



## Flood hazard assessment in the Raval District of Barcelona using a 1D/2D coupled model

Beniamino Russo , David Suñer, Marc Velasco, Slobodan Djordjević



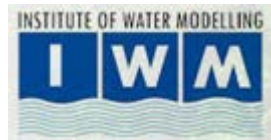
**Beniamino Russo**  
PhD, Civil Engineer



# Introduction about CORFU project

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

CORFU (Collaborative Research on Flood Resilience in Urban areas) aims to improve the practice of urban flood risk management. Through the project, European and Asian cities will learn from each other through the development, investigation and dissemination of strategies that aim to improve flood resilience.







# Introduction about Barcelona Case Study

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

**Collserola mountain**

**Besós River**

**High gradients**

**Llobregat River**

Runoff preferred direction

**Well channelled rivers**

**Low gradients and critical points → FLOODS**

**Mediterranean sea**

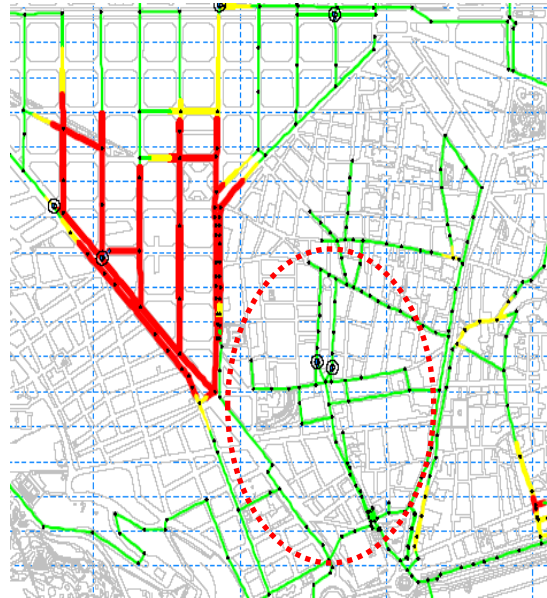
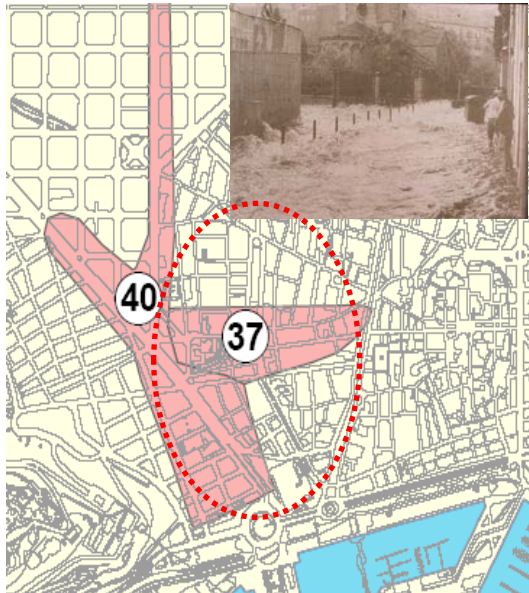


m E 4579666.45 m



# Introduction about Barcelona Case Study

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

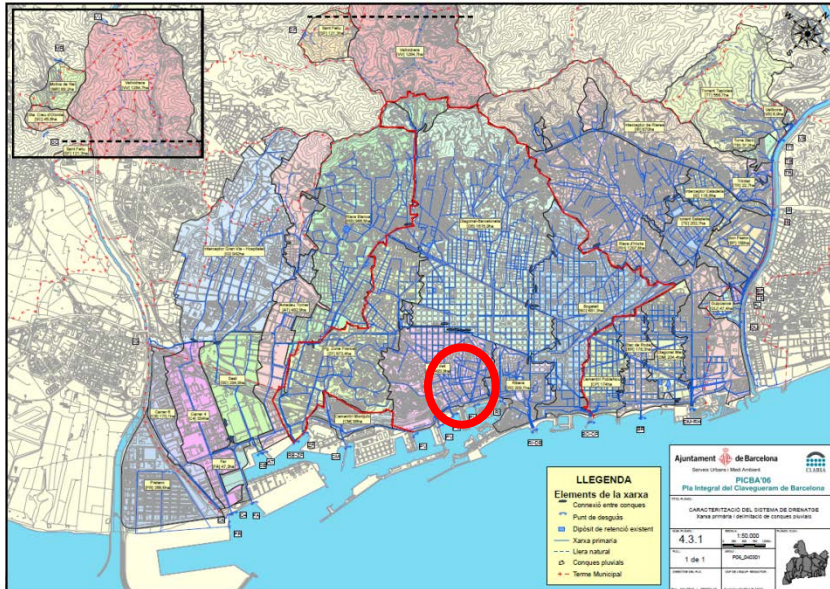


## Raval District

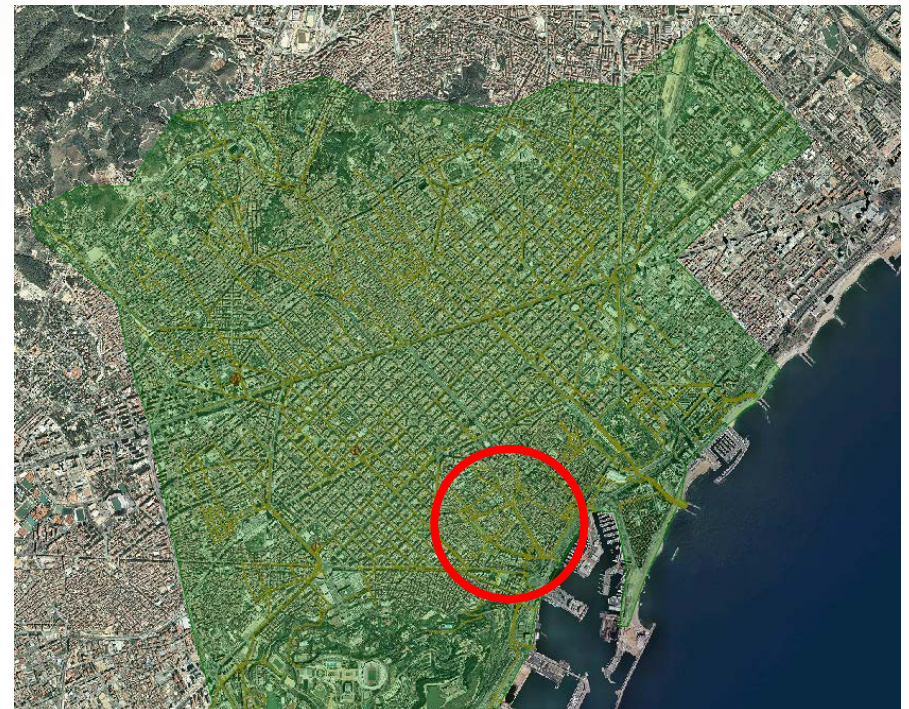
- Spot susceptible to flooding as demonstrated by historical data
- 44000 inh./Km<sup>2</sup>
- High social and economical vulnerability
- Traditional 1D sewer models do not detect flooding problems

# Model setup: main features (I)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

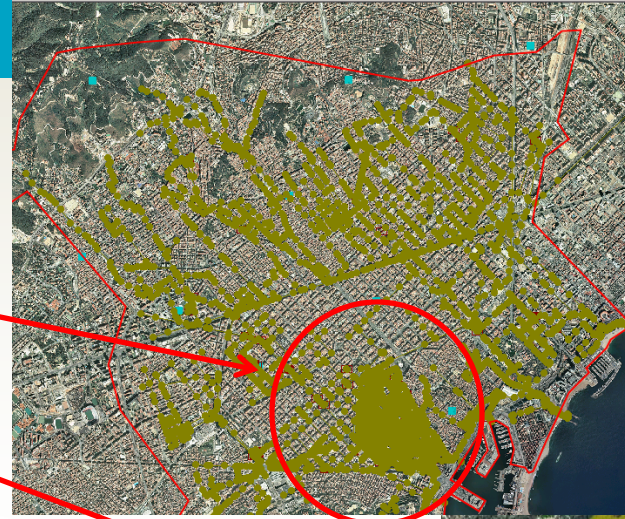


- 1D/2D coupled model through ICM software
- 5 catchments (aprox. 40 Km<sup>2</sup>) involved
- 234 Km of pipes with 3625 manholes



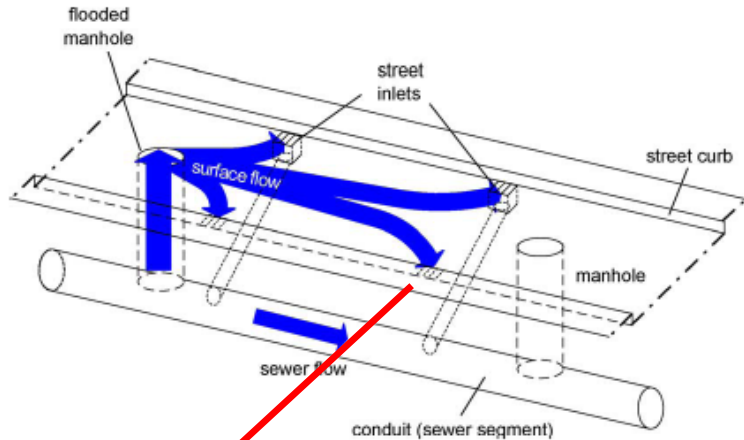
- 35 sluices (fixed and variable)
- 23 weirs and 3 flap valves
- 6 storage tanks with a storage volume of more than 170,000 m<sup>3</sup>

- Creation of 1D/2D **detailed coupled model** with secondary network and microcatchments inside the Raval District for the hydraulic characterization of surface drainage structures
- Definition of the Rainfall-Runoff transformation model (losses and routing models) for the building area
- Definition of the **“2D infiltration zones”** in the 2D mesh. Hydrological characterization of pervious and the impervious areas using the hydrological model of the cells (new feature of the last version of ICM).



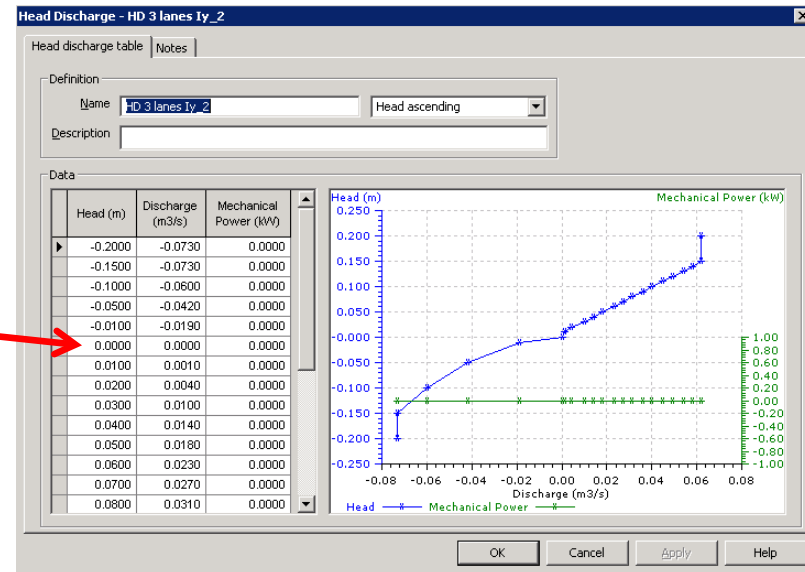
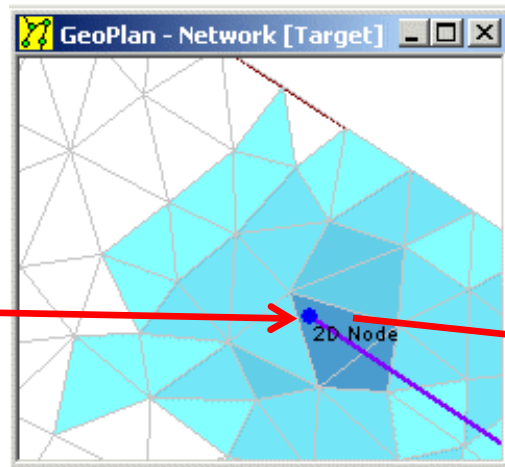
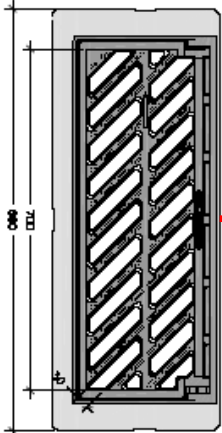
# Characterization of the Surface Drainage Structures (I)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.



## 1D/2D approach

- Rainfall directly falls on cells characterized by a hydrological model
- 1D and 2D models are coupled through Node Type 2D (manholes) or Node Type Gully2D (inlets)
- Gully2D nodes (only in the Raval District) were hydraulically characterized (experimental expressions were used) in order to take into account flow entering into the network and surcharged overflows.

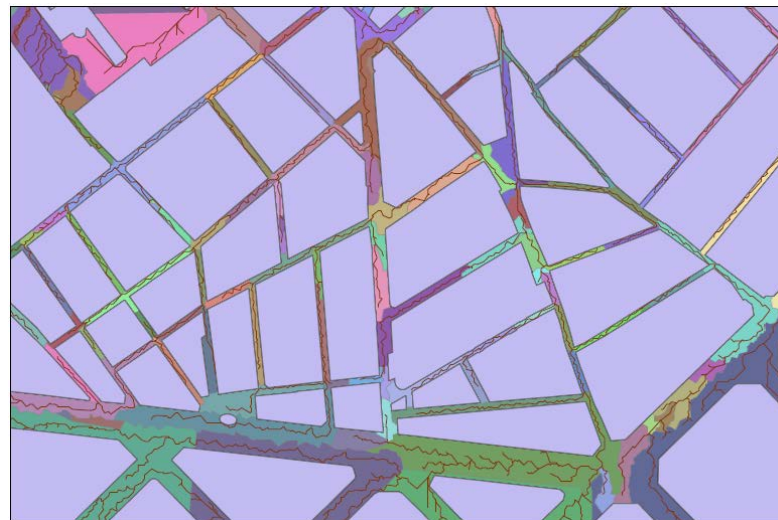
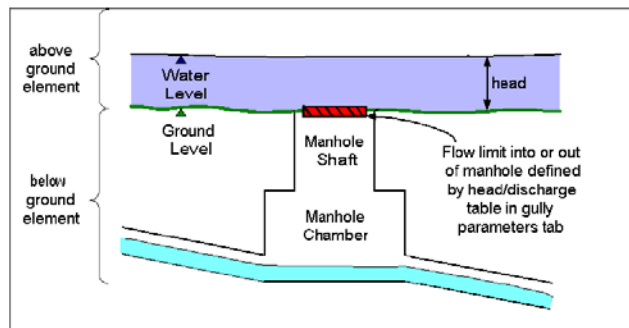
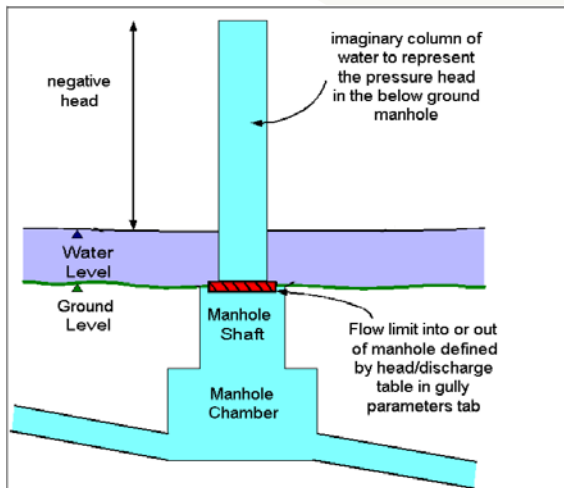


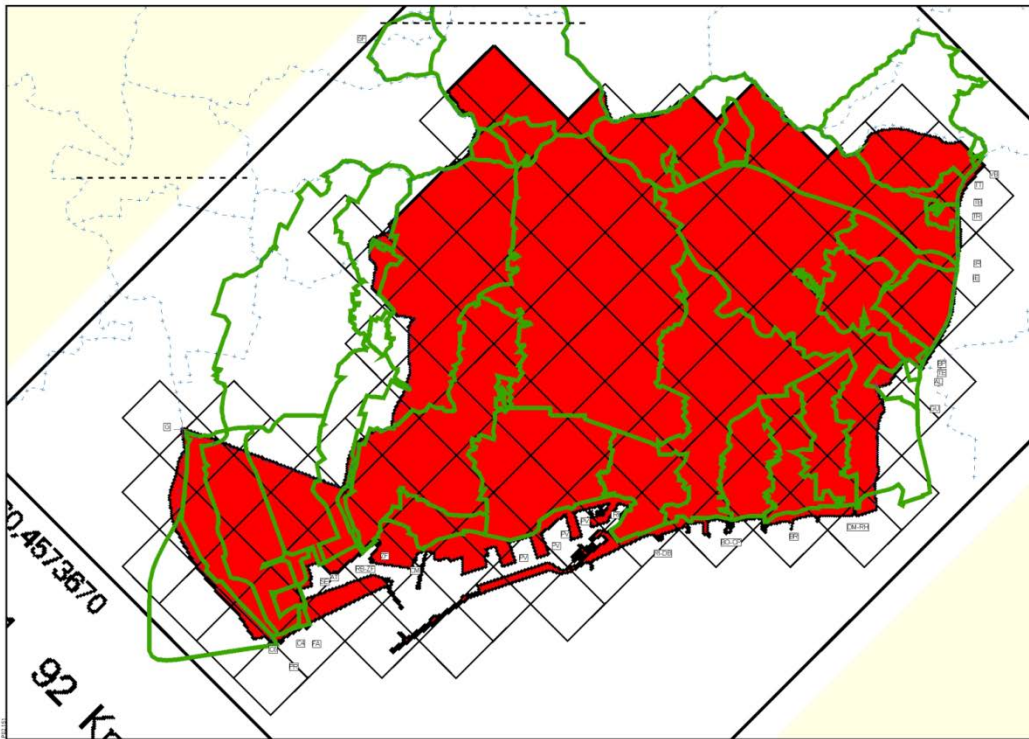


# Characterization of the Surface Drainage Structures (II)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

- Exchange of water between the 2D manhole and the mesh is calculated using a specific “Head/Discharge relationship”
- Overland flow paths and microcatchments in the Raval District
- ICM allows to treat a manhole as a set of inlets defining the “number of equivalent inlets”





- Topographic information was provided by Catalan Institute of Cartography (ICC). DTM covers almost the whole administrative land of the city (92 Km<sup>2</sup>) with a resolution of 1x1 m<sup>2</sup>.



- According to the information provided by ICC, DTM used for this model is characterized by a precision of 15 cm in terms of ground level.



# Calibration of the 1D/2D coupled model (I)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

## Calibration process

- Selection of 3 calibration events
- Selection of 1 validation event
- Rainfall and records time series (flow depths) processing
- Selection and adjustment of the calibration model parameters
- Qualitative calibration related to surface flooded areas, pressured pipes and manholes with overflows
- Collection of field data (reports of policemen, firemen, municipality authorities, etc.) concerning selected events
- Results verification



# Calibration of the 2D/1D coupled model (II)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

## Selection of calibration and validation events

- Due to the recent significant changes of the Barcelona sewer system (new infrastructures like pipes and tanks were built in the last months and regularly work actually), rainfall events were selected in the year 2011. This year was characterized by several heavy rainfall events
- Main characteristics of the selected calibration and validation events

Date event	Cumulative rainfall (mm)	Maximum rainfall intensity in 5 minutes (mm/h)	Maximum rainfall intensity in 20 minutes (mm/h)	Function of the event
15/03/11	54.1	98.4	69.6	Calibration
07/06/11	26.8	49.2	24.3	Calibration
19/07/11	45.9	135.6	95.1	Calibration
30/07/11	30.4	140.4	105.9	Verification

INFORME DE PLUJA RESUMIT

INFORME DE PLUJA RESUMIT

INFORME DE PLUJA RESUMIT

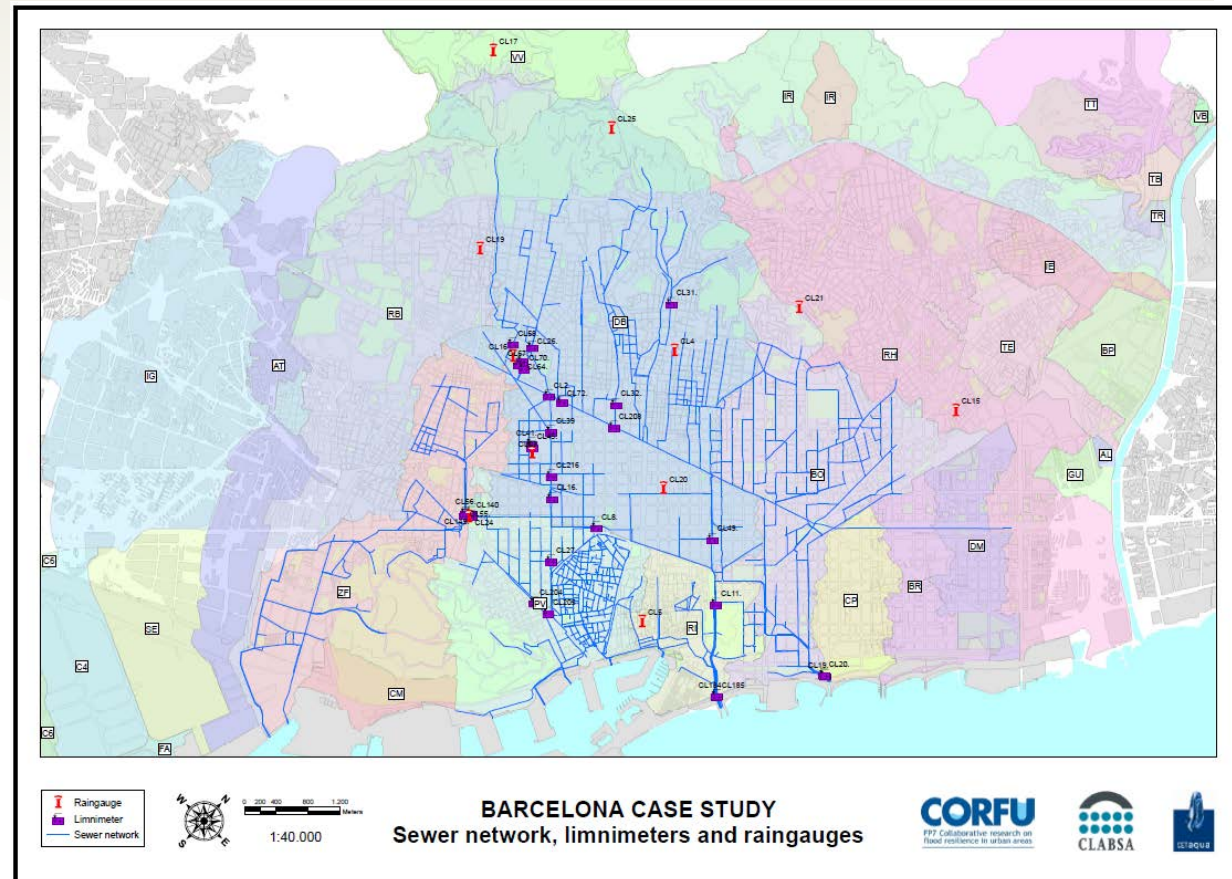
INFORME DE PLUJA RESUMIT

PERÍODE: del 30 de Juliol de 2011 00:00 (UTC) al 31 de Juliol de 2011 00:00 (UTC)

NOM DEL PLUVIÒMETRE	SITUACIÓ	P (mm)	I <sub>max</sub> <sup>5</sup> (mm/h)	I <sub>max</sub> <sup>20</sup> (mm/h)	P Ànual (mm)
CL1 Centre Pau Casals (Canyelles)	Nou Barris	35,1	111,6	77,4	481
CL2 Escola Catalunya	Poble Nou	22,7	64,8	41,7	462
CL3 Facultat de Física	Zona Universitària	23,5	48,0	42,9	425
CL4 Ajuntament, Plaça Laseps	Gràcia	37,2	117,6	90,9	482
CL5 Ajuntament Edifici Novíssim	Ciutat Vella	32,9	120,0	80,7	466
CL6 Escola Barkeno	Passatge Zona Franca	58,6	192,0	148,5	499
CL7 AGBAR Central Cornellà	Cornellà	18,8	50,4	33,3	404
CL8 AGBAR Central Besòs	Torre Baró	19,0	51,6	36,0	425
CL10 FCC Zona Franca	Zona Franca	46,1	142,8	113,4	475
CL11 CLABSA	Fira 2	44,3	135,6	106,8	496
CL12 Dipòsit Taulat	Forum	20,5	87,6	47,1	405
CL13 Poliesportiu Nova-Ícaria	Vila Olímpica	33,7	129,6	92,4	543
CL14 Castell Montjuïc	Montjuïc	29,6	117,6	70,5	518
CL15 Centre Cívic Sagrera	Sagrera	17,6	84,0	37,2	489
CL16 Cotxeres de Sants	Sants	44,4	123,6	86,7	540
CL17 Escola Nubi (Valldorada)	Valldorada	13,2	24,0	19,2	488
CL18 Palau de les Heures	Vall d'Hebron	44,3	124,8	97,5	587
CL19 Ajuntam. Sarríà-Sant Gervasi	Sarríà	30,8	94,8	72,0	534
CL20 Casa Elzalde	Eixample Dret	45,0	140,4	105,9	573
CL21 AGBAR Turó de la Rovira	Turó de la Rovira	28,1	123,6	67,5	509
CL22 Torrent Estadella	Bon Pastor	13,9	67,2	30,0	468
CL23 Dipòsit Escola Industrial	Eixample Esquerra	23,5	109,2	56,7	455
CL24 Dipòsit Joan Miró	Plaça Espanya	23,3	141,6	62,1	520
CL25 Observatori Fabra	Tibidabo	23,3	64,8	45,0	537
Valor representatiu conjunt Barcelona		30,4	102,8	69,2	491

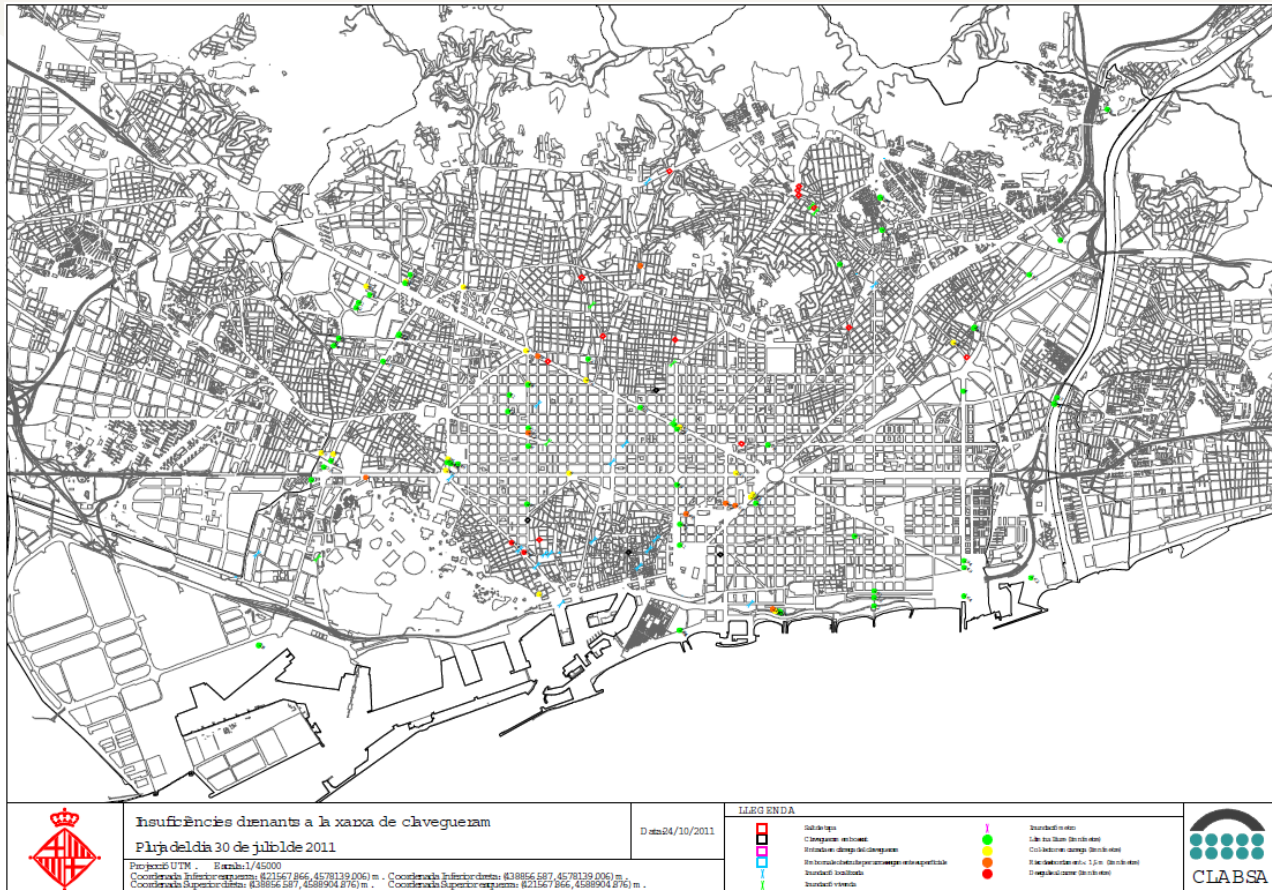
## Rainfall and records time series (flow depths) processing

- Data concerning rainfall time series related to 11 selected rain gauges were processed (CLABSA rain gauges network counts 24 measuring equipments).
- Data concerning flow depths time series related to 29 limnimeters were processed (CLABSA counts more than 100 limnimeters in the sewer system)



## Collection of field data

- Reports and plans summarizing the effects of the selected events





# Calibration of the 2D/1D coupled model (IV)

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

## Collection of field data

- Images and video recording the effects of the selected events
- Newspaper articles concerning the effects of the selected events

### METEOROLOGÍA

El episodio de lluvias ocurrido el sábado fue breve en el tiempo, pero de una intensidad que tan sólo se produce cada sesenta y siete años

## Tormenta inolvidable

**MÁXIMA INTENSIDAD**  
En cinco minutos, sobre una zona de la ciudad crearon el sábado 80 litros por metro cuadrado. Fue una tempestad atípica, pero que la intensidad con que se manifestó no ocurre más que una vez cada 67 años.

Los datos facilitados ayer por el Ayuntamiento de Barcelona sobre el temporal de lluvia en esta ciudad, fue una tormenta breve, pero de gran intensidad. De media, las precipitaciones fueron de 80,4 litros por metro cuadrado, pero en algunos puntos llegaron a más de 100 litros por metro cuadrado en cinco minutos y en otros de 20 a 30 litros por metro cuadrado en veinte minutos.

El lugar donde más agua se recogió fue el que es de la zona Franca, con 516,6 litros por metro cuadrado. Aquí también fue el lugar de máxima intensidad de lluvia en veinte minutos, con un promedio que sólo se da una vez cada 67 años.

**REGIÓN DE AGUA**  
Las precipitaciones llenaron los depósitos pluviales hasta el 60%.

**PREPARACIÓN EN EL MAR**  
Las playas de Barcelona lucieron ayer bandera amarilla.



El sol volvió a brillar en la playa de la Avenida. Lluís Company

haya, la mayor precipitación cayó en Badalona (92 l/m<sup>2</sup>), seguida de Cornellà del Llobregat (87 l/m<sup>2</sup>) y Vilanova del Vallès (84 l/m<sup>2</sup>). La ciudad de Barcelona recibió la jornada del temporal a recuperar la normalidad. Los diferentes servicios que se vieron afectados por este temporal se reparan lo más pronto posible. A las 10 de la mañana, la estación de Renfe consiguió devolver al servicio de las 400 unidades de alta velocidad que se habían quedado sin fluido eléctrico por la tormenta, especialmente de Paral·lel, Clot Vell, Sagratí y Sant. También el servicio ferroviario se restableció, tras los cortes sufridos en las líneas de Renfe entre Mataró y Arenys de Mar y entre las estaciones



Una niña recoge resaca de árbol caída por las lluvias

### 34 Gran Barcelona



Un joven juega en la lluvia en la plaza O'Farrill

Un árbol caído en la acera de las calles de Cornellà de Cardener



Un coche de bomberos y varios coches en una zona del Mar de Mar

## Una tormenta bate el récord de intensidad de lluvia en BCN

Las precipitaciones inundaron el Paral·lel y afectaron a paradas de metro y Rodalies

**El récord**  
El Paral·lel, inundado y con los adoquines con crecientes arrastrados por el agua, comenzó ayer por la tarde la normalidad de la tramba de agua que cayó sobre la ciudad y que durante veinte minutos batió el récord de intensidad local. La tormenta dejó también muchas paradas de metro y de Rodalies.

En general, las cantidades de lluvia no fueron excepcionales, pero sí la intensidad. Según el meteorólogo Albert Rodríguez Pico, en un observatorio de la zona de Sagratí se registró durante 5 o 10 minutos una intensidad récord que, si se hubiera mantenido una hora, hubiera alcanzado los 500 litros, superando el mayor re-



Un coche parado en medio de un punto inundado en L'Hospitalet

grado que se puso en marcha a como la noche cuando también entraron en la Franja del Vallès y el Maresme, donde por el Barcelonés y después por el de Sabadell y el de Sant Joan de Vilatorrada se registró el mayor mareo de agua en una hora: 42 por metro cuadrado en Sabadell, en Cardener y 30 en Sant Joan de Vilatorrada.

**El Periódico**  
Elaboración de datos meteorológicos en <http://www.periodico.com>

### AGUACERO DE MADRUGADA EN LA CAPITAL CATALANA

## BCN dobla en un día la media de lluvia del mes

Caen en una hora hasta 80 litros por metro cuadrado, que causaron inundaciones

### EL PERIÓDICO

La intensa lluvia que azotó la madrugada de ayer a la capital catalana, entre 60 y 80 litros por metro cuadrado, mientras la media de todo el mes de julio está en 30, causó la mañana de ayer algunos problemas en el transporte público. La li-

nea de metro más afectada fue la L-4, donde se inundaron las estaciones de Verduguer y Bogatell. A las 06.11 horas se cerró por esta causa la primera estación, que reabrió a las 07.26. La de Bogatell, por su parte, estuvo cerrada entre las 06.34 horas y las 06.50. En ambos casos se habilitó un servicio de autobuses para el tramo afectado. En cuanto al ferrocarril, la peor parte se la llevó la línea 2 de Rodalies. La acumulación de agua entre las estaciones de paseo de Gràcia y Sants paralizó la circula-

ción de trenes en ambas direcciones entre las dos estaciones, lo que provocó retrasos de más de media hora en las líneas R2 sur y R2 norte y en los Media Distancia.

El temporal de agua provocó también cortes de suministro eléctrico en varias zonas de la capital catalana. Los más afectados fueron los barrios del Guinardó y Sagrera, así como el Baix Llobregat.

**OTRA AVERÍA EN LA L-1** Para rematar la catenaria en la estación de Urgell cortó entre las 16.42 y las 19.24 horas de ayer el servicio en la L1 entre las estaciones de Clot y Espanya, tramo en el que se habilitó un servicio alternativo de autobuses.



## Selection of calibration model parameters

- Runoff model parameters for building areas globally affecting the calibration of all catchments

Surface classification type	Roughness factor	Hydrological losses model	Surface type	Initial loss value	Initial infiltration rate $f_0$	Residual infiltration rate $f_\infty$	Decay constant $k$	Recovery constant $k'$
	$s \cdot m^{-1/3}$			$m$	$mm/h$	$mm/h$	$s \cdot m^{1/3}$	
Road	0.013	Fixed	Impervious	0.000071				
Roof	0.013	Fixed	Impervious	0.000071				
Pervious	0.2	Horton	Pervious	0.002	108	7.2	0.043	0.108

- Overland flow calibration parameters for the main sewer model
  - Maximum triangle area: 25 m<sup>2</sup>
  - Minimum virtual element area: 10 m<sup>2</sup> (in order to adapt the mesh to the urban topography, model reduce this area automatically to very small cells (less than 1 m<sup>2</sup>))
  - Manning's roughness: 0.015 s/m<sup>1/3</sup> for impervious areas and 0.020 s/m<sup>1/3</sup> for green areas (Sensitivity analysis was carried out in order to study the influence of Manning roughness ranged from 0.013 to 0.020 s/m<sup>1/3</sup>)
  - Minimum angle: 25 degree
  - Boundary points: Critical conditions
  - Mesh summary: 403,925 triangles





# Sensitivity analysis on the overland flow

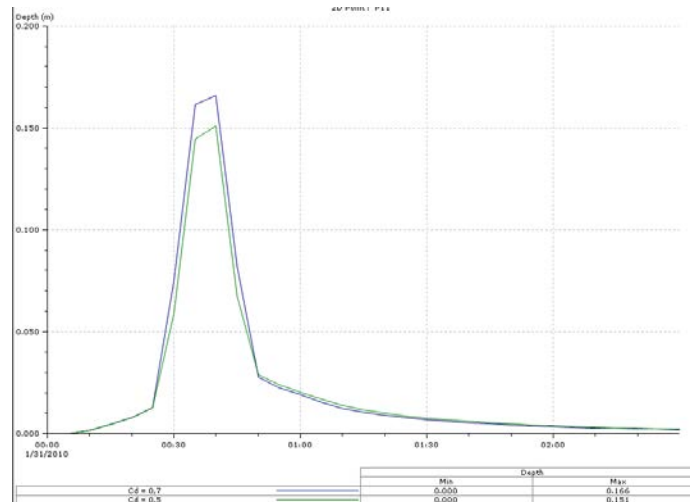
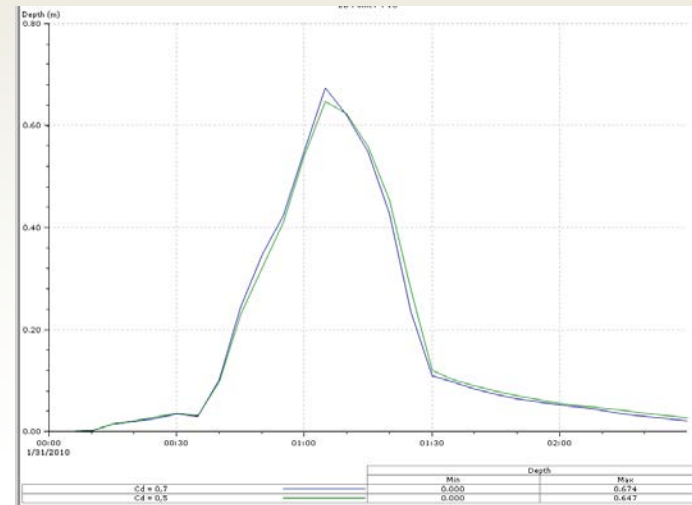
CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

## Main parameters

- Modelling of buildings
- Mesh density

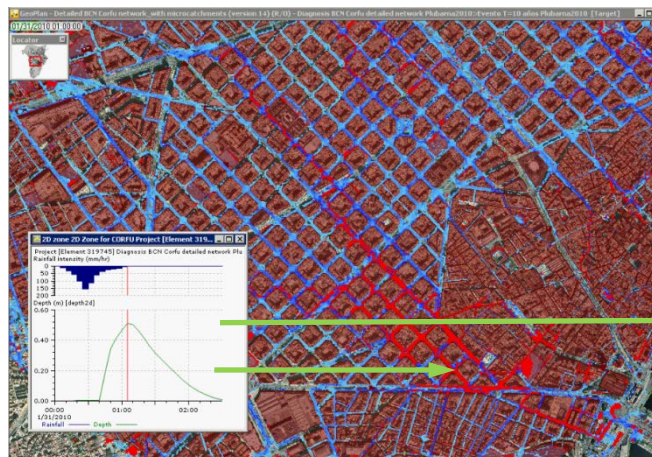
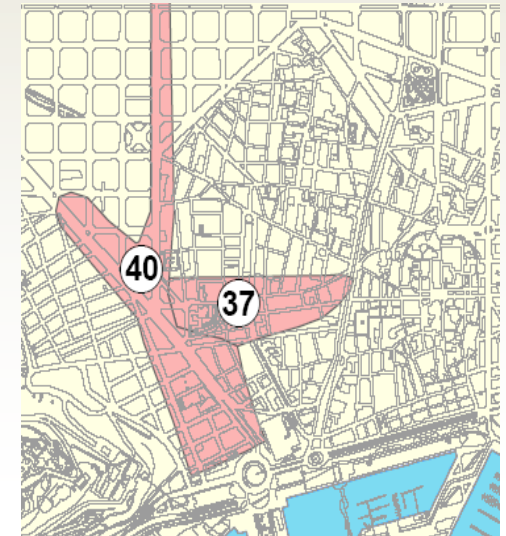
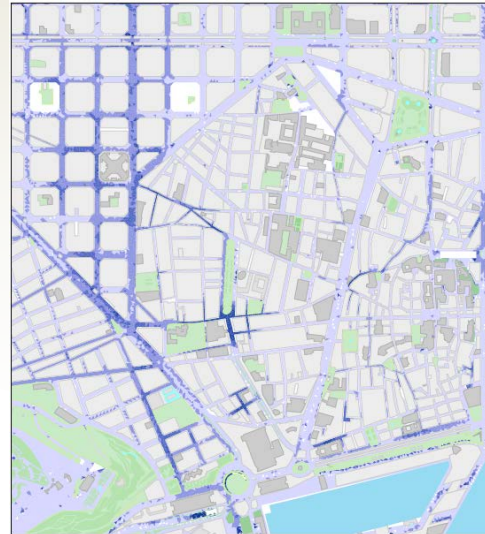
## Secondary parameters

- Manning roughness
- Discharge coefficient applied to 2D manhole



## Qualitative calibration

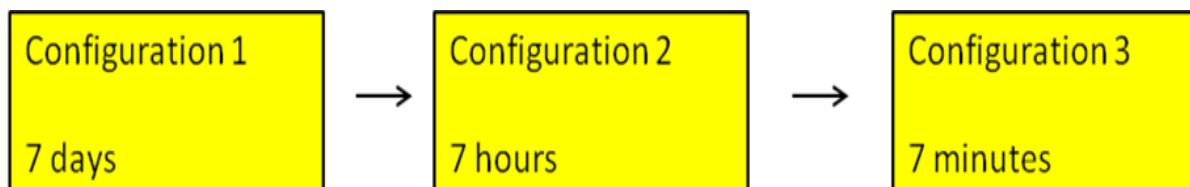
- Results of the models were compared to historical data and field data (videos and images associated to the last heavy storm events)
- Flooded areas and flow depths are shown respect to historical and field data



Historically 1D/2D coupled models were considered too computationally demanding, so its use was restricted to those parts of the catchment where overland flow pathways could be multi-directional or could not be easily defined.

In this case study a computational analysis was carried out considering the following hardware configurations for a specific simulation of 3 hours, with storm duration of 1 hour:

- ◉ Workstation with 64-bit operating system (Windows 7) and 2Gb of RAM memory.
- ◉ Virtual server in a blade system with 64-bit operating system (Windows 7), 2Gb of RAM memory and 4 CPU Intelxeon in order to exploit the ability of ICM to support full multi core processing.
- ◉ Workstation with 64-bit operating system (Windows 7), 2Gb of RAM memory, 4 CPU Intelxeon for multi core processing and a specific GPU card that play an important role during the treatment of the 2D calculations.







## Conclusions

CLAVEGUERAM DE BARCELONA, S.A.

- In the framework of 7th FP CORFU project, the hydraulic behavior and flood resilience of a critical area of Barcelona (Raval District) is analyzed. A 1D/2D coupled model was developed and the interface between the two drainage layers was characterized through empirical expressions related to hydraulic performance of surface drainage systems.
- Calibration and validation of the model were based on the data (rain gauge data, time series of flow depths recorded by water level gauges, reports and videos concerning flooded areas) related to 4 heavy storm events occurred in 2011. The obtained results show that it is possible to reproduce the effects of urban floods in the Raval District in a more realistic way than traditional 1D sewer flow simulations.
- Flood hazard maps concerning specific hazard criteria related to flooding in urban areas, have been elaborated for several return periods.
- Sensitivity analysis was carried out indicating the poor influence of the roughness and the discharge coefficient of the manholes on the 2D flow parameters.
- A specific analysis on the computational time proved that it is possible to carry out simulations in few minutes. This aspect allows to use simulation results for real time strategies and early warning systems.
- The next step in this research is to incorporate the results of hydraulic modelling (for a range of scenarios) with a flood damage assessment tool.