

Modelos hidrodinámicos para reforzar las mejoras en las estimaciones del riesgo de inundaciones

Hydrodynamic modelling to support enhanced flood risk estimation



Roger A. Falconer

Presidente de la IAHR y director del Centro de Investigación Hidroambiental (HRC), Facultad de Ingeniería, Cardiff University, (Cardiff, UK)



Junqiang Xia

Profesor visitante de la Royal Academy of Engineering, HRC (UK) y profesor, State Key Laboratorio Estatal de Recursos hídricos e Ingeniería Hidroeléctrica, Wuhan University (China)

Resumen

En este artículo se presenta un nuevo enfoque sobre la evaluación de los riesgos de inundación a largo plazo, de acuerdo con el informe sobre predicciones de inundaciones de UK Foresight Future Flooding. Un modelo morfodinámico ha sido desarrollado para simular procesos como el tránsito de avenidas, el transporte de sedimentos y la evolución correspondiente de los cauces. El modelo se emplea un doble enfoque, con un planteamiento refinado del mojado y secado; usando dos formulas de la velocidad incipiente de vehículos inundados bajo distintos escenarios para comprobar la estabilidad de vehículos en avenidas; y un modelo numérico integrado ha sido desarrollado para predecir avenidas y los riesgos correspondientes a personas (niños y adultos) y de la propiedad (vehículos y edificios).

Palabras clave

Inundación, riesgo, modelización, Reino Unido, sedimentos, contaminación

Abstract

This paper presents a new approach to long-term flood risk assessment in accordance with the UK Foresight Future Flooding Report.

A morphodynamic model has been developed to simulate the processes of flood routing, sediment transport and corresponding bed evolution using a coupled approach, with a refined wetting and drying approach being used; two incipient velocity formulae for flooded vehicles under different scenarios were proposed for assessing stability criteria of vehicles in floodwaters; and an integrated numerical model was developed to predict the inundation of flash floods and the corresponding flood hazards to people (children and adults) and property (vehicles and buildings).

Keywords

Flood, risk, modelling, UK, sediment, pollution

1. Introducción

La investigación publicada en este documento apoya el enfoque integrado de la gestión del riesgo de inundación recomendado por el Informe sobre las Previsiones Futuras de Inundaciones en el Reino Unido. Este informe reconoce las limitaciones de los métodos actuales de evaluación de riesgos que analizan un caso particular en el tiempo y promueve un enfoque más dinámico para la comprensión de los cambios a largo plazo en el riesgo de inundaciones. En consecuencia, el Informe de Previsiones también promovió el desarrollo de un enfoque integrado de modelización de inundaciones para apoyar un análisis preciso de las acciones integradas a las respuestas de gestión de inundaciones. Una visión para conseguirlo se describe en FD2118 “Estudio de modelos de alcance de amplia escala” y se realizaron una serie de líneas

1. Introduction

The research reported herein supports the integrated approach to flood risk management recommended by the Foresight Future Flooding report in the U.K. This recognises the limitations of existing risk assessment methods that analyse a particular instance in time and promotes a more dynamic approach to understanding the long term changes in flood risk. Consequently, The Foresight Report also promoted the development of an integrated approach to flood modelling to support accurate analysis of integrated portfolios of flood management responses. A vision for achieving this was described in FD2118 “Broad Scale Modelling Scoping Study” and a series of research work packages were undertaken to provide a step towards this vision through case studies, linking model simulations to structural and non-structural responses to flood risk management in various U.K. catchments. Estimating the uncertainty associated with these predictions also forms part of these case studies,

de trabajo de investigación para acercarse hacia esta visión a través de estudios de ejemplos, que unen las simulaciones de modelos de respuestas estructurales y no estructurales para la gestión del riesgo de inundación en diversas cuencas del Reino Unido. La estimación de la incertidumbre asociada a estas predicciones también forma parte de estos estudios de casos, pero no se ha incluido. Este trabajo también refuerza la estrategia de modelos de riesgo de inundaciones de la Agencia Medioambiental del Reino Unido a través de la recopilación y suministro de datos para estudios de modelos de evaluación comparativa (*benchmarking*).

El paquete de Super Trabajo incluyó seis líneas de trabajo, de la WP1.1 a la WP1.6, con la investigación que se está llevando a cabo en el Centro de Investigación Hidroambiental, de la Universidad de Cardiff. Las siguientes secciones presentan el objetivo del estudio, la importancia de la investigación, una breve revisión de las referencias, el resumen de las conclusiones, las recomendaciones para la investigación y las conclusiones principales de la investigación.

2. Objetivo del estudio

Este proyecto de investigación se creó para desarrollar a partir de un modelo 2D existente para que permitiera la predicción de las fuerzas hidrodinámicas sobre obstáculos estáticos y móviles y desarrollar y validar un modelo 2D para la predicción de los sedimentos en suspensión y la contaminación por inundaciones. Su principal objetivo era llevar a cabo una extensión del modelo 2D para incluir el movimiento de residuos y sedimentos por las aguas. Las entregas del estudio contenían nuevos algoritmos, extensiones a aplicaciones comerciales, guía de aplicación y documentos publicados.

3. Importancia de la investigación

La investigación llevada a cabo en el actual proyecto abarcó tres aspectos de la gestión del riesgo de inundación, incluyendo: los métodos numéricos para la predicción de las rutas de inundación sobre lechos móviles, el criterio de estabilidad de los vehículos arrastrados, y el efecto de la construcción de presas en la inundación de las costas en el estuario del Severn. La importancia de este trabajo fue principalmente en los siguientes dos aspectos:

- Muchos de los modelos numéricos relativos a las inundaciones de rotura de presas se pueden encontrar en la literatura, y se han utilizado con éxito para predecir el grado de extensión de las inundaciones y las distribuciones de la velocidad. Sin embargo, la mayoría de estos modelos solo son aplicables a

but is not reported herein. This work also supports the U.K. Environment Agency's flood risk modelling strategy through the collation and provision of data for model benchmarking studies.

The Super Work Package included six work packages, from WP1.1 to WP1.6, with the research herein being undertaken in the Hydro-environmental Research Centre, at Cardiff University. The following sections present the study objective, the research importance, a brief literature review, summary of the findings, recommendations for further research and the key conclusions of the research.

2. Objective of Study

This research project was set to develop further an existing 2D model to enable the prediction of hydrodynamic forces on static and moveable obstructions and develop and validate a 2D model for the prediction of suspended sediment and pollution by floodwaters. Its main objective was to conduct an extension of 2D modelling to include the movement of debris and sediment by floodwaters. The deliverables from the study covered new algorithms, extensions to commercial applications, application guidance, and published papers.

3. Research Importance

The research conducted in the current project covered three aspects of flood risk management, including: the numerical methods for predicting flood routing over mobile beds, the stability criterion of flooded vehicles, and the effect of barrage construction on the coastal flooding in the Severn Estuary. The importance of this research was mainly in the following two aspects:

- *Many numerical models pertaining to dam-break floods can be found in the literature, and they have been successfully used to predict the flood inundation extent and velocity distributions. However, the majority of these models are only applicable to dam-break floods over fixed beds. In some catastrophic flood events, particularly those caused by dam or dike failures, flood flows have induced severe sediment movements in various forms: debris flows, mud flows, floating debris and sediment-laden currents. Due to the interaction between the sediment-laden flow and mobile bed, river channels, floodplains and other flood-prone areas undergo frequent morphological changes. For dam-break floods, the processes of flood wave propagation and associated bed evolution are usually very significant. In order to accurately predict these processes, it is necessary to develop a morphodynamic model using a sediment-water coupled approach to take into account the effects of bed level change and sediment contractions on the process of flood inundation.*

- *With a noticeable global change in the climatic and meteorological conditions in recent years, the risk of vehicles becoming unstable during*

inundaciones provocadas por la rotura de presa sobre lechos fijos. En algunos sucesos de inundaciones catastróficas, especialmente las causadas por fallos de diques o presas, las crecidas han provocado movimientos de sedimentos graves en diversas formas: flujos de escombros, flujos de lodo, escombros flotantes y corrientes cargadas de sedimentos. Debido a la interacción entre la corriente cargada de sedimentos y el lecho móvil, canales de ríos, llanuras inundables y otras áreas inundables sufren cambios morfológicos frecuentes. En el caso de las inundaciones por rotura de presa, los procesos de propagación de la onda de inundación y la evolución del lecho asociados suelen ser muy significativos. Con el fin de predecir con precisión estos procesos, es necesario desarrollar un modelo morfodinámico utilizando un enfoque conjunto sedimento-agua para tener en cuenta los efectos del cambio de nivel del lecho y las contracciones de sedimentos en el proceso de la inundación.

- Con un cambio global notable en las condiciones climáticas y meteorológicas de los últimos años, el riesgo de que los vehículos se vuelvan inestables durante las inundaciones urbanas se ha incrementado. En las zonas urbanas, los vehículos tienden a ser inestables por la pérdida de su resistencia (la inestabilidad de fricción) o por flotar en las inundaciones repentinas, que además conducen a diversos riesgos, incluidos los que causan lesiones o muerte a los pasajeros y transeúntes, daños en edificios e infraestructuras, e incluso la agudización de la inundación mediante el bloqueo de las estructuras hidráulicas locales, tales como puentes o alcantarillas. Por lo tanto, se ha considerado cada vez más necesario investigar las condiciones de estabilidad de los vehículos en las inundaciones, para desarrollar formulaciones apropiadas para los ingenieros para estimar tales condiciones.

4. Breve revisión de la literatura

4.1. Aspectos en algoritmos de 2D para los modelos de inundaciones

Para una inundación provocada por la rotura de un dique o una presa, o una repentina apertura de una compuerta en una cuenca de retención de inundaciones, se suele formar una onda de choque que luego se propaga hacia adelante en un lecho inicialmente seco. Los procesos de las rutas de inundación en lechos secos causados por los flujos de rotura de presas, por lo general, pueden ser simulados por los modelos hidrodinámicos de dos dimensiones (2D). Estudios sobre inundaciones basados en simulaciones 2D de modelos numéricos y experimentos de laboratorio para los flujos de rotura de presas son uno de los temas más estudiados en el campo de

urban flood events has increased. Vehicles in urban areas usually tend to be unstable by losing their resistance (frictional instability) or becoming buoyant (floating) in flash floods, which further leads to various hazards, including causing injuries or mortality to passengers and bystanders, damage to buildings and infrastructure, and even exacerbation of a flood event by blocking local hydraulic structures, such as bridges or culverts. Therefore, it has been increasingly deemed necessary to investigate vehicle stability conditions in floodwaters and to develop appropriate formulations for engineers to estimate such conditions.

4. Brief Literature Review

4.1. Aspect in 2D algorithms for flood inundation modelling

For a flood induced dyke failure or dam break event, or a sudden opening of a sluice gate in a flood detention basin, a shock wave usually forms and then propagates forward on an initially dry bed. The processes of flood routing on dry beds caused by dam-break flows can usually be simulated by two-dimensional (2D) hydrodynamic models. Flood inundation studies based on 2D numerical model simulations and laboratory experiments for dam-break flows are one of the most widely studied topics in the current computational hydrodynamics research field (Bellos et al., 1992; Fraccarollo and Toro, 1995; Bradford and Sanders, 2002; Lin et al., 2003; Zhou et al., 2004; Yoon and Kang, 2004; Liao et al., 2007; Soares-Fraza, 2007; Liang et al., 2007). In the literature, many numerical methods are available for simulating dam-break flows. Zhao et al. (1996) presented a detailed review of a range of numerical methods developed for simulating dam-break flows, based on solving the 2D shallow water equations (SWEs). Bradford and Sanders (2002) presented a robust procedure for modelling urban floods and applied it to simulate the movement of a wetting and drying wave front. Among these numerical methods the finite volume method (FVM) with a total variation diminishing (TVD) scheme is considered to be one of the most successful methods for simulating the propagation of shock waves (Sleigh et al., 1998; Bradford and Sanders, 2002; Zhou et al., 2004; Liao et al., 2007). In a FVM solver, the depth-integrated 2D SWEs are solved in each computational cell with mass and momentum being automatically conserved, even in the presence of a discontinuity for some flow parameters. The normal fluxes across the cell faces are often evaluated using an approximate Riemann solver, instead of an exact Riemann solver. Such a method is computationally more efficient, yet it is still able to accurately capture shock wave fronts. In addition, numerical oscillations that sometimes occur at the flood wave front, including a hydraulic jump, can be suppressed by introducing a suitable flux limiter.

4.2. Aspect in modelling flash flood routing over mobile beds

Earlier studies on flood routing were primarily based on analytical solutions for idealised conditions. With the advancement of computer technology and numerical solution methods of the shallow water equations, hydrodynamic models based on one-dimensional (1D)

la investigación computacional hidrodinámica actual (Bellos et al, 1992; Fraccarollo y Toro, 1995, Bradford y Sanders, 2002; Lin et al, 2003; Zhou et al, 2004; Yoon y Kang, 2004; Liao et al, 2007; Soares-Fraza, 2007; Liang et al, 2007). En la literatura, disponemos de muchos métodos numéricos para la simulación de flujos de rotura de presas. Zhao et al. (1996) presentan una revisión detallada de una serie de métodos numéricos desarrollados para simular los flujos de rotura de presas, en base a la resolución de las ecuaciones de aguas poco profundas en 2D (SWES). Bradford y Sanders (2002) presentaron un procedimiento sólido para el modelado de inundaciones urbanas y lo aplicaron para simular el movimiento de una onda de choque en condiciones secas y húmedas. Entre estos métodos numéricos el método de volúmenes finitos (FVM) con un esquema de variación total decreciente (TVD) se considera uno de los métodos más fructíferos para la simulación de la propagación de las ondas de choque (Sleigh et al, 1998; Bradford y Sanders, 2002, Zhou et al, 2004; Liao et al, 2007). En una solución FVM, los modelos SWEs de 2D integrados en profundidad se resuelven en cada celda computacional con la masa y el momento conservados de forma automática, incluso en la presencia de una discontinuidad para algunos parámetros de flujo. Los flujos normales a través de las paredes de las células se evalúan a menudo usando un método de Riemann aproximado, en lugar de un método exacto de Riemann. Este método es más eficiente, desde el punto de vista informático y además, todavía es capaz de capturar con precisión los frentes de ondas de choque. Además, las oscilaciones numéricas que a veces ocurren en el frente de la onda de inundación, incluyendo un salto hidráulico, se pueden suprimir mediante la introducción de un limitador de flujo adecuado.

4.2. Aspectos de los modelos de rutas de inundaciones relámpago en lechos móviles

Estudios anteriores sobre las rutas de inundación se basan principalmente en soluciones analíticas para condiciones ideales. Con el avance de la tecnología informática y los métodos de solución numérica de las ecuaciones de aguas poco profundas, los modelos hidrodinámicos basados en enfoques de dos dimensiones (2D) y de una dimensión (1D), cada vez se utilizan más para predecir los flujos de rotura de presas. Actualmente, las soluciones numéricas de las ecuaciones de aguas poco profundas son uno de los temas más activos en el campo de la investigación de la hidráulica. Varios modelos numéricos relativos a los flujos de rotura de presas se pueden encontrar en la literatura, y se han utilizado con éxito para predecir extensiones de las inundaciones y distribuciones de la velocidad. Sin embargo, la mayoría de estos modelos sólo son aplicables

and two-dimensional (2D) approaches are increasingly being used for predicting dam-break flows. Currently, numerical solutions of the shallow water equations type are one of the most active topics in the field of hydraulics research. Several numerical models pertaining to dam-break flows can be found in the literature, and they have been successfully used to predict flood inundation extent and velocity distributions. However, the majority of these models are only applicable to dam-break flows over fixed beds (Lin et al., 2003; Zhou et al., 2004; Liang et al., 2007). In some catastrophic flood events, particularly those caused by dam or dike failures, flood flows have induced severe sediment movements in various forms: debris flows, mud flows, floating debris and sediment-laden currents (Costa et al., 1988). Capart et al. (2001) pointed out that in some extreme cases, the volume of entrained material could reach the same order of magnitude as the volume of water initially released from the failed dam. It is thus often necessary to account for the process of morphological changes when simulating such severe dam-break flows. Currently, two approaches are often used to simulate the morphodynamic processes: uncoupled and coupled solutions (Zhang and Xie 1993). In order to model the morphodynamic processes caused by dam-break flows, the second method may be more acceptable. This is due to the rate of bed evolution often being comparable to the rate of water depth variation. Early numerical models for simulating dam-break flows over mobile beds often adopted uncoupled solutions that did not account for the effects of sediment transport and bed deformation on the movement of flow (Ferreira and Leal 1998; Fraccarollo and Armanini 1998; Fagherazzi and Sun 2003).

Although many 2D dam-break flow models over non-mobile, or fixed, beds have been developed over the past decade (Lin et al., 2003; Liao et al., 2007; Zhou et al. 2004; Liang et al., 2007; Begnudelli and Sanders, 2007; Gallegos et al., 2009; Fraccarollo and Toro 1995; Zhao et al. 1996), 2D models for dam-break flows over mobile beds using the coupled solution are seldom reported due to the complexity of flow-sediment transport and bed evolution. Simpson and Castelltort (2006) extended an existing 1D coupled model of Cao et al. (2004) to a 2D model for the free surface flow, sediment transport and morphological evolution. This model used a Godunov-type method with a first-order approximate Riemann solver, and was verified by comparing the computed results with the documented solutions. As commented by Cao (2007), the first-order numerical scheme in solving the governing equations may have limitations in modelling water levels and sediment concentrations with gradient discontinuities. The model was applied to test cases with some idealized flat bed channels, without the need to consider the wetting and drying fronts. Therefore, it is necessary to develop a morphodynamic model for simulating dam-break flows over mobile beds with more advanced solution schemes and wider applicability.

a los flujos de rotura de presas sobre lechos fijos (Lin et al, 2003; Zhou et al, 2004; Liang et al, 2007). En algunos casos de inundaciones catastróficas, especialmente las causadas por fallos de presas o diques, las crecidas han provocado movimientos de sedimentos graves en diversas formas: flujos de escombros, flujos de lodo, escombros flotantes y corrientes cargadas de sedimentos (Costa et al, 1988). Capart et al. (2001) señalaron que, en algunos casos extremos, el volumen de material arrastrado podría alcanzar el mismo orden de magnitud que el volumen de agua inicialmente liberado de la presa rota. Por tanto, es a menudo necesario considerarlo para explicar el proceso de cambios morfológicos en la simulación estos flujos en roturas importantes de presas. Actualmente, a menudo se utilizan dos enfoques para simular los procesos morfodinámicos: soluciones separadas y conjuntas (Zhang y Xie, 1993). Para modelar los procesos morfodinámicos causados por los flujos de rotura de presas, el segundo método puede ser más aceptable. Esto es debido a que la tasa de evolución del lecho puede ser comparable a la tasa de variación de la profundidad del agua. Los primeros modelos numéricos para la simulación de flujos de rotura de presas sobre lechos móviles a menudo adoptaron soluciones conjuntas que no tuvieron en cuenta los efectos del transporte de sedimentos y la deformación del lecho en la circulación de flujo (Ferreira y Leal, 1998; Fraccarollo y Armanini, 1998; Fagherazzi y Sun, 2003).

Aunque se han desarrollado muchos modelos 2D de flujo de rotura de presas en lechos no-móviles o fijos, en la última década (Lin et al, 2003; Liao et al, 2007; Zhou et al 2004; Liang et al, 2007; Begnudelli y Sanders, 2007; Gallegos et al, 2009; Fraccarollo y Toro 1995; Zhao et al 1996), apenas se ha informado sobre modelos 2D para flujos de rotura de presas sobre lechos móviles utilizando la solución conjunta, debido a la complejidad de transporte de flujo de sedimentos y evolución del lecho. Simpson y Castelltort (2006) extendieron el modelo acoplado 1D existente de Cao et al. (2004) para un modelo 2D para el flujo de superficie libre, transporte de sedimentos y la evolución morfológica. Este modelo utiliza un método de tipo Godunov con un solver aproximado de primer orden de Riemann, y se verificó mediante la comparación de los resultados calculados con las soluciones documentadas. Como se ha comentado por Cao (2007), el esquema numérico de primer orden en la solución de las ecuaciones de gobierno puede tener limitaciones en el modelado de los niveles de agua y las concentraciones de sedimentos con discontinuidades de gradiente. Se aplicó el modelo para probarlo en casos con algunos canales idealizados con lecho plano, sin la necesidad de considerar la humedad o la sequedad del mismo. Por lo tan-

4.3. Aspect in the safety criteria of people and property in floodwaters

4.3.1. Assessment method for people safety

The risk or personal danger to people caused by a flood varies both in time and place across a flood-prone area, and also changes with different body shapes and weights. The variation in the hazard degree for people in floodwaters needs to be understood by managers for urban floods. Therefore, it is important to assess the degree of people stability in floodwaters. Previous studies on the assessment method of people safety have been carried using two different approaches: (i) based on empirical or semi-quantitative criteria (NSWG, 2005; Penning-Rowse et al., 2005; Defra and EA, 2006; Ishigaki et al., 2005, 2008), and (ii) based on formulae derived from mechanical principles, i.e. balance of forces, linked with experiments (Foster and Cox, 1973; Abt et al., 1989; Keller and Mitsch, 1992; Karvonen et al., 2000; Lind et al., 2004; Jonkman and Penning-Rowse, 2008).

Empirical or semi-quantitative criteria were usually adopted to evaluate the degree of hazard to people by organisations of flood management or related departments of a government. Defra and the EA (2006) reported a simple method to determine the rating of flood hazard based on flow velocity, depth and the presence of debris. Formulae derived from a more mechanics-based experimental approach were obtained from studies by Abt et al. (1989) and Karvonen et al. (2000). Abt et al. (1989) reported experiments of human stability on one concrete monolith and 20 healthy, lightly dressed human subjects walking and standing in water of various depths. Karvonen et al. (2000) conducted further tests on people stability in the Rescdam project, in which seven people, age ranging from 17 to 60 year old, were involved. Both these studies proposed a critical depth-velocity product, indicating that the combination of a certain depth and a corresponding velocity would lead to human instability. The empirical formula obtained is expressed as $hU_c = f(m_p, h_p)$, where h is the depth of the incoming flow; U_c is the critical velocity for reaching human instability; and $f(m_p, h_p)$ is an empirical function related to the height (h_p) and mass (m_p) of a person.

The studies on people safety in floodwaters by Foster and Cox (1973), Keller and Mitsch (1993), and Takahashi et al. (1992) adopted alternative criteria for people stability, and major differences between these studies in the methodologies used for developing the criteria exist (Cox and Ball, 2001). Foster and Cox (1973) based their criteria on physical tests in a laboratory flume, and presented the safe and unsafe flow conditions for standing children. Keller and Mitsch (1993) established a force balance equation for a person standing on a flooded street against sliding, linking the buoyant force, weight, frictional resistance and drag force due to flowing water. The formula is given by $U_c = \sqrt{2F_r / (\rho_f C_d A)}$, where F_r is the restoring force due to the friction and A is the submerged area projected normal to the flow.

to, es necesario desarrollar un modelo de simulación de flujos morfodinámicos de rotura de presas sobre lechos móviles con soluciones de sistemas más avanzados y mayor aplicabilidad.

4.3. Aspectos de los criterios de seguridad de las personas y propiedades en las inundaciones

4.3.1. Método de evaluación de la seguridad de las personas

El riesgo para las personas a causa de una inundación varía en el tiempo y lugar en una zona propensa a las inundaciones, así como también cambia en diferentes formas y gravedad. La variación en el grado de peligro para las personas en zonas inundables tiene que ser considerado por los gestores de inundaciones urbanas. Por lo tanto, es importante para evaluar el grado de estabilidad de las personas en las inundaciones. Estudios anteriores sobre el método de evaluación de la seguridad de las personas se han realizado usando dos enfoques diferentes: (i) basado en criterios empíricos o semi-cuantitativos (GTNPI, 2005; Penning-Rowse et al, 2005; Defra y EA, 2006; Ishigaki et al, 2005, 2008), y (ii) basados en fórmulas derivadas de los principios mecánicos, es decir, el equilibrio de fuerzas, vinculadas con los experimentos (Foster y Cox, 1973; Abt et al, 1989; Keller y Mitsch, 1992; Karvonen et al, 2000; Lind et al, 2004; Jonkman y Penning-Rowse, 2008).

Criterios empíricos o semi-cuantitativos fueron generalmente adoptados para evaluar el grado de peligro para las personas por parte de las organizaciones de gestión de inundaciones o departamentos del gobierno. Defra y la EA (2006) informaron de un método simple para determinar la calificación de riesgo de inundación basado en la velocidad de flujo, la profundidad y la presencia de restos. Fórmulas derivadas de un enfoque más experimental basado en la mecánica se obtuvieron de estudios por Abt et al. (1989) y Karvonen et al. (2000). Abt et al. (1989) informaron de experimentos de estabilidad humana en un monolito de hormigón y 20 sujetos humanos sanos, y ligeramente vestidos caminando y parados en el agua a diferentes profundidades. Karvonen et al. (2000) llevaron a cabo pruebas adicionales en la estabilidad de las personas en el proyecto Rescdam, en el cual siete personas de edad, de 17 a 60 años, estaban involucradas. Ambos estudios proponen un producto crítico profundidad-velocidad, indicando que la combinación de una cierta profundidad y una velocidad determinada conduciría a la inestabilidad humana. La fórmula empírica obtenida se expresa como $hU_c = f(m_p, h_p)$, donde h es la profundidad del flujo entrante; U_c es la velocidad crítica para alcanzar la inestabilidad humana; y $f(m_p, h_p)$ es una función empírica relacionada con la altura (h_p) y la masa (m_p) de una persona.

This criterion of people stability (Keller and Mitsch, 1993) was based on a computational analysis of potential flow conditions, rather than on any laboratory experiments.

4.3.2. Assessment method for vehicle safety

Existing studies on the stability criteria of vehicles in floodwaters are limited. Gordon and Stone (1973) investigated the stability of a Morris Mini car with the two back wheels being locked to prevent any movement. The vehicle stability condition was obtained when the horizontal force was just balanced by the product of the measured vertical reaction force and the coefficient of friction. In this approach it was important to estimate the appropriate value of the friction coefficient for sliding. Bohham and Hattersley (1967) suggested a sliding friction value of 0.3, while Gordon and Stone (1973) indicated that the friction coefficient ranges from 0.3 to 1.0. Keller and Mitsch (1993) conducted a theoretical investigation into the stability conditions for idealised cars, and developed a simple method for estimating the forces exerted on a stationary vehicle in floodwaters and an incipient velocity formula for a partially submerged vehicle.

In the latest report by AR&R (Shand et al., 2010), existing guidelines and recommendations for the limits of vehicle stability were compared with experimental and analytical results, with a marked difference being obtained between these two sets of results. Therefore, interim criteria for stationary vehicle stability were proposed for three vehicle classes, including small passenger and large passenger vehicles, as well as 4WD (four wheel drive) vehicles.

4.3.3. Estimation of flood risk to buildings

Buildings are potential places of refuge during floods and are frequently used by people in flood-prone areas. A partial or complete failure of buildings in which people might shelter to provide safe refuge is consequently a significant factor in determining the potential number of deaths resulting from flooding in extreme circumstances (Defra and EA, 2006). Buildings can collapse because of water pressure, scour of foundations, or a combination of these events. In addition, debris carried by a flood in the form of trees, boulders or vehicles, can cause severe damage to buildings. Kelman and Spence (2004) presented an overview of flood characteristics with respect to their applicability for estimating and analysing direct flood damage to buildings. Flood actions on buildings include: hydrostatic actions, hydrodynamic actions, and erosion actions, etc. However, the main flood actions are the depth difference between water levels outside and inside a building and the velocity near the building walls. Kelman (2002) proposed matrices for damage to buildings based on the maximum flood depth difference and the maximum flood velocity. Five potential levels of damage were assigned to different combinations of depth differences and velocities, from minor water contact and infiltration to irreparable structural damage. However,

Los estudios sobre la seguridad de las personas en las aguas de Foster y Cox (1973), Keller y Mitsch (1993), y Takahashi et al. (1992) adoptaron criterios alternativos para la estabilidad de las personas, y existen grandes diferencias entre estos estudios en las metodologías utilizadas para el desarrollo (Cox y Bolas, 2001). Foster y Cox (1973) basan su criterio en las pruebas físicas en un canal de laboratorio, y presentan las condiciones de circulación seguras e inseguras para los niños de pie. Keller y Mitsch (1993) establecieron una ecuación de equilibrio de fuerzas para una persona de pie en una calle inundada contra el deslizamiento, que une la fuerza de flotación, peso, resistencia a la fricción y la fuerza de arrastre debida a la corriente de agua. La fórmula está dada por $U_c = \sqrt{2F_r / (\rho_f C_d A)}$, donde F_r es la fuerza de recuperación debida a la fricción y A es el área sumergida proyectada perpendicularmente a la corriente. Este criterio de estabilidad de las personas (Keller y Mitsch, 1993) se basó en un análisis computacional de las condiciones de flujo potenciales, en lugar de hacerlo con algún experimento de laboratorio.

4.3.2. Método de evaluación de la seguridad de los vehículos

Los estudios existentes sobre los criterios de estabilidad de los vehículos en las aguas son limitados. Gordon y Stone (1973) investigaron la estabilidad de un coche Mini Morris con las dos ruedas traseras bloqueadas para evitar cualquier movimiento. La condición de estabilidad del vehículo se obtuvo cuando la fuerza horizontal se equilibraba con el producto de la fuerza de reacción vertical medida y el coeficiente de fricción. Este enfoque era importante para estimar el valor adecuado del coeficiente de rozamiento por deslizamiento. Bohham y Hattersley (1967) sugirieron un valor de fricción de deslizamiento de 0,3, mientras que Gordon y Stone (1973) indicaron que el coeficiente de fricción podía variar entre 0,3 y 1,0. Keller y Mitsch (1993) llevaron a cabo una investigación teórica en las condiciones de estabilidad para los coches idealizados, y desarrollaron un método simple para estimar las fuerzas ejercidas sobre un vehículo estacionado en medio de una inundación y la fórmula de la velocidad inicial para un vehículo parcialmente sumergido.

En el último informe de AR & R (Shand et al., 2010), las directrices y recomendaciones existentes para los límites de estabilidad del vehículo se compararon con los resultados experimentales y analíticos, con una marcada diferencia entre estos dos conjuntos de resultados. Por lo tanto, se propusieron criterios provisionales para la estabilidad del vehículo parado para tres clases de vehículos, los pequeños y grandes vehículos de pasajeros, así como para los vehículos 4x4.

such complex matrices for damage to buildings are not necessary in the initial assessment of flood risk.

Therefore, a simplified assessment matrix for the flood risk to buildings was presented by Defra and EA (2006). This matrix adopted an average of hazard scale for each building type in each combination of depth difference and velocity (Kelman, 2002). The assessment matrix can also be approximately expressed by regression into a simple formula: $HD = 0.7U^{0.14}\Delta h^{0.34}$, where U = velocity near the building walls; Δh = depth difference between water levels outside and inside a building; and HD = hazard degree of the building in floodwaters. The hazard degrees have been grouped into three damage categories, including some damage ($HD \leq 0.5$), severe damage ($0.5 < HD < 0.98$) and irreparable damage ($HD \geq 0.98$). It should be pointed out that such a matrix is an indicative assessment of the damage that would occur to buildings in urban areas, and it can not include the effect of different types of building. However, it is often accepted for a preliminary assessment of flood risk in local organisations such as Environment Agency.

5. Summary of Findings

5.1. 2D Hydrodynamic Model for Predicting Rapid Flood Flows on Initially Dry Beds

Significant refinements have been made to a two-dimensional hydrodynamic model, based on a TVD finite volume method, to predict rapid flood flows on initially dry beds. A Roe's approximate Riemann solver, with the MUSCL scheme, has been used in this model. The scheme is second-order accurate in both time and space and is free from spurious oscillations. The model deploys unstructured triangular grids and adopts a refined wetting and drying approach originally developed for a regular grid finite difference model, DIVAST. This approach can be summarised as follows:

(1) Firstly, each cell is checked at the start of each time step to decide its type. In this method, the computational cells are divided into three types. A cell is considered to be active and wet if the water depth at the cell centre h_i is greater than a small value of water depth, h_{min} . A cell is considered dry with its velocity being set to zero, if h_i is less than h_{min} . Further, a dry cell can be classified as an inactive dry one if all of the three surrounding cells are dry, and as an active dry cell if one of the three surrounding cells is wet. The inactive dry cells will be removed temporarily out of the computational domain, and this treatment can accordingly decrease the computer time in the case of lots of inactive dry cells.

(2) Then, each wet cell or active dry cell is checked after each time step for possible drying. If the predicted depth at the end of each time level h_i becomes less than h_{min} , then this cell is set as a dry cell. In addition, the cell i is also treated as a dry cell, even if h_i is greater than h_{min} but the maximum water depth $Max(h)$ of the three surrounding cells, around the

4.3.3. Estimación del riesgo de inundación de edificios

Los edificios son posibles lugares de refugio durante las inundaciones, y se utilizan con frecuencia por los habitantes de las zonas propensas a inundaciones. Un fallo parcial o total de los edificios en los que las personas se refugian en busca de cobijo, puede ser un factor importante para determinar el número potencial de muertes a causa de las inundaciones en circunstancias extremas (Defra y EA, 2006). Los edificios pueden colapsar debido a la presión del agua, socavación de los cimientos, o una combinación de estos dos. Además, los restos de elementos transportados por una inundación en forma de árboles, rocas y vehículos, pueden causar graves daños a los edificios. Kelman y Spence (2004) presentan una visión general de las características de inundación con respecto a su aplicabilidad para la estimación y análisis de daño directo a los edificios de inundación. Las acciones de inundación en los edificios son: acciones hidrostáticas, acciones hidrodinámicas y acciones de erosión, etc. Sin embargo, las principales acciones de las inundaciones son la diferencia de profundidad entre los niveles de agua dentro y fuera de un edificio y la velocidad cerca de las paredes del edificio. Kelman (2002) propuso matrices de los daños a los edificios en base a la diferencia de profundidad de inundación máxima y la velocidad máxima de inundación. Cinco niveles potenciales de daños fueron asignados a diferentes combinaciones de las diferencias y las velocidades de profundidad, desde una infiltración y contacto con el agua muy bajo hasta daños estructurales irreparables. Sin embargo, estas matrices complejas para los daños a los edificios no son necesarias en la evaluación inicial de los riesgos de inundación.

Una matriz de evaluación simplificada para el riesgo de inundación a los edificios fue presentada por Defra y EA (2006). Esta matriz adoptó un promedio de la escala de riesgo para cada tipología de edificio y para cada combinación de diferencia de profundidad y velocidad (Kelman, 2002). La matriz de evaluación puede también ser expresada aproximadamente por regresión en una fórmula simple: $HD = 0.7U^{0.14}\Delta h^{0.34}$, donde U = velocidad cerca de las paredes del edificio; Δh = diferencia de profundidad entre niveles de agua, dentro y fuera del edificio y HD = grado de riesgo del edificio en inundaciones. Los grados de riesgo se han agrupado en tres categorías de daños, incluyendo algún daño ($HD \leq 0.5$), daños graves ($0.5 < HD < 0.98$) y daños irreparables ($HD \geq 0.98$). Cabe señalar que una matriz semejante es indicativa de una evaluación de los daños que se producirían a los edificios en las zonas urbanas, y no puede incluir el efecto de diferentes tipos de construcción. Sin embargo, a menudo se acepta

cell i , is less than h_{set} . Here h_{set} is a preset small water depth, typically of a value of 2 - 2.5 h_{min} . However, the water elevation retained at this dry cell is set to the value at the previous timestep when the cell was still wet. (3) Finally, each inactive dry cell from step (1) is checked after each time step for possible wetting. An inactive dry cell i is considered as being flooded and to be an active dry cell if the water level at a neighbouring wet cell j around the dry cell is greater than both the bed elevation at the centre of cell i and the midpoint bed elevation of the common edge of cells i and j . An active dry cell will be returned to the computational domain at the start of the next time step. Outflow of flow flux is not permitted from an active dry cell, and the active dry cell can be re-introduced into a wet one only if one of the surrounding cells is wet, provided that the flow flux entering this dry cell is large enough.

The model has been applied to several cases, including the Glasgow flood in the UK and a flood event in the Yellow River in China. Numerical model tests were undertaken to investigate the sensitivity of model predictions to the value of a minimum depth as required for treating the wetting and drying fronts. It has been found that the selection of the minimum water depth has a significant impact on the speed of the flood wave propagation on an initially dry bed. For a given time step, an excessively large value of the minimum water depth will lead to inaccurate predictions of the wetting and drying wave fronts, but a very small value will result in numerical instability (Fig. 1).

5.2. Modelling Dam-break Flows over Mobile Beds using a 2D Coupled Approach

Dam-break flows usually propagate along rivers and floodplains, where the processes of fluid flow, sediment transport and morphological changes are closely linked. However, the majority of existing 2D models used for simulating dam-break flows are only applicable to a fixed bed. The hydrodynamic model described above has been extended to include sediment transport and bed level changes to enable the prediction of dam-break flows over mobile beds. In this model modified 2D shallow water equations are used to account for the effects of sediment concentration and bed evolution on flood wave propagation, with the non-equilibrium transport equation for graded sediments being used to represent the sediment transport processes. In addition, the model can take account of the adjustment process of bed material composition during the morphological evolution process. The sediment transport equation is solved in a semi-implicit manner. The predictor-corrector scheme is used in time stepping, leading to a second-order accurate solution in both time and space.

(1) Governing equations for flow and sediment transport

The hydrodynamic governing equations used are based on the two-dimensional shallow water equations, but with additional terms being included to account for the sediment effects on the fluid density and

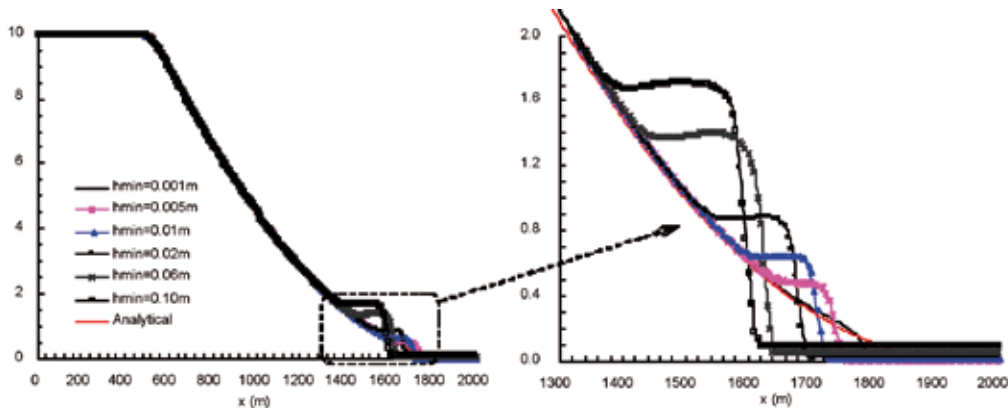


Fig. 1. Perfiles de profundidad del agua a lo largo del canal en diferentes profundidades mínimas / Water depth profiles along the channel under different minimum depths

para una evaluación preliminar del riesgo de inundación en las organizaciones locales, tales como la Agencia de Medio Ambiente.

5. Resumen de los resultados

5.1. Modelo hidrodinámico en 2D para predecir los flujos rápidos de inundaciones en lechos inicialmente secos

Mejoras significativas se han hecho a un modelo hidrodinámico bidimensional, basado en un método de volúmenes finitos TVD, para predecir las crecidas rápidas de lechos inicialmente secos. En este modelo se ha utilizado una solución aproximada de Riemann hecha por Roe, con el sistema MUSCL. El sistema es de segundo orden exacto tanto en el tiempo y el espacio y está libre de oscilaciones espurias. El modelo implementa rejillas triangulares no estructuradas y adopta una aproximación a las condiciones secas y húmedas desarrollada originalmente para un modelo de diferencias finitas de malla regular, DIVAST. Este enfoque se puede resumir de la siguiente manera:

(1) En primer lugar, cada celda está marcada en el inicio de cada paso de tiempo para decidir su tipología. En este método, las celdas computacionales se dividen en tres tipos. Una celda se considera que es activa y húmeda si la profundidad del agua en el centro de la celda h_i es mayor que un valor pequeño de la profundidad de agua, h_{min} . Una celda se considera seca con su velocidad ajustada a cero, si h_i es menor que h_{min} . Además, una celda seca puede ser clasificada como seca inactiva si las tres celdas circundantes están secas, y como una celda seca activa si una de las tres células circundantes está mojada. Las celdas secas inactivas serán retiradas temporalmente del modelo computacional, y este tratamiento en consecuencia puede reducir el tiempo de ordenador en el caso de muchas celdas secas inactivas.

(2) A continuación, cada celda húmeda o celda seca activa es comprobada después de cada paso de tiempo para un posible secado. Si la profundidad prevista en el extremo de cada nivel de tiempo h_i es menor que h_{min} , entonces esta celda se considera celda seca. Además, la celda i también es considerada como seca, aunque h_i sea mayor que h_{min} pero la profundidad máxima de agua $Max(h_i)$ de las tres celdas circundantes i ,

bed level change. The shallow water governing equations of the 2D hydrodynamic model comprise the mass and momentum conservation equations for the water-sediment mixture flow. The modified continuity and momentum equations in the x and y directions can be expressed in detail as follows:

(1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(h) + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = -\frac{\partial Z_b}{\partial t}$$

(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{bx} - S_{fx}) + hv(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) - \frac{\Delta\rho gh^2}{2\rho_m \rho_s} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_m} \frac{u \partial Z_b}{\partial t}$$

(3)

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2) = gh(S_{by} - S_{fy}) + hu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) - \frac{\Delta\rho gh^2}{2\rho_m \rho_s} \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_m} \frac{v \partial Z_b}{\partial t}$$

where t = time; h = water depth; u and v = velocity components in the x and y directions, respectively; g = gravitational acceleration; ν = turbulent viscosity coefficient; $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$, in which ρ_f = clear water density and ρ_s = sediment density; ρ_m = density of water-sediment mixture ρ_0 = density of saturated bed material, $\rho_0 = (1 - \rho' / \rho_s)\rho_f + \rho'$, in which ρ' = dry density of bed material; S = total concentration of graded sediments. The bed slope terms (S_{bx} , S_{by}) and friction slope terms (S_{fx} , S_{fy}) are written as $S_{bx} = -\partial Z_b / \partial x$, $S_{by} = -\partial Z_b / \partial y$ and $S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3}$, $S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3}$, in the x , y directions, respectively, where Z_b = bed elevation; n = Manning's roughness coefficient.

For the suspended load, the 2D non-equilibrium transport equation is given as:

(4-1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(hS_k) + \frac{\partial}{\partial x}(huS_k) + \frac{\partial}{\partial y}(hvS_k) = \frac{\partial}{\partial x}(h\mathcal{E}_s \frac{\partial S_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\mathcal{E}_s \frac{\partial S_k}{\partial y}) - \alpha_{sk} \omega_{sk} (S_k - S_{sk})$$

For the bed load, the 2D non-equilibrium transport equation is given as:

(4-2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(hq_{bk}) + \frac{\partial}{\partial x}(huq_{bk}) + \frac{\partial}{\partial y}(hvq_{bk}) = -\alpha_{bk} \omega_{bk} (q_{bk} - q_{b*k})$$

where \mathcal{E}_s = turbulent diffusion coefficient of sediment; subscript k represents the k th sediment fraction; S_k , S_{sk} and ω_{sk} represent, respectively, the sediment concentration, sediment transport capacity and effective settling velocity for the k th fraction; α_{sk} = non-equilibrium adaptation coefficient of suspended load, which is an empirical coefficient associated with the rate of bed evolution. q_{bk} = amount of bed load in a unit volume of water, in kg/m³; ω_{bk} = setting velocity of bed load; q_{b*k} = transport capacity

es menor que h_{set} . Así h_{set} es un valor preestablecido de poca agua de un valor de $2 - 2.5 h_{min}$. Sin embargo, la elevación de agua retenida en esta celda seca se establece en el valor en el paso de tiempo anterior cuando la célula era todavía húmeda.

(3) Finalmente, cada celda seca inactiva de la etapa (1) se comprueba después de cada paso de tiempo para ver si está mojada. Una celda seca inactiva i se considera como inundada y será una celda seca activa si el nivel del agua en una celda húmeda vecina j alrededor de la celda es superior tanto a la elevación del lecho del centro de la celda i y el punto medio de la elevación del lecho común del borde de las células i y j . Una celda seca activa será devuelta al modelo computacional al inicio de la siguiente iteración temporal. La salida del flujo no se permite a partir de una celda seca activa y la celda activa seca puede ser reintroducida como una húmeda solo si una de las celdas circundantes es húmeda, siempre que el flujo de entrada en esta celda seca sea lo suficientemente grande.

El modelo se ha aplicado a varios casos, entre ellos la inundación de Glasgow en el Reino Unido y una inundación en el río Amarillo en China. Se llevaron a cabo ensayos con modelos numéricos para investigar la sensibilidad de las predicciones del modelo para el valor de una profundidad mínima requerida para el tratamiento de los frentes secos y húmedos. Se ha encontrado que la selección de la profundidad mínima del agua tiene un impacto significativo en la velocidad de la propagación de la onda de inundación en un lecho inicialmente seco. Para un determinado paso de tiempo, un valor excesivamente grande de la profundidad mínima del agua dará lugar a predicciones inexactas de las ondas de choque seca y húmeda, pero un valor muy pequeño daría lugar a una inestabilidad numérica (Fig. 1).

of bed load in a unit volume of water, in kg/m³; and α_{bk} = non-equilibrium adaptation coefficient of bed load.

The equation used to represent the suspended load induced during bed evolution is written as:

$$(5-1) \quad \rho' \frac{\Delta Z_{sk}}{\Delta t} = \alpha_{sk} \omega_{sk} (S_s - S_{sk})$$

The equation used to represent the bed load induced during bed evolution is written as:

$$(5-2) \quad \rho' \frac{\Delta Z_{bk}}{\Delta t} = \alpha_{bk} \omega_{bk} (q_{bk} - q_{b*k})$$

where ΔZ_{sk} and ΔZ_{bk} = thicknesses of bed deformation caused by suspended load and bed load, respectively, in one time step; and ΔZ_i = total thickness of bed evolution in one time step, given by:

$$(5-3) \quad \Delta Z_i = \sum_{k=1}^{N_s} \Delta Z_{sk} + \sum_{k=N_s+1}^N \Delta Z_{bk}$$

in which N = total number of fractions of non-uniform sediments; and N_s = number of fractions of non-uniform suspended sediments. The model was used to study the influence of using different sediment size distributions on the flood flow and channel bed changes.

(2) Predicted results for a partial dam-breach flow in a mobile channel Model studies were undertaken to investigate the differences in the speed of flood wave propagation over fixed and mobile beds. The model results indicate that there is a significant difference between dam-break flow simulations over fixed and mobile beds. For a dam-break induced flow at the initial stage, the rate of bed evolution is comparable to the rate of water depth variation near the dam site (Fig. 2). For mobile beds, the erosion extent over a bed made up of uniform sediment is less than

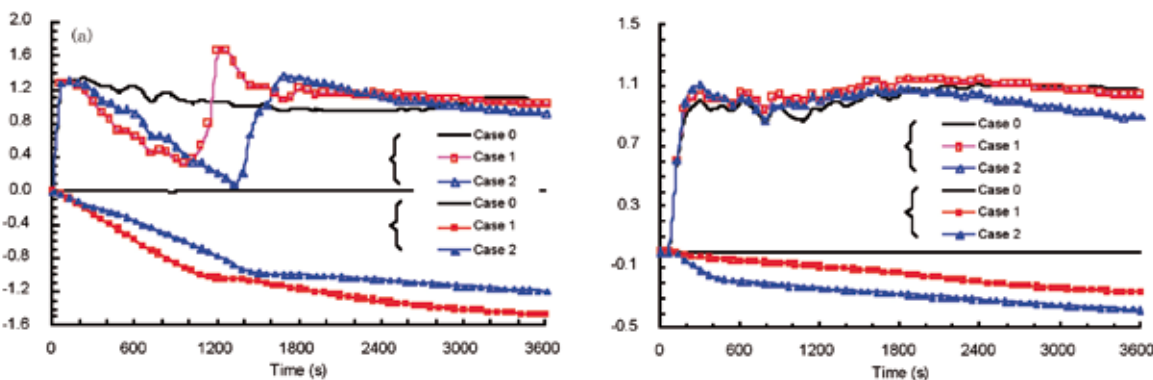


Fig. 2. Las variaciones de nivel de agua y del lecho aguas abajo de la presa para (a) P1 y (b) P2 / Water level and bed level variations downstream of the dam for (a) P1 and (b) P2

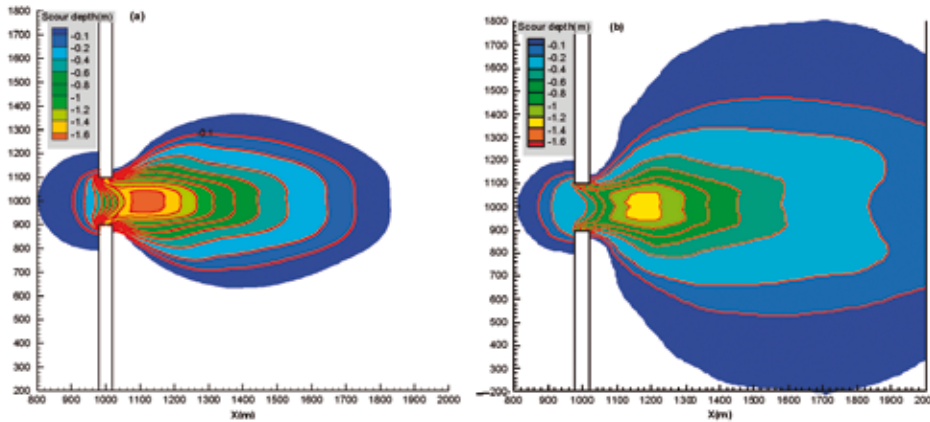


Fig. 3. Los contornos de los niveles del lecho después de 3,600 seg para (a) Sedimentos uniformes, y (b) Sedimentos no uniformes / Contours of bed levels after 3,600 s for (a) Uniform Sediment; and (b) Non-uniform Sediment

5.2. Modelos de flujo de rotura de presas sobre lechos móviles utilizando un planteamiento conjunto en 2D

Los flujos de rotura de presas se propagan normalmente a lo largo de ríos y llanuras inundables, donde los procesos de flujo de fluidos, transporte de sedimentos y los cambios morfológicos están estrechamente vinculados. Sin embargo, la mayoría de los modelos en 2D existentes utilizados para la simulación de flujos de rotura de presas son sólo aplicables a un lecho fijo. El modelo hidrodinámico descrito anteriormente se ha ampliado para incluir el transporte de sedimentos y cambios en el nivel del lecho, para permitir la predicción de los flujos de rotura de presas sobre lechos móviles. En este modelo se utilizan ecuaciones de aguas poco profundas 2D modificadas para tener en cuenta los efectos de la concentración de sedimentos y la evolución del lecho en la propagación de las ondas de inundación, con la ecuación de transporte de no equilibrio para los sedimentos granulares que se utilizan para representar los procesos de transporte de sedimentos. Además, el modelo puede tener en cuenta el proceso de ajuste de la composición del material del lecho durante el proceso de evolución morfológica. La ecuación de transporte de sedimentos se resuelve de una manera semi-implícita. El esquema predictor-corrector se utiliza en intervalos de tiempo, lo que lleva a una solución precisa de segundo orden en el tiempo y el espacio.

(1) Ecuaciones principales de flujo y transporte de sedimentos
Las ecuaciones principales hidrodinámicas utilizadas se basan en las ecuaciones de aguas poco profundas de dos dimensiones, pero con elementos adicionales que se incluyen para considerar los efectos de los sedimentos en la densidad del fluido y el cambio de nivel del lecho. Las ecuaciones principales del modelo hidrodinámico 2D en aguas poco profundas engloban las ecuaciones de conservación de momento y de masa para la mezcla de flujo agua-sedimento. Las ecuaciones modificadas de continuidad y momento en las direcciones x e y se pueden detallar de la siguiente manera:

$$(1) \quad \frac{\partial}{\partial t}(h) + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = -\frac{\partial Z_b}{\partial t}$$

that over a non-uniform sediment bed, while the maximum erosion depth obtained over the former is greater than that over the latter (Fig. 3). The planar shape of the scour hole is approximately elliptical over the uniform sediment bed and it is almost circular over the non-uniform sediment bed, which indicates an increase in the erosion extent in the lateral direction.

5.3. Incipient Velocity Formula for Vehicles in Flooded Streets (Case 1)

With the climate change caused by global warming, the occurrence probability of urban flooding due to flash floods has increased gradually. Flash floods propagate rapidly, which can lead to significant hazard to human life and property. Flood hazard to vehicles has become more noticeable and frequent in recent years. Therefore, it is important to investigate the behaviour of vehicles on flooded streets or roads.

In the current study, a formula has been derived to predict the incipient velocity of flooded vehicles according to the mechanical condition of sliding balance, with a key assumption being made that the inside space of a prototype vehicle would be filled quickly by the floodwater. A series of flume experiments were conducted using three types of scaled die-cast model vehicles, with two scales being tested for each type of vehicle (Fig. 4). The experimental data obtained for the small-scale model vehicles were used to determine the two parameters in the derived formula (Fig. 5 and Table 1) and the prediction accuracy of this formula was validated using the experimental data obtained for the large-scale model vehicles (Fig. 6). Finally, the corresponding incipient velocities under various incoming depths were computed using this formula for these three prototype vehicles (Fig. 7). It is found that for a specified vehicle the value of incipient velocity reaches its minimum as the incoming flow depth approaches the height of the vehicle. The smaller and lighter the vehicle, the easier for it to start sliding in floodwaters. The results can be used as a preliminary assessment to define the hazard to vehicles parking on flooded streets or roads.

(1) Formula derivation and parameter determination

The incipient velocity formula for flooded vehicles has been derived, giving:

$$(6) \quad U_c = \alpha \times \left(\frac{h_f}{h_c}\right)^\beta \times \sqrt{2g\left(\frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f}\right)h_c}$$

$$(2) \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{bx} - S_f) + hv_i \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\Delta\rho gh^2}{2\rho_m \rho_s} \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_m} \frac{v \partial Z_b}{\partial t}$$

$$(3) \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(hv^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) = gh(S_{by} - S_f) + hv_i \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\Delta\rho gh^2}{2\rho_m \rho_s} \frac{\partial S}{\partial y} + \frac{\rho_0 - \rho_m}{\rho_m} \frac{v \partial Z_b}{\partial t}$$

donde t = tiempo; h = profundidad de agua; u y v = componentes de velocidad en las direcciones x e y , respectivamente; g = aceleración gravitacional; v_i = coeficiente turbulento de viscosidad; $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$, donde ρ_f = densidad agua limpia y ρ_s = densidad del sedimento; ρ_m = densidad de la mezcla agua-sedimento ρ_0 = densidad del lecho saturado de material, $\rho_0 = (1 - \rho' / \rho_s) \rho_f + \rho'$, donde ρ' = densidad seca del material del lecho; S = concentración total de sedimentos granulares. Las pendientes del lecho (S_{bx} , S_{by}) y la pendiente de fricción (S_{fx} , S_{fy}) se escriben como $S_{bx} = -\partial Z_b / \partial x$, $S_{by} = -\partial Z_b / \partial y$ y $S_{fx} = n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3}$, $S_{fy} = n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{4/3}$, en las direcciones x , y , respectivamente, donde Z_b = elevación del lecho; n = Coeficiente de Manning.

Para la carga suspendida, la ecuación de transporte de no-equilibrio en 2D es:

$$(4-1) \frac{\partial}{\partial t}(hS_k) + \frac{\partial}{\partial x}(huS_k) + \frac{\partial}{\partial y}(hvS_k) = \frac{\partial}{\partial x}(h\mathcal{E}_s \frac{\partial S_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\mathcal{E}_s \frac{\partial S_k}{\partial y}) - \alpha_{sk} \omega_{sk} (S_k - S_{*k})$$

Para la carga del lecho, la ecuación de transporte de no-equilibrio en 2D es:

$$(4-2) \frac{\partial}{\partial t}(hq_{bk}) + \frac{\partial}{\partial x}(huq_{bk}) + \frac{\partial}{\partial y}(hvq_{bk}) = -\alpha_{bk} \omega_{bk} (q_{bk} - q_{b*k})$$

donde \mathcal{E}_s = coeficiente de difusión turbulenta del sedimento; subíndice k representa la k th fracción de sedimento; S_k , S_{*k} , y ω_{sk} representan, respectivamente, la concentración del sedimento, la capacidad de transporte del sedimento y la velocidad efectiva de sedimentación para la fracción k th; α_{sk} = coeficiente de adaptación no-equilibrio de la carga suspendida, que es un coeficiente empírico asociado con el coeficiente de evolución del lecho. q_{bk} = cantidad de carga del lecho en una unidad de volumen de agua, en kg/m³; ω_{bk} = velocidad de deposición de la carga del lecho; q_{b*k} = capacidad de transporte de la carga del lecho en una unidad de volumen de agua, en kg/m³; y α_{bk} = coeficiente de adaptación de no-equilibrio de la carga del lecho.

La ecuación utilizada para representar la carga suspendida inducida durante la evolución del lecho se escribe como:

$$(5-1) \rho \frac{\Delta Z_{sk}}{\Delta t} = \alpha_{sk} \omega_{sk} (S_k - S_{*k})$$

in which h_f and h_c = water depth and vehicle height, respectively; ρ_c and ρ_f = densities of the vehicle and water, respectively; g = gravitational acceleration; and α and β = parameters related to the shape of a vehicle, the type of its tyres and the roughness of road surface, which were determined in this study from flume experiments using die-cast model vehicles.

5.4 Incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters (Case 2)

Vehicles parking in urban areas can often cause various degrees of hazard to people and buildings when they are swept away by flash floods. Therefore, it is necessary to investigate the appropriate criteria of vehicle stability in floodwaters, especially under partially submerged conditions. In the present study different forces acting on partially submerged vehicles have been analysed, with the corresponding expressions for these forces being presented, to derive a mechanics-based formula of incipient velocity for partially submerged vehicles parking in urban areas, with an important assumption being made that the inside space of a prototype vehicle would not be filled quickly by floodwaters and the vehicle would start to float when the outside water depth exceeds a specified depth. About 100 runs of flume experiments were conducted to obtain the combinations water depth and the velocity when a vehicle is at the threshold of instability for three typical types of die-cast model vehicles of the same scale ratio of prototype-to-model dimensions (Fig. 8). The experimental data from these model vehicles studies were then used to determine two key parameters in the derived formula (Fig. 9, Fig. 10 and Table 2). Finally, incipient velocities for partially submerged

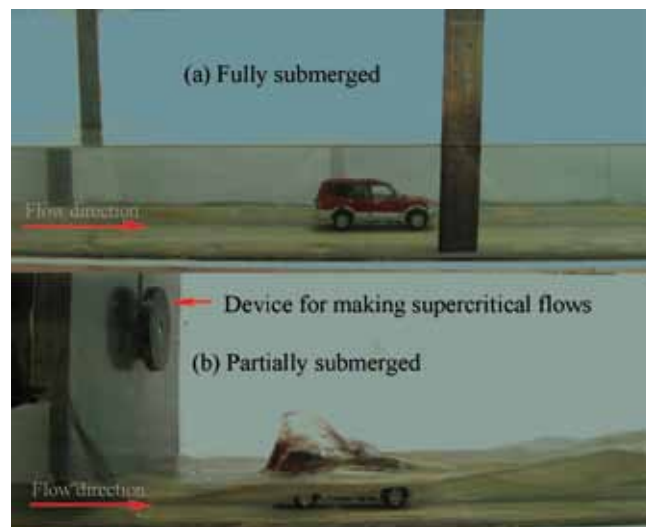


Fig. 4. Vehículos totalmente y parcialmente sumergidos en el canal / Fully and partially submerged vehicles in the flume

La ecuación utilizada para representar la carga de fondo inducida durante la evolución del lecho se escribe como:

$$(5-2) \quad \rho' \frac{\Delta Z_{bk}}{\Delta t} = \alpha_{bk} \rho_{bk} (q_{bk} - q_{s+kk})$$

donde ΔZ_{sk} y ΔZ_{bk} = espesor de la deformación del lecho causada por la carga suspendida y la carga del lecho respectivamente, en un intervalo temporal; y ΔZ_t = espesor total de la evolución del lecho en un intervalo temporal, dado por:

$$(5-31) \quad \Delta Z_t = \sum_{k=1}^N \Delta Z_{sk} + \sum_{k=N_s+1}^N \Delta Z_{bk}$$

donde N = número total de fracciones de sedimentos no-uniformes y N_s = número de fracciones de sedimentos suspendidos no uniformes. El modelo se utilizó para estudiar la influencia de la utilización de las diferentes distribuciones de tamaño de los sedimentos en el flujo de las inundaciones y los cambios de canal del lecho.

(2) Previsión de resultados para un flujo procedente de una rotura de presa en un canal móvil

Se llevaron a cabo modelos para investigar las diferencias en la velocidad de propagación de la onda de inundación en lechos fijos y móviles. Los resultados del modelo indican que existe una diferencia significativa entre las simulaciones de flujo de rotura de presas en lechos fijos y móviles. Para un flujo inducido por una rotura de una presa, en la etapa inicial, el coeficiente de evolución del lecho es comparable al coeficiente de variación de la profundidad del agua cerca de la presa (Fig. 2). Para lechos móviles, la extensión de la erosión sobre un lecho formado por sedimentos uniformes es menor que sobre un lecho de sedimentos no uniformes, mientras que la profundidad de erosión máxima obtenido en el primer caso es mayor que en el último (Fig. 3). La forma plana de la zona de erosión es aproximadamente elíptica en el lecho de sedimento uniforme y casi circular sobre el lecho de sedimentos no uniforme, lo que indica un aumento de la erosión en las direcciones laterales.

5.3. Fórmula de la velocidad inicial para los vehículos en las calles inundadas (Caso 1)

Con el cambio climático causado por el calentamiento global, la probabilidad de ocurrencia de las inundaciones urbanas debido a lluvias torrenciales ha aumentado gradualmente. Las inundaciones repentinas se propagan rápidamente, lo que puede conducir a un riesgo considerable para la vida humana y las propiedades. Los riesgos para los vehículos se han vuelto más notables y frecuentes en los últimos años. Por lo tanto,

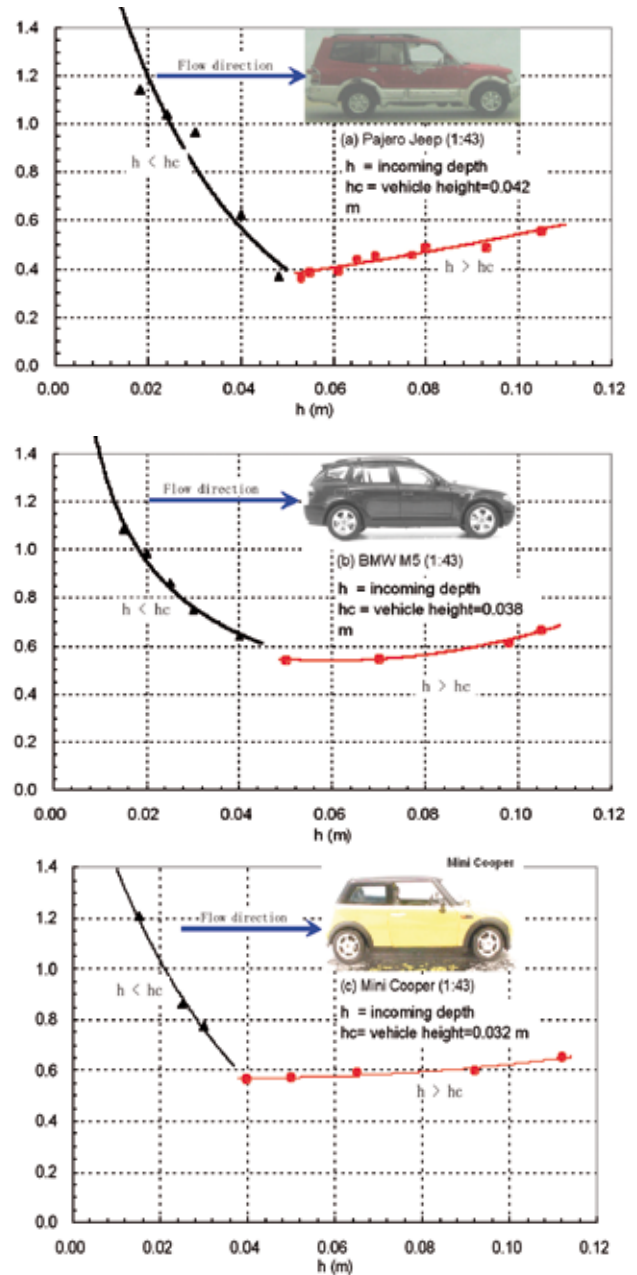


Fig. 5. Profundidades entrantes y las correspondientes velocidades incipientes de los diferentes vehículos (para la parametrización) / Incoming depths and corresponding incipient velocities of different vehicles (for parameterisation)

Flooding Degree	Partially Submerged		Fully Submerged	
<i>Parameters</i>	α	β	α	β
<i>Pajero Jeep</i>	1.492	-0.731	0.737	0.532
<i>BMW M5</i>	1.116	-0.558	0.816	0.264
<i>Mini Cooper</i>	1.225	-0.708	0.932	0.121

Tabla 1. Diferentes valores de parámetros en la fórmula de velocidad incipiente / Different values of parameters in the formula of incipient velocity

es importante investigar el comportamiento de los vehículos en las calles o carreteras inundadas.

En el estudio actual, una fórmula ha sido desarrollada para predecir la velocidad inicial de los vehículos arrastrados según la condición mecánica de equilibrio deslizando, con una hipótesis clave que se basa en que el espacio del interior del vehículo se llena rápidamente con el agua de la inundación. Se ha realizado una serie de experimentos en el canal de pruebas utilizando tres tipos de vehículos modelo a escala, con dos niveles de pruebas para cada tipo de vehículo (Fig. 4). Los datos experimentales obtenidos para los modelos de vehículos pequeños se utilizaron para determinar los dos parámetros en la fórmula derivada (Fig. 5 y Tabla 1) y la precisión de la predicción de esta fórmula se validó utilizando los datos experimentales obtenidos para el modelo de vehículos grandes (Fig. 6). Por último, las velocidades incipientes correspondientes a varias profundidades entrantes se calcularon utilizando esta fórmula para estos tres prototipos de vehículos (Fig. 7). Se ha encontrado que para un vehículo determinado el valor de la velocidad incipiente alcanza su mínimo cuando la profundidad de flujo entrante se aproxima a la altura del vehículo. Cuanto más pequeño y ligero es el vehículo, más fácil es que inicie su deslizamiento en las aguas. Los resultados pueden ser utilizados como una evaluación preliminar para determinar el peligro de aparcamiento para vehículos en las calles o carreteras inundables.

(1) Fórmulas derivadas y determinación de parámetros

La fórmula de la velocidad incipiente para vehículos inundados, ha sido calculada dando el siguiente valor:

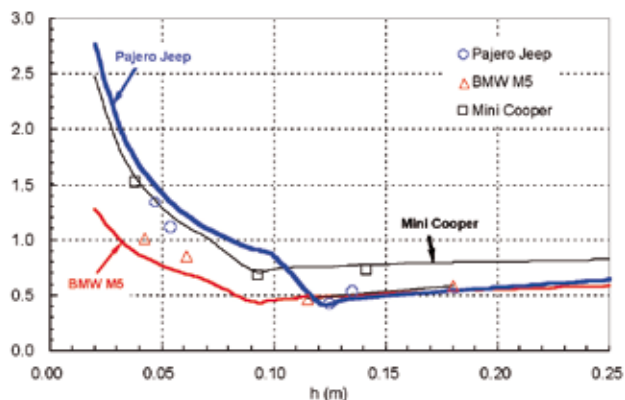


Fig. 6. Validación de la ecuación (6) utilizando los datos experimentales para vehículos a escala 1:18 / Validation of Equation (6) using the experimental data for 1:18 scaled vehicles

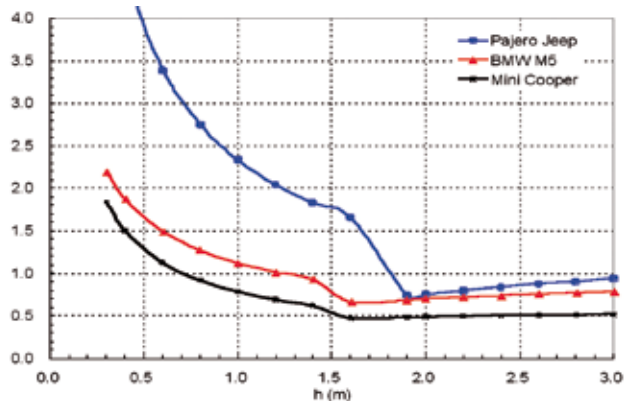


Fig. 7. La aplicación de la ecuación (6) en el cálculo de las velocidades incipientes de prototipos de vehículos / Application of Equation (6) in calculating the incipient velocities of prototype vehicles

prototype vehicles in floodwaters were estimated using two different approaches, including the predictions using the model scale ratios and computations based on the derived formula (Fig.11). Since these model experiments strictly followed the principles of geometric, kinematic and dynamic similarity, the incipient velocity obtained under a specified water depth for a model vehicle could be directly used to estimate the critical condition for the corresponding prototype vehicle according to the scale ratios. These critical conditions in the prototype using the scale ratios compared well with the calculations using the derived formula, and the derived formula was also validated by the visually-observed data of swept vehicles in flash floods, which provided some degree of verification of the estimation reliability of the incipient velocity formulation derived for partially submerged prototype vehicles (Fig.11).

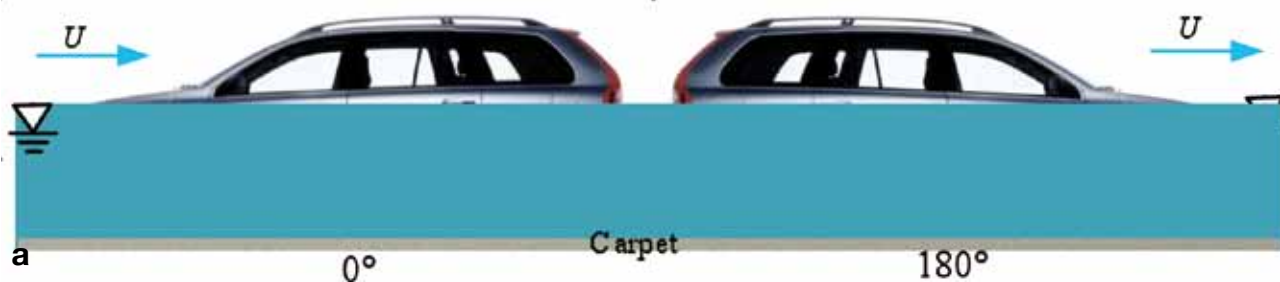


Fig. 8a. Diferentes ángulos de orientación de vehículos realizados en los experimentos / *Different vehicle orientation angles undertaken in the experiments*
 Fig. 8b. Modelos de vehículos parcialmente sumergidos en canal / *Partially submerged model vehicles in flume*

$$(6) \quad U_c = \alpha \times \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \times \sqrt{2g \left(\frac{\rho_c - \rho_f}{\rho_f} \right) h_c}$$

donde h_f y h_c = profundidad de agua y altura del vehículo, respectivamente; ρ_c y ρ_f = densidades del vehículo y del agua, respectivamente; g = fuerza de gravedad; y α y β = parámetros relacionados con la forma del vehículo, el tipo de neumáticos y la rugosidad de la superficie de la carretera, que fueron determinados, en este estudio de experimentos en un canal utilizando vehículos de prueba.

(2) Validación de la fórmula y aplicación: Figs. 6 y 7.

5.4. Velocidad incipiente para vehículos parcialmente sumergidos en aguas (Caso 2)

Los vehículos estacionados en zonas urbanas pueden causar diversos grados de peligro para las personas y los edificios cuando son arrastrados por las riadas. Por lo tanto, es necesario investigar los criterios apropiados de estabilidad del vehículo en caso de riadas, especialmente en condiciones parcialmente sumergidas.

En el presente estudio se han analizado diferentes fuerzas que actúan sobre los vehículos parcialmente sumergidos, con las expresiones correspondientes para estas fuerzas que se presentan y a partir de ellas desarrollar una fórmula mecánica basada en la velocidad incipiente de vehículos aparcados parcialmente sumergidos en zonas urbanas, con una hipótesis importante que es que el espacio en el interior de un vehículo no se llenaría rápidamente por las aguas y el vehículo empezaría

(1) Formula derivation and parameter determination

The formula of incipient velocity for partially submerged vehicles in floodwaters can be expressed as:

$$(7) \quad U_c = \alpha \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2g l_c \left(\frac{\rho_c h_c}{\rho_f h_f} - R_f \right)}$$

where l_c = vehicle length; $R_f = h_c \rho_c / (h_f \rho_f)$ in which h_c = critical water depth at which the vehicle starts to float. The values of α and β are related to the shape of a vehicle, the tyre type and the roughness of the road surface, which are determined in this study by the experimental studies using die-cast model vehicles in a flume.

5.5. Numerical assessment of people and vehicle safety in flash floods

Flash flooding often leads to extremely dangerous conditions due to its short timescale, giving limited opportunity for issuing warnings, and hence often results in high average mortality. Many past extreme flood events have been accompanied by flash floods, and they are one of the main sources of serious loss of human life among natural disasters. Flash floods can also cause heavy loss of property, such as the damage to a bridge and loss of vehicles in the 2004 Boscastle flood in the UK. Therefore, flash floods often lead to casualties and can cause damage to vehicles, especially in densely populated urban areas.

In flood risk management studies, it is therefore desirable to be able to predict the degree of safety of people and vehicles during flash floods using a numerical model. In the current study, an algorithm for assessing the degree of safety of people and vehicles has been integrated into an existing two-dimensional hydrodynamic model capable of simulating flash floods. In this algorithm, empirical functions

a flotar cuando la profundidad del agua en el exterior superara una profundidad especificada. Se realizaron 100 experimentos en el canal para obtener las posibles combinaciones de agua y velocidad cuando el vehículo está en el umbral de inestabilidad para tres tipologías de vehículos con la misma relación de escala de las dimensiones de prototipo a realidad (Fig. 8). Los datos experimentales de estos modelos de vehículos se utilizaron para determinar dos parámetros clave en la fórmula derivada (Fig. 9, Fig. 10 y Tabla 2). Por último, las velocidades incipientes para prototipos de vehículos parcialmente sumergidos fueron estimadas utilizando dos enfoques diferentes, que incluían las predicciones usando las relaciones de escala del modelo y los cálculos basados en la fórmula derivada (Fig. 11). Puesto que estos modelos experimentales siguieron estrictamente los principios de similitud geométrica, cinemática y dinámica, la velocidad incipiente obtenida a una profundidad específica de agua para un vehículo determinado podría ser utilizada directamente para estimar el estado crítico para el vehículo prototipo correspondiente de acuerdo con las relaciones de escala. Estas condiciones críticas en el prototipo utilizando los ratios de escala concordaban con los cálculos utilizando la fórmula derivada, y la fórmula derivada también fue validada por los datos observados visualmente de vehículos arrastrados en las inundaciones relámpago, que proporcionan un cierto grado de verificación de la fiabilidad de la estimación de la fórmula de la velocidad incipiente derivada de los prototipos de vehículos parcialmente sumergidos (Fig. 11).

(1) Fórmulas derivadas y determinación de parámetros

La fórmula de velocidad incipiente para vehículos parcialmente sumergidos puede ser expresada como:

$$(7) \quad U_c = \alpha \left(\frac{h_f}{h_c} \right)^\beta \sqrt{2g l_c \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \frac{h_c}{h_f} - R_f \right)}$$

donde l_c = longitud del vehículo; $R_f = h_c \rho_c / (h_f \rho_f)$ en las que h_c = profundidad crítica del agua a la cual el vehículo empieza a flotar. Los valores de α y β están relacionados con la forma del vehículo, tipo de neumáticos, y la rugosidad de la superficie de rodadura, que son determinadas en este informe por estudios experimentales que utilizando vehículos a escala en un canal.

(2) Validación de la fórmula y aplicación: Fig. 11.

5.5 Evaluación numérica de la seguridad de las personas y vehículos en las inundaciones repentinas

Las inundaciones repentinas suelen desembocar en condiciones extremadamente peligrosas debido a su corto plazo de

relating water depths and corresponding critical velocities for children and adults, developed from previous studies, are used to assess the degree of people safety, and a new incipient velocity formula is used to evaluate the degree of vehicle safety.

The refined model was then applied to three real case studies, including: the Glasgow and Boscastle floods in the UK, and the Malpasset dam-failure flood in France. According to model predictions, the following conclusions have been drawn: (i) model results for the Glasgow flood showed that children would be in danger of standing in the flooded streets in some areas (Fig. 12); (ii) for the Boscastle flood model results indicated that vehicles in the car park would be flushed away by the flow with a high velocity, which indirectly testified the predictive accuracy of the incipient velocity formula for vehicles (Fig. 13); and (iii) for the Malpasset dam-failure flood model results showed that the adopted method for the assessment of people safety was applicable, and some local people living below the dam would have been swept away, which corresponded well with the report of casualties. Therefore, the enhanced model can be used to evaluate the flood hazard degree of safety prediction for people and vehicles in flash floods, and these predictions can be used in flood risk management.

6. Conclusions

During this research study, a morphodynamic model has been developed to simulate the processes of flood routing, sediment transport and corresponding bed evolution using a coupled approach, with a refined wetting and drying approach being used; two incipient velocity formulae for flooded vehicles under different scenarios were proposed for assessing stability criteria of vehicles in floodwaters; and an integrated numerical model was developed to predict the inundation of flash floods and the corresponding flood hazards to people (including children and adults) and property (vehicles and buildings); this integrated model was validated using some observations obtained from three flash floods, which indicated that the enhanced numerical model could be used as a rough assessment tool for assisting water engineers in better managing flood risk.

7. Acknowledgements

The research reported above was conducted as part of the Flood Risk Management Research Consortium (Phase II), supported by the UK Engineering and Physical Sciences Research Council (GR/S76304). The bathymetric data for the Boscastle study were provided by the Environmental Agency, with the post flood surveys being undertaken by Halcrow Group Limited. The contributions of both the organizations and individuals involved are gratefully acknowledged. **ROP**

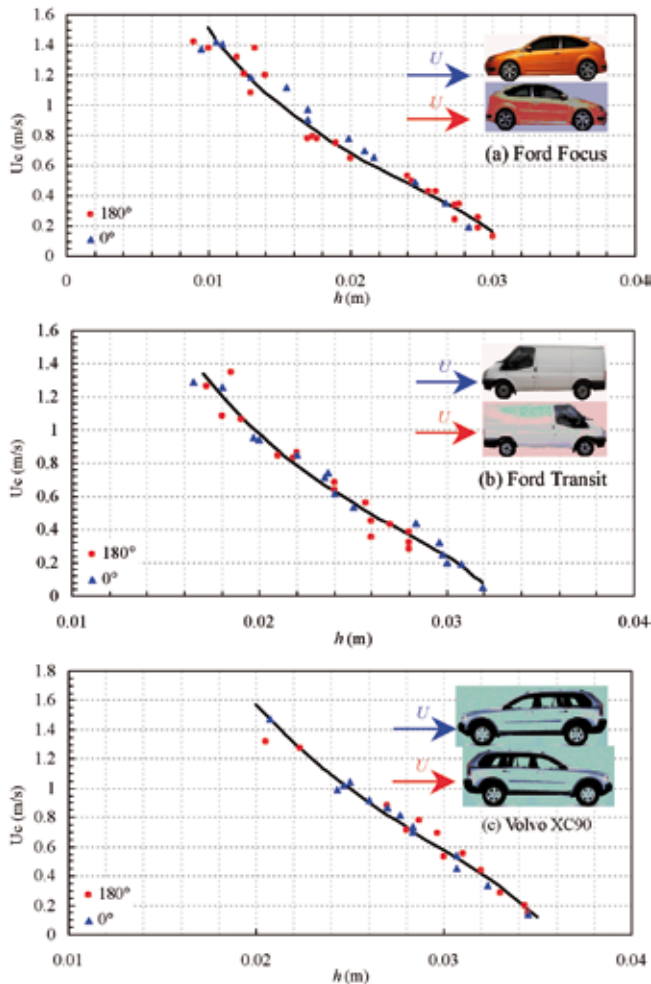


Fig. 9. Relaciones de velocidad de profundidad incipientes para vehículos modelo parcialmente sumergidos (para la parametrización) / *Depth-incipient velocity relationships for partially submerged model vehicles (for parameterisation)*

Vehículos	Parámetros	
	α	β
Ford Focus	0.500	-0.178
Ford Transit	0.227	-0.764
Volvo XC90	0.394	-0.630

Tabla 2. Valores de parámetros diferentes para la velocidad incipiente, ecuación (7) / *Different parameter values for incipient velocity, equation (7)*

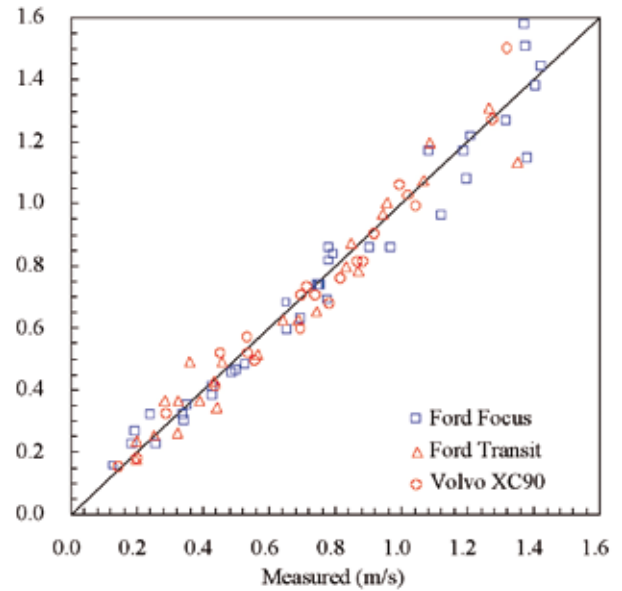


Fig. 10. Comparación entre las velocidades calculadas y medidas para diferentes modelos de vehículos (para la parametrización) / *Comparison between the calculated and measured velocities for different model vehicles (for parameterisation)*

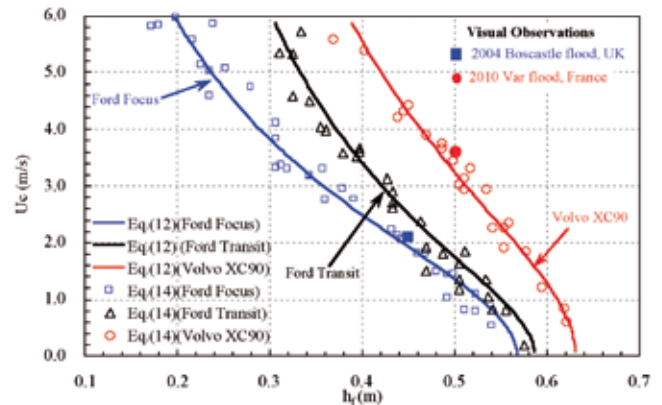


Fig. 11. Comparación entre las velocidades calculadas y medidas para diferentes modelos de vehículos (para la parametrización) / *Comparisons between estimated incipient velocities for prototype vehicles using two different approaches*

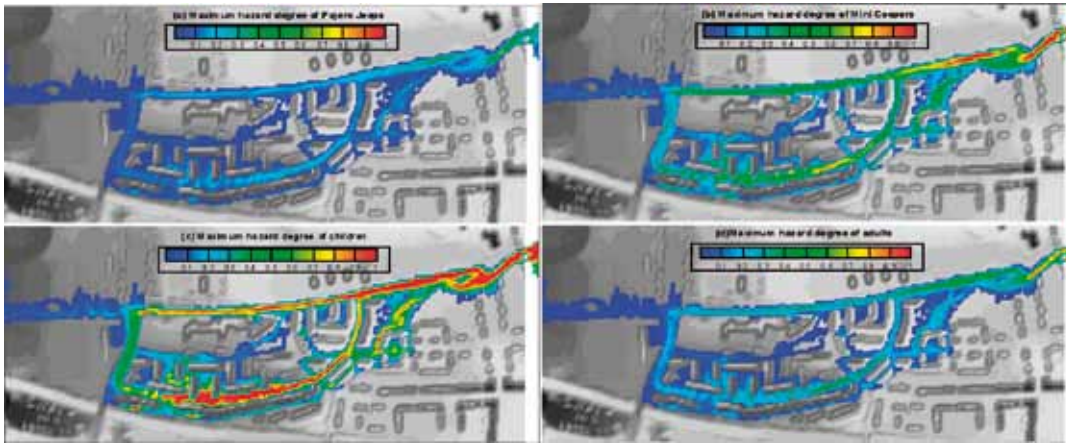


Fig. 12. La distribución de grados máximos de riesgo para diferentes grupos y vehículos personas / Distributions of maximum hazard degrees for different people groups and vehicles

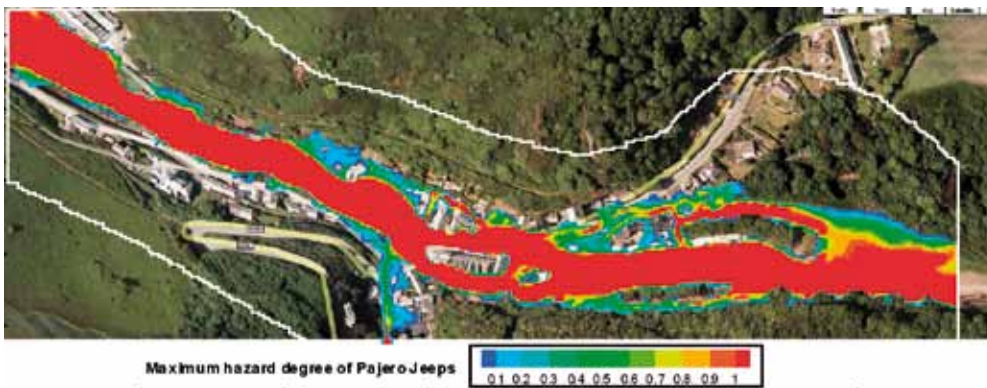


Fig. 13. Distribución de los grados máximos de riesgo para el vehículo Jeep Pajero / Distribution of maximum hazard degrees for the Pajero Jeep vehicle

tiempo, lo que deja poco margen para emitir avisos, y por lo tanto a menudo derivan en una alta tasa de mortalidad. Muchas inundaciones extremas del pasado han ido acompañadas de inundaciones repentinas, y son una de las principales fuentes de mayores pérdidas de vidas humanas entre los desastres naturales. Las inundaciones repentinas también pueden causar grandes pérdidas de bienes materiales como por ejemplo los daños en puentes y la pérdida de vehículos en las inundaciones de Boscastle en 2004 en el Reino Unido. Por lo tanto, las inundaciones repentinas suelen ocasionar víctimas y puede causar daños a los vehículos, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas.

En los estudios de gestión del riesgo de inundación, por ello, es deseable ser capaz de predecir el grado de seguridad de las personas y vehículos durante las inundaciones repentinas utilizando un modelo numérico. En el estudio presente, un algoritmo para evaluar el grado de seguridad de las personas y los vehículos se ha introducido en un modelo hidrodinámico bidimensional existente capaz de simular inundaciones repentinas. En este algoritmo, funciones empíricas relativas a las profundidades de agua y las correspondientes velocidades críticas para niños y adultos, desarrolladas a partir de estudios anteriores, se utilizan para evaluar el grado de seguridad de las personas, y una nueva fórmula de la velocidad incipiente se utiliza para evaluar el grado de seguridad de los vehículos.

El modelo refinado se aplicó a tres estudios de casos reales, incluyendo: las inundaciones de Glasgow y Boscastle en el Reino Unido, y el fallo de la presa de Malpasset en Francia. De acuerdo con las predicciones del modelo, se han extraído las siguientes conclusiones: (i) los resultados del modelo de la inundación Glasgow mostraron que los niños estarían en peligro si estuvieran de pie en las calles inundadas en algunas áreas (Fig. 12); (ii) para el caso Boscastle los resultados del modelo indican que los vehículos aparcados serían arrastrados por la corriente con una velocidad alta, que daba testimonio indirecto de la exactitud de la predicción de la fórmula de la velocidad inicial de los vehículos (Fig. 13); y (iii) para el fallo de la presa de Malpasset los resultados del modelo de inundación mostraron que el método adoptado para la evaluación de la seguridad de las personas era aplicable, y algunos habitantes que vivían por debajo de la presa habrían sido arrastrados por las aguas, lo que concuerda con el informe de víctimas. Por lo tanto, el modelo mejorado se puede utilizar para evaluar el grado de riesgo de inundación para la predicción de la seguridad de las personas y vehículos en las inundaciones repentinas, y estas predicciones se pueden utilizar en la gestión del riesgo de inundación.

6. Conclusiones

Durante esta investigación, se ha desarrollado un modelo morfodinámico para simular los procesos de las rutas de

inundación, el transporte de sedimentos y la evolución del lecho correspondiente utilizando un enfoque conjunto, con unos enfoques de lecho seco y húmedo; se han propuesto dos fórmulas de velocidad incipiente para vehículos inundados bajo diferentes escenarios para evaluar los criterios de estabilidad de los vehículos en las riadas, y se ha desarrollado un modelo numérico integrado para predecir las riadas repentinas y los correspondientes riesgos de inundación para las personas (incluidos niños y adultos) y los bienes (vehículos y edificios); este modelo integrado fue validado con algunas observaciones obtenidas de tres inundaciones, lo que indica que el modelo numérico mejorado podría ser utilizado como una herramienta de evaluación aproximada

para ayudar a los ingenieros hidráulicos en una mejor gestión del riesgo de inundación.

7. Agradecimientos

La investigación descrita en este artículo ha sido llevada a cabo en el marco del Consorcio de Investigación para la Gestión de Riesgos (Fase II), apoyado por el UK Engineering and Physical Sciences Research Council (GR/S76304). Los datos batimétricos del estudio de Boscastle fueron suministrados por la Agencia de Medio Ambiente, con las encuestas post riadas realizadas por Halcrow Group Limited. Agradecemos sinceramente las contribuciones de estas organizaciones, así como de las personas en ellas involucradas. **ROP**

Referencias

- [1] Abt, S.R., Wittler, R.J., Taylor, A. and Love, D.J., 1989. Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resources Bulletin* 25(4): 881-890.
- [2] Begnudelli L and Sanders BF. Conservative wetting and drying methodology for quadrilateral grid finite-volume models. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 2007; 133(3): 312-322.
- [3] Bellos, V., Soulis, J. V. and Sakkas J. G., 1992. Experimental investigations of two dimensional dam-break-induced flows. *IAHR Journal of Hydraulic Research* 30(1), 47-63.
- [4] Bonham, A.J. and Hattersley, R.T., 1967. Low level causeways. University of New South Wales, Water Research Laboratory, Technical Report No. 100.
- [5] Bradford, S. F. and Sanders, B. F., 2002. Finite-volume model for shallow water flooding of arbitrary topography. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 128(3), 289-298.
- [6] Bryant, E.A. and Haslett, S.K. (2002) Was the AD 1607 coastal flooding event in the Severn Estuary and Bristol Channel (UK) due to a tsunami? *Archaeology in the Severn Estuary*, 13, 163-167.
- [7] Cao Z, Li Y and Yue Z. Multiple time scales of alluvial rivers carrying suspended sediment and their implications for mathematical modeling. *Advance in Water Resources* 2007; 30(4): 715-729.
- [8] Cao Z, Pender G, Wallis S and Carling P. Computational dam-break hydraulics over mobile sediment bed. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 2004; 130(7): 689-703.
- [9] Capart H, Young DL and Zech Y. Dam-break Induced debris flow and particulate gravity currents. Special Publication of the International Association of Sedimentologists (eds. Kneller B, McCaffrey B, Peakall J and Druitt T) 2001; 31: 149-156.
- [10] Costa JE and Schuster RL. The formation and failure of natural dams. *Geological Society of America Bulletin* 1988; 100(7): 1054-1068.
- [11] Defra and Environment Agency (EA), 2006. Flood and Coastal Defence R&D Programme, R&D outputs: Flood Risks to People (Phase 2 Project Record, FD2321/PR). <www.defra.gov.uk/environ/fcd/research>.
- [12] Fagherazzi S and Sun T. Numerical simulations of transportational cyclic steps. *Computers and Geosciences* 2003; 29: 1143-1154.
- [13] Ferreira R and Leal J. 1D mathematical modeling of the instantaneous dam-break flood wave over mobile bed: Application of TVD and flux-splitting schemes. *Proceedings of the European Concerted Action on Dam-Break Modeling*, Munich, 1998; pp 175-222.
- [14] Foster, D.N. and Cox, R., 1973. Stability of children on roads used as floodways. Technical Report No. 73/13, Water Research Laboratory, The University of New South Wales, Manly Vale, NSW, Australia.
- [15] Fraccarollo L and Toro EF. Experimental and numerical assessment of the shallow water model for two-dimensional dam-break type problems. *IAHR Journal of Hydraulic Research* 1995; 33(6): 843-864.

- [16] Gallegos HA, Schubert JE and Sanders BF. Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: A case study of Baldwin Hills, California. *Advance in Water Resources* 2009; 32: 1323-1335
- [17] Gordon, A.D. and Stone, P.B. 1973. Car stability on road floodways. The University of New South Wales, Water Research Laboratory, Technical Report 73/12.
- [18] Ishigaki, T., Baba, Y., Toda, K. and Inoue, K., 2005. Experimental study on evacuation from underground space in urban flood. In: *Proceedings of 31st IAHR Congress*, Eds: Jun B.H., Lee, S.I., Seo, I.W. and Choi, G.W. Seoul, pp. 1116-1123.
- [19] Ishigaki, T., Kawanaka R., Onishi Y., Shimada H., Toda K. and Baba Y., 2008. Assessment of safety on evacuation route during underground flooding. In: *Proceedings of 16th APD-IAHR conference and 3rd symposium of IAHR-ISHS*, Eds: Zhang, C.K. and Tang, H.W., Nanjing, China, pp. 141-146.
- [20] Jonkman, S.N. and Penning-Rowsell, E., 2008. Human instability in floods flows. *Journal of the American Water Resources Association* 44(5): 1208-1218.
- [21] Karvonen, R.A., Hepojoki, A., Huhta, H.K. and Louhio, A., 2000. The use of physical models in dam-break analysis. RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland.
- [22] Keller, R.J. and Mitsch, B., 1992. Stability of cars and children in flooded streets. In: *Proceedings of the International Symposium on Urban Stormwater Management*, Sydney.
- [23] Keller, R.J. and Mitsch, B., 1993. Safety aspects of design roadways as floodways. Research Report No. 69, Urban Water Research Association of Australia, 51 pp.
- [24] Kelman I (2002). Physical flood vulnerability of residential properties in Coastal, Eastern England. Ph.D dissertation, University of Cambridge, 324 pp.
- [25] Kelman I and Spence R (2004). An overview of flood actions on buildings. *Engineering Geology* 73: 297-309.
- [26] Liang, D. F., Lin, B. L. and Falconer, R. A., 2007. A boundary-fitted numerical model for flood routing with shock-capturing capability. *Journal of Hydrology* 332, 477-486.
- [27] Liao CB, Wu MS and Liang SJ. Numerical simulation of a dam break for an actual river terrain environment. *Hydrological Processes* 2007; 21: 447-460.
- [28] Lin, G. F., Lai, J. S. and Guo, W. D., 2003. Finite-volume component-wise TVD schemes for 2D shallow water equations. *Advances in Water Resources* 26, 861-873.
- [29] Lind, N.D., Hartford, D. and Assaf, H., 2004. Hydrodynamic models of human instability in a flood. *Journal of the American Water Resources Association* 40(1): 89-96.
- [30] New South Wales Government (NSWG), 2005. Floodplain development manual: the management of flood liable land. <<http://www.dipnr.nsw.gov.au>>.
- [31] Penning-Rowsell, E., Floyd, P., Ramsbottom, D. and Surendran, S., 2005. Estimating injury and loss of life in floods: a deterministic framework. *Natural Hazards* 36(1-2): 43-64.
- [32] Fraccarollo L and Armanini A. A semi-analytical solution for the dam-break problem over a movable bed. *Proceedings of the European Concerted Action on Dam-Break Modeling*, Munich, 1998; pp 145-152.
- [33] Shand, T.D., Cox, R.J., Blacka, M.J. and Smith G.P., 2010. Appropriate safety criteria for vehicles (Report Number: P10/S1/006). Australian Rainfall and Runoff, 28 pp.
- [34] Simpson G and Castellort S. Coupled model of surface water flow, sediment transport and morphological evolution. *Computers and Geosciences*, 2006; 32: 1600-1614.
- [35] Sleigh, P. A., Gaskell, P. H. and et al., 1998. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computers and Fluids* 27(4), 479-508.
- [36] Soares-Fraza, S., 2007. Experiments of dam-break wave over a triangular bottom sill. *IAHR Journal of Hydraulic Research* 45(Extra Issue), 19-26.
- [37] Takahashi, S., Endoh, K. and Muro, Z.I., 1992. Experimental study on people's safety against overtopping waves on breakwaters. *Report on the Port and Harbour Institute* 34(4): 4-31.
- [38] Yoon, T. H. and Kang, S. K., 2004. Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 130(7), 678-688.
- [39] Zhang RJ and Xie JH. *Sedimentation Research in China*. China Water and Power Press, Beijing; 1993.
- [40] Zhao DH, Shen HW, Lai JS and Tabios III GQ. Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modelling. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 1996; 122 (12): 692-702.
- [41] Zhou JG, Causon DM, Mingham CG. and Ingram DM. Numerical prediction of dam-break flows in general geometries with complex bed topography. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 2004; 130(4): 332-340.