

Simulación de la ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México, usando un algoritmo de alta resolución

Maritza Arganis

Universidad Nacional Autónoma de México

Ernest Bladé
Josep Dolz
Martí Sánchez

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Óscar A. Fuentes
Víctor Franco
Faustino de Luna

Universidad Nacional Autónoma de México

En este documento se presenta la simulación de la ruptura de la presa del proyecto hidroeléctrico La Parota, Guerrero, México, usando el programa CARPA, que se basa en un modelo de flujo bidimensional de alta resolución del tipo WAF-TDV (flujo ponderado y variación total decreciente), en volúmenes finitos. Con los resultados obtenidos es posible elaborar mapas de las profundidades del agua, velocidades del flujo y de zonas que podrían verse afectadas y que son útiles sobre todo en materia de protección civil.

Palabras clave: ruptura de presas, CARPA, GiD, modelo bidimensional de flujo a superficie libre, volúmenes finitos, ecuaciones de Saint Venant, proyecto hidroeléctrico La Parota, Guerrero, río Papagayo.

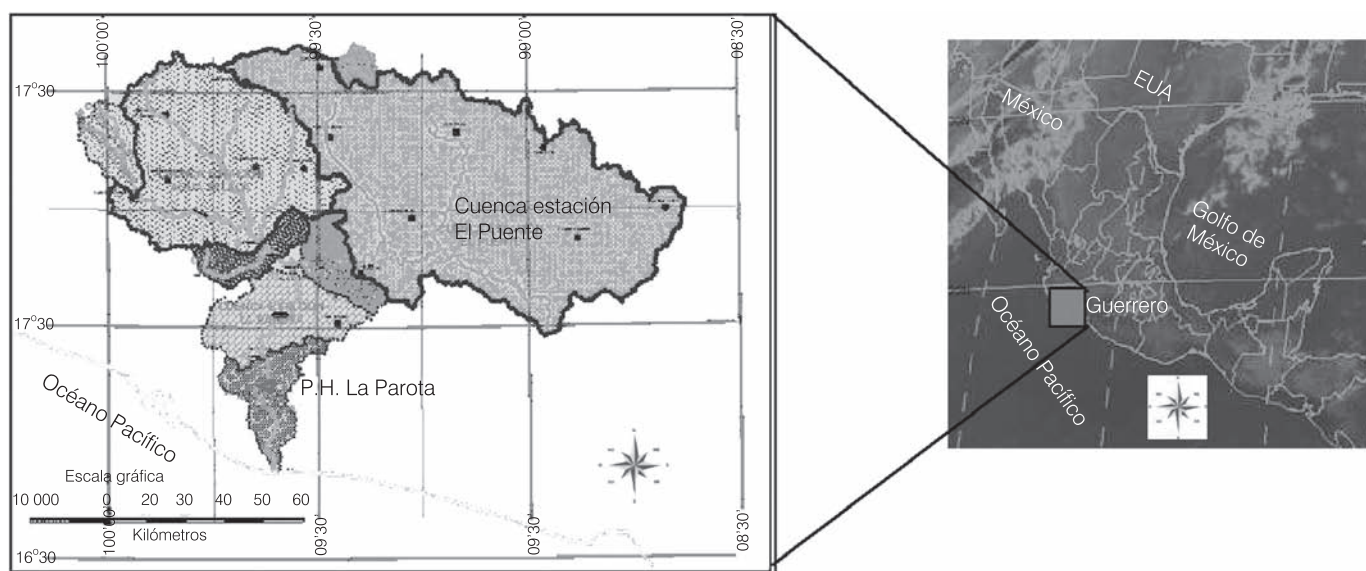
Introducción

El proyecto hidroeléctrico (PH) La Parota de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se ubicará sobre el río Papagayo, en el estado de Guerrero, México, a 28 km en línea recta al NE del puerto de Acapulco, cabecera municipal; desde la cortina hasta la desembocadura, la longitud del cauce principal es de casi 40 km. Sus coordenadas geográficas son 16° 56' 03" de latitud norte y 99° 37' 32" de longitud oeste (ilustración 1). El gasto máximo instantáneo observado en la hidrométrica La Parota, durante todo el periodo de registro, se estimó

en 11 653 m³/s, ocurrido el 26 de septiembre de 1967. El gasto mínimo instantáneo llega a ser nulo, debido a la operación de la presa La Venta, ubicada 35 km aguas arriba de la estación. La cortina de la presa será de enrocamiento, con núcleo de arcilla y cara de concreto; la corona alcanzará la elevación de 180.5 msnm, con altura promedio de 155 m y taludes 1.5:1.

El estado de Guerrero es una zona de alta sismicidad en el país, por lo que un estudio importante que debe considerarse previo a la ejecución del proyecto es el análisis de la posible ruptura de la cortina de la presa, así como el análisis hidráulico de la onda de avenida que se

Ilustración 1. Cuenca del río Papagayo.



presentaría para estimar las profundidades alcanzadas, velocidades de flujo, y tiempos transcurridos, con el fin de identificar posibles planicies de inundación y con ello poblaciones que podrían verse afectadas ante tal evento; dicha modelación suele ser complicada por los posibles cambios del flujo de régimen lento a rápido de un tramo a otro del cauce durante el análisis debido a las variaciones en la geometría del cauce y zonas de gran pendiente, seguidas por otras muy planas, etcétera.

Existe un gran número de ejemplos de estudios para simular la onda asociada con una rotura de presa, tanto en una como en dos dimensiones, usando diferencias finitas o volúmenes finitos, además de ensayos de laboratorio. Algunos relevantes son los de Sleight *et al.* (1998), quienes propusieron un esquema numérico en diferencias finitas y técnicas de *shock capturing* para resolver los cambios de régimen. Viseu y Franco (2000) desarrollaron, validaron y aplicaron el modelo de cálculo *Biplan*, basado en el esquema numérico de MacCormack-TDV aplicado a las ecuaciones de Saint Venant, para simular la propagación de la avenida debido a la ruptura de una presa del río Arade en el sur de Portugal. Valiani *et al.* (2002) usaron un modelo bidimensional en volúmenes finitos, con un esquema del tipo Godunov; mientras Chinnarasri *et al.* (2004) realizaron estudios experimentales para estimar el ancho de la brecha, su tiempo de formación y el gasto de pico de salida por la misma durante la ruptura de un dique, considerando los materiales que lo forman y así determinaron tiempos de evacuación de poblaciones aguas abajo. Nguyen *et*

al. (2006) validaron un modelo bidimensional usando el método de volúmenes finitos no estructurado en varios casos, entre ellos la idealización de una ruptura parcial y total de una presa. En México son escasos los estudios de este tipo.

Metodología

Las ecuaciones generales del flujo en lámina libre son las ecuaciones de Saint Venant. En el presente estudio se utiliza la versión bidimensional de dichas ecuaciones (Bladé y Gómez, 2006), que son válidas para flujos con velocidades verticales pequeñas, pendientes del fondo del cauce suaves y cuando las dimensiones horizontales predominan sobre la vertical. Para su resolución se utiliza la técnica de los volúmenes finitos y el esquema numérico *WAF TVD*, que se puede entender como una extensión de los sistemas de ecuaciones del esquema de Lax-Wendroff, o bien como una extensión de segundo orden de precisión del esquema de Roe, basado en el método de Godunov (Bladé y Gómez, 2006). Éste es un esquema de alta resolución, en el sentido de conseguir la correcta simulación de las discontinuidades (como los frentes de onda) que conserva totalmente el volumen, por lo que es especialmente adecuado para la rotura de presa. En este caso también es fundamental la correcta simulación del proceso de secado y mojado. *CARPA* aborda el problema considerando tres posibles estados para cada elemento: seco no mojado, seco mojado o mojado, y según el estado del elemento se aborda su cálculo de una manera distinta.

Para asegurar la conservación de la masa entre un elemento seco y uno mojado, se considera una corrección en el cálculo de la diferencia de cotas entre ambos elementos, que normalmente sería $\Delta z_{ij} = z_i - z_j$, tal como se indica en la ilustración 2. Sin esta corrección, en un estado de agua en reposo, la pendiente de fondo en el término independiente no compensaría exactamente el gradiente de calados, y el estado de agua en reposo no se mantendría. El algoritmo comentado fue codificado en lenguaje *Fortran* por Bladé y Gómez (2006) resultando el programa *CARPA* (Cálculo en Alta Resolución de Propagación de Avenidas). Como interfaz se usa un *software* pre y postprocesador conocido como *GiD* (www.gidhome.com), el cual fue desarrollado por el CIMNE (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Catalunya, España).

Aplicación

Se utilizaron los datos del modelo digital de elevaciones de la república mexicana disponibles en el sitio web del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), que corresponde a una escala de 1:50000; para las zonas distintas al cauce del río y parte de sus márgenes, para el cauce del río y hasta cerca de un kilómetros en ambas márgenes, se consideraron puntos que incluían la batimetría del cauce realizada por personal de CFE. Se unieron ambos modelos en formato *Grid*, con celdas de 50 x 50 m, usando el *software* *Arc View*. Con ello se creó una malla de triángulos irregulares (TIN) en formato *shape*, que puede ser importado en el *GiD*.

Con base en la mencionada TIN se creó una malla de cálculo no estructurada, que posteriormente se refinó dividiendo las superficies que se apreciaban de gran tamaño (alguno de los lados superaba los 500 m de longitud). De manera adicional, se obtuvo la imagen

de satélite georreferenciada del río Papagayo, desde el sitio de la cortina hasta la desembocadura con GoogleEarth, en formato tif. La imagen se puso como ilustración de fondo para auxiliarse en la asignación de las condiciones iniciales y de contorno. Para las condiciones iniciales se consideró la región de estudio seca, al discurrir que la ruptura podía deberse a cuestiones sísmicas.

Para las condiciones de contorno en la entrada, se utilizó un hidrograma generado bajo la suposición de ruptura rectangular variable en el tiempo, con un ancho máximo de brecha de 120 m y una altura final de la cortina de 30 m; se simplificó el hidrograma tomando sólo algunos puntos del mismo, considerando su gasto de pico del orden de 264 000 m³/s, un tiempo base aproximado de 39 600 s (cerca de 11 horas) y un gasto base de 30 m³/s, los datos del hidrograma se dieron por unidad de ancho. Como condiciones de contorno en la descarga, en este ensayo se consideró salida tipo vertedor, con un coeficiente del vertedor de tres (un poco menor que un valor crítico) y una carga del vertedor igual a cero, tomando en cuenta la topografía del cauce en su salida al mar. Se consideró un coeficiente de Manning promedio de 0.035 en toda la región. Para cumplir con la condición de Courant, el programa *CARPA* ajusta automáticamente el incremento de tiempo. Tras la simulación se pudo identificar la necesidad de revisar la topografía reportada del terreno ante el comportamiento del flujo del agua; el tiempo final de cálculo se estableció a los 90 000 segundos (25 horas); con los resultados que se presentan a continuación.

Resultados y discusión

El hidrograma simulado, con un gasto de pico cercano a los 264 000 m³/s y un tiempo base aproximado de 11 horas (39 600 s), corresponde a un volumen desalojado por la brecha de aproximadamente 3 895 millones de m³; si se considera el caudal unitario (el gasto unitario de pico sería de 2 186 m³/(s.m)), esto corresponde a un volumen unitario de 32.26 millones de m³/m). En la ilustración 3 se presentan los hidrogramas de entrada y salida por todo el dominio del problema.

De acuerdo con la ilustración 3, el tiempo estimado para que inicie la salida del volumen de agua desalojado por la brecha por los contornos con salida asignados es de 5.5 horas (19 800 s). El gasto de pico de salida resulta de 186 329 m³/s, es decir, se presenta una atenuación en el pico de la avenida de 77 671 m³/s; el volumen bajo el hidrograma de salida es del orden de 3 557 millones de m³; por lo que temporalmente se almacena en el área afectada un volumen de 338 millones de m³,

Ilustración 2. Corrección de la pendiente de fondo en un contacto seco mojado.

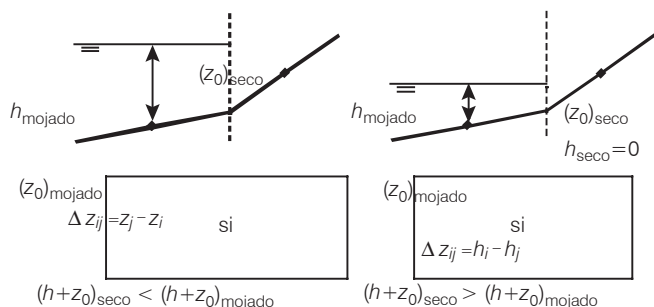
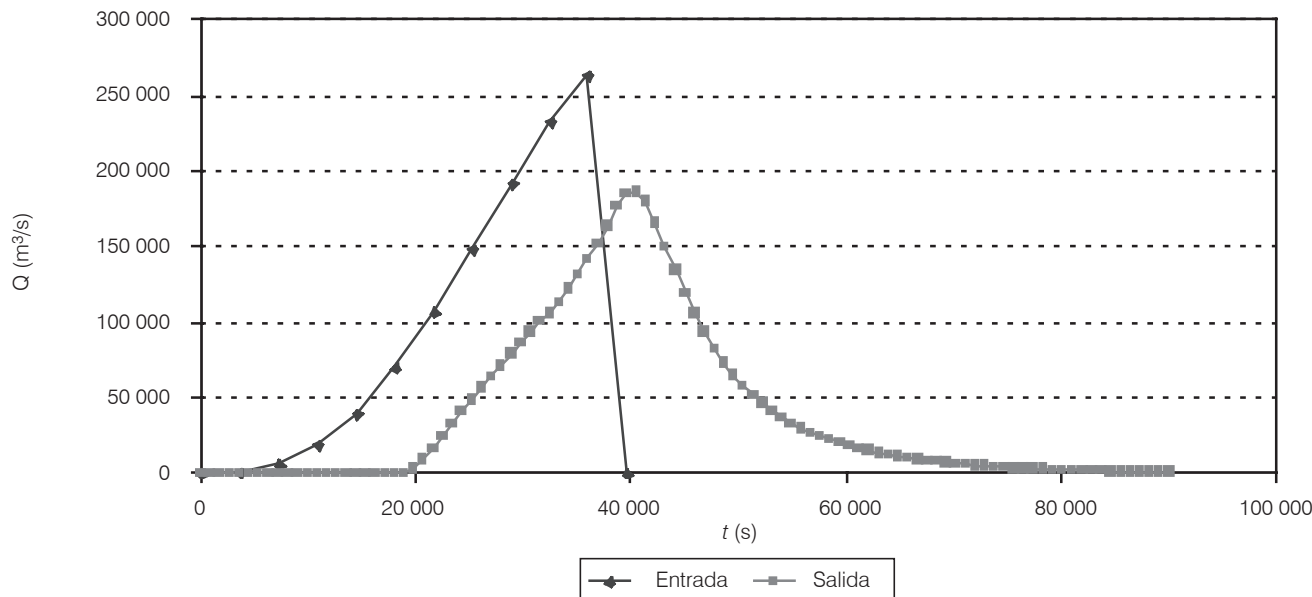


Ilustración 3. Variación del gasto en la entrada y salida del dominio del problema.



repartido entre el canal principal del río y las planicies de inundación.

Con la simulación efectuada se obtuvieron, entre otros resultados, los valores de la cota de la lámina de agua, tirante, velocidad y caudal específico, a cada 900 s; en particular, se hicieron determinaciones de los valores máximos del tirante y la velocidad, con lo que se pueden obtener mapas como los mostrados en las ilustraciones 4 y 5, para estimar el riesgo por inundación en las poblaciones y sitios cercanos al río. Para cada localidad afectada se obtuvieron valores representativos de los máximos tirantes y velocidades que se podrían

alcanzar, y si la afectación de la mancha urbana es parcial o total.

Las consecuencias del inmenso volumen que se desalojaría, en las condiciones supuestas de la ruptura, sería una afectación de 36 poblados, con tirantes máximos, que en los sitios altos podrían ser hasta de 52 m y velocidades máximas en las zonas inundadas con valores hasta de 18 m/s (65 km/h), lo cual da idea de la magnitud del desastre que podría tenerse.

La cantidad de poblaciones afectadas es seis veces mayor que el total de localidades que se podrían ver afectadas durante la operación con la presa al NAME y

Ilustración 4. Mapa de riesgo de tirantes máximos que se podrían alcanzar ante la eventual ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México.

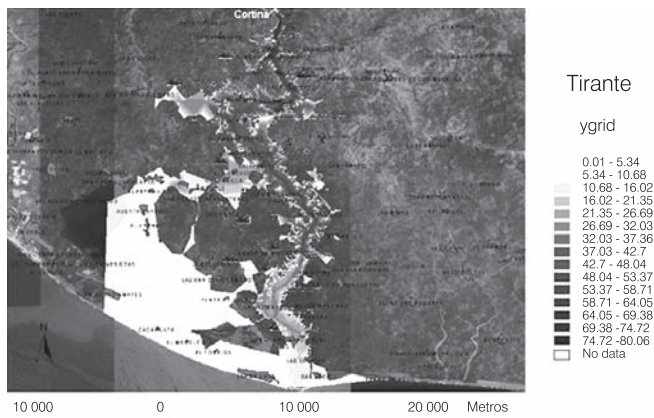
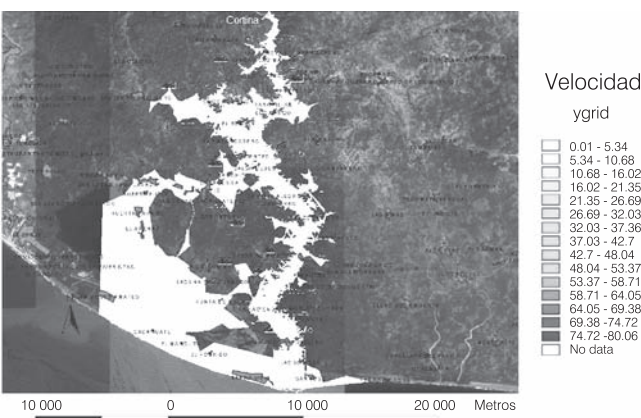


Ilustración 5. Mapa de riesgo de velocidades máximas que se podrían alcanzar ante la eventual ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México.



ante una avenida con periodo de retorno de 10 000 años, según el análisis de flujo bidimensional, con un esquema en diferencias finitas del informe para la Comisión Federal de Electricidad de Fuentes *et al.* (2005). En dicho estudio se estimó que con un hidrograma de entrada, cuyo gasto de pico es de 22 260 m³/s, un tiempo base aproximado de siete días (168 horas, es decir, 604 700 s), producido por la operación de la presa; el 88% del volumen de agua vertido al sistema (río Papagayo en su tramo en estudio) se derramaría antes de la desembocadura.

Los resultados de las simulaciones muestran que la onda de avenida tendría efectos tales que los tirantes que podrían alcanzarse por la eventual ruptura de la cortina del PH La Parota, en algunos sitios podrían ser cercanos al doble de aquellos que se tendrían para la condición de operación en la condición más desfavorable en la época de avenidas (Los Hilamos, Parotillas, Salsipuedes) o incluso ser un poco menores (Teniente José Azueta, Lomas de Chapultepec).

Conclusiones

Con el modelo de flujo bidimensional *CARPA* se hizo una estimación del paso de la onda de avenida por un cauce y las planicies de inundación ante la eventual ruptura de la cortina del PH La Parota, en Guerrero, México. Con los resultados obtenidos se lograron elaborar mapas de las posibles zonas que estarían en riesgo de tener importantes inundaciones, además de una estimación de las velocidades máximas alcanzadas por el flujo. Al hacer una comparación respecto a lo que podría obtenerse para el caso de un hidrograma operativo, con la presa llena al NAME, para una avenida con periodo de retorno de 10 000 años y operando en la época de avenidas, se pudo constatar que el comportamiento de la onda de avenida ante un evento de tal magnitud podría ser de dimensiones catastróficas para las zonas aledañas al cauce. Con los mapas obtenidos es factible desarrollar sistemas de alerta temprana para el oportuno desalojo de la población de los posibles sitios afectados, lo cual sería una herramienta útil para los organismos encargados de la protección civil.

El modelo *CARPA* ha sido validado con éxito en otros casos prácticos de hidráulica fluvial; no obstante, se recomienda corroborar con experimentos

en laboratorio, simulando la onda de avenida que se produciría por la ruptura de la cortina de una presa, con la cual se puedan validar algunos de los resultados de esta simulación.

Recibido: 03/12/2007

Aprobado: 19/12/2008

Referencias

- CHINNARASRI, C., JIRAKITLERD, S. and WONGWISES, S. Embankment dam breach and its outflow characteristics. *Civil Engineering and Environmental Systems*. Vol. 21, no. 4, December, 2004, pp. 247-264.
- BLADÉ, C.E. y GÓMEZ, V.M. *Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado en una y dos dimensiones*. Monografía CIMNE núm. 97. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numérico en Ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya, junio, 2006, 227 pp.
- FUENTES, M.O.A., ROMO, O.M.P., SÁNCHEZ, S.F.J., SANTOYO, G.G.M., DOMÍNGUEZ, M.R., FRANCO, V., GAVILÁN, E.J.J., MAYORAL, V.J.M., DE LUNA, C.F., ARGANIS, J.M.L., PALMA, N.A. y CRUZ G.J.A. *Modelo matemático de la ruptura de la cortina del P. H. La Parota y sus efectos aguas abajo*. México, D.F.: Comisión Federal de Electricidad, diciembre, 2005, pp. 7.1-7.69.
- INEGI. *Modelo digital de elevaciones zona del río Papagayo, México*, 2007 [en línea] <http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>.
- NGUYEN, D.K., SHI, Y.E., WANG, S.S.Y. and NGUYEN, T.H. 2DShallow-Water model using unstructured finite-volumes methods. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASC. March, 2006, pp. 258-269.
- SLEIGH, P.A., GASKELL, P.H., BERZINS, M. and WRIGHT, N.G. An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computers & Fluids*. Vol. 27, no. 4, 1998, pp. 479-508.
- VALIANI, A., CALEFFI, C. and ZANNI, A. *Journal of Hydraulic Engineering*. May, 2002, pp. 460-472.
- WISEU, T. and FRANCO, B.A. *Dam-break flood modelling using uni and bi-dimensional numerical model on a natural river valley*. Eco Jul 00.pdf., 2000, 12 pp. [en línea] http://www.dha.lnec.pt/nre/portugues/funcionarios/papers/tviseu/Eco_Jul00.pdf.

Abstract

ARGANIS, M., BLADÉ, E., DOLZ, J., SÁNCHEZ, M., FUENTES, O.A., FRANCO, V. & DE LUNA, F. Dam wall break simulation by means of a high resolution algorithm applied to the La Parota dam, Guerrero, Mexico. Hydraulic engineering en Mexico (in Spanish). Vol. XXIV, no. 3, July-September, 2009, pp. 101-106.

This document presents a dam wall break simulation of the La Parota hydropower project in Guerrero, Mexico, by means of the CARPA system, which is based in a 2D WAF-TVD (Weight Averaged Flux–Total Variation Diminishing) high resolution finite volume numerical scheme. With the results, it is possible to produce maps containing water depth, flow velocity, and affected zones, which are useful in the civil protection field.

Keywords: dam wall break, CARPA, GiD, 2D free surface model, finite volumes, Saint Venant equations, La Parota Hydropower Project, Guerrero, the Papagayo river.

Dirección institucional de los autores:

Maritza Arganis
Óscar A. Fuentes
Víctor Franco
Faustino de Luna

Instituto de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria
Avenida Universidad 3000
Delegación Coyoacán
04510 México, D.F., México
teléfono: + (52) (55) 5623 3600
fax: + (52) (55) 5616 2164
MArganisJ@iingen.unam.mx
ofm@pumas.iingen.unam.mx
vfr@pumas.iingen.unam.mx
fluc@pumas.iingen.unam.mx

Ernest Bladé
Josep Dolz
Martí Sánchez

Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
E.T.S d'Enginyers de Camins Canals i Ports
Campus Nord UPC Jordi Girona 1-3 D1 E-08034
Barcelona, España
teléfono: + (34) (93) 4017 070
fax: + (34) (93) 4017 357
ernest.blade@upc.edu
j.dolz@upc.edu
marti.sanchez@upc.edu