pueden simular con DualSPHysics no son muy extensos, pero la información sí es precisa; flujos, caudales, velocidades, arrastre de objetos.



## Bibliografía

Albano R, Sole A, Mirauda D, Adamowski J. 2016. Modelling large floating bodies in urban area flash-floods via Smoothed Particle Hydrodynamics model. *Journal of Hydrology*, 541, 344-358. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.02.009.

Altomare C, Crespo AJC, Rogers BD, Domínguez JM, Gironella X, Gómez-Gesteira M. 2014. Numerical modelling of armour block sea breakwater with Smoothed Particle Hydrodynamics. *Computers and Structures*, 130, 34-45. doi:10.1016/j.compstruc.2013.10.011.

Altomare C, Crespo AJC, Domínguez JM, Gómez-Gesteira M, Suzuki T, Verwaest T. 2015. Applicability of Smoothed Particle Hydrodynamics for estimation of sea wave impact on coastal structures. *Coastal Engineering* 96, 1-12.

Altomare C, Domínguez JM, Crespo AJC, González-Cao J, Suzuki T, Gómez-Gesteira M, Troch P. 2017. Long-crested wave generation and absorption for SPH-based DualSPHysics model. *Coastal Engineering*, 127, 37-54. doi:10.1016/j.coastaleng.2017.06.004.

Bladé E, Cea L, Corestein G, Escolano E, Puertas J, Vázquez-Cendón E, Dolz J and Coll A. 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1-10.

Canelas RB, Crespo AJC, Domínguez JM, Ferreira RML, Gómez-Gesteira M. 2016. SPH-DCDEM model for arbitrary geometries in free surface solid-fluid flows. *Computer Physics Communications*, 202, 131-140. doi:10.1016/j.cpc.2016.01.006.

Crespo AJC, Domínguez JM, Barreiro A, Gómez-Gesteira M, Rogers BD. 2011. GPUs, a new tool of acceleration in CFD: Efficiency and reliability on Smoothed Particle Hydrodynamics methods. *PLoS ONE*, 6(6), e20685. doi:10.1371/journal.pone.0020685.

Crespo AJC, Domínguez JM, Rogers BD, Gómez-Gesteira M, Longshaw S, Canelas RB, Vacondio R, Barreiro A, García-Feal O. 2015. DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications*, 187, 204-216.

Domínguez JM, Crespo AJC, Gómez-Gesteira M. 2013. Optimization strategies for CPU and GPU implementations of a smoothed particle hydrodynamics method. *Computer Physics Communications*, 184(3), 617-627. doi:10.1016/j.cpc.2012.10.015.

Hay JE, Easterling D, Ebi KL, Kitoh A, Parry M. 2016. Introduction to the special issue: Observed and projected changes in weather and climate extremes. *Weather and Climate Extremes*, 11, 1-3.

Liu GR. 2003. *Mesh Free methods: Moving beyond the finite element method*, CRC Press.

Monaghan JJ. 1992. Smoothed particle hydrodynamics. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 30, 543- 574.

Monaghan JJ. 2005. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Rep. Prog. Phys*, 68, 1703-1759.

Schoof JT, Robenson SM. 2016. Projecting changes in regional temperature and precipitation extremes in the United States. *Weather and Climate Extremes*, 11, 28-40.

Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor MMB, Nauels A, Xia Y, Allen SK, Boschung J, Bex V and Midgley PM. 2013. *Cambio Climático 2013: Bases Físicas*. IPCC.

Tasora A, Anitescu M. 2011. A matrix-free cone complementarity approach for solving large-scale, nonsmooth, rigid body dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 200(5–8), 439-453.



Environmental | Physics | Laboratory  
**EPhysLab**