

## SISTEMA TRANSFRONTERIZO DE RESPUESTA RÁPIDA DESPUES DE UN TERREMOTO EN EL PIRINEO ORIENTAL

X. Goula<sup>(1)</sup>, B. Colas<sup>(2)</sup>, J. A. Jara<sup>(3)</sup>, N. Romeu<sup>(3)</sup>, P. Dominique<sup>(2)</sup>, T. Susagna<sup>(1)</sup>, J. Irizarry<sup>(1)</sup>, O. Sedan<sup>(2)</sup>, S. Figueras<sup>(1)</sup>, C. Olivera<sup>(1)</sup> y A. Roca<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Institut Geològic de Catalunya (IGC), [x.goula@igc.cat](mailto:x.goula@igc.cat)

<sup>(2)</sup> Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

<sup>(3)</sup> GeoCat

### RESUMEN

Los sistemas de información sísmica que existen actualmente en Europa generan una cantidad muy limitada de información útil. Con el propósito de mejorar esta situación se ha desarrollado un sistema demostrativo de Información Sísmica Automática Regional de Daños (proyecto ISARD) para una región transfronteriza del Pirineo Oriental, que incluye Cataluña, Andorra y el Departamento de Pirineos Orientales en Francia. Un sistema de información en tiempo real basado en una red sísmica VSAT había sido desarrollado en una primera fase en Cataluña. Este sistema se está ampliando para cubrir una región transfronteriza, con la incorporación de tres nuevas estaciones acelerométricas en Francia y una en Andorra para un total de 19 estaciones de la red sísmica VSAT.

Este proyecto ha sido financiado parcialmente por FEDER, por el ministerio francés del Medio Ambiente y por el departamento de Política Territorial y Obras públicas de la Generalitat de Catalunya. El sistema permite generar en pocos minutos después de producirse un terremoto una nota informativa con la estimación de los posibles daños a personas y edificios, destinada a los servicios de Protección Civil encargados de gestionar la crisis. Los escenarios de daño se basan en metodologías estadísticas para la evaluación de la vulnerabilidad y se representan mediante técnicas SIG. Este sistema automático de información sísmica puede contribuir a la mejora de la gestión de la crisis, compartiendo los medios disponibles por los distintos actores de Protección Civil de acuerdo a la evaluación transfronteriza, y por tanto coherente, de los daños esperados.

### SUMMARY

The seismic information systems that exist at the present time in Europe generate a limited amount of useful information. With the purpose of improving this situation a demonstrative Regional Automatic Seismic Damage Information system (ISARD project) has been developed for a border region in the Eastern Pyrenees that include Catalonia, Andorra and the French Department of Pyrenees Orientals. A real time information system based on a VSAT seismic network has been developed as a first phase in Catalonia. This system is being extended to cover the border region by adding 3 new accelerometric stations in France, 1 in Andorra for a total of 19 seismic stations in the seismic network.

This project is partially financed by FEDER, the French Environment Ministry and the Catalan Public Works Department. The system allows generating, automatically a few minutes after the earthquake, an informative note with the estimation of the possible damages to persons and building stock for Civil Defence crisis managers. The damage scenarios are defined following statistical vulnerability assessment methodologies applied to the municipality scale using GIS techniques. This automatic seismic information system can contribute to enhance the management of the crisis, sharing each country's first-aid organizations according to a cross-border coherent evaluation of expected damages.

## Introducción

La región pirenaica, localizada en la frontera entre España y Francia, es una de las zonas sísmicas más activas de estos dos países. Su sismicidad histórica y los datos tectónicos recientes indican un nivel importante de peligrosidad sísmica. Terremotos con magnitudes entre 4.5 y 6.5 han causado daños en el pasado. Desde 2004, el proyecto ISARD: Sistema de Información Sísmica Automático Regional de Daños (Goula, 2007) ha estado estudiando la peligrosidad y la vulnerabilidad sísmica de esta región para definir un esquema común para la creación de escenarios riesgo sísmico que sobrepasen las fronteras de estos países, y proporcionar así, información preventiva y operacional sobre el riesgo sísmico a las organizaciones locales de primeros auxilios y de la gestión de la crisis.

## Objetivos

Uno de los objetivos principales del proyecto ISARD es permitir la difusión rápida de una nota informativa con la información del terremoto "en tiempo real" a las agencias de gestión de la crisis sísmica, incluyendo una estimación del daño que se puede esperar debido al terremoto. En la actualidad, un sistema en tiempo real está funcionando en Cataluña para enviar un mensaje SMS con información sobre la localización y la magnitud del terremoto. El sistema que se está implantando en el Pirineo Oriental permitirá mejorar este sistema, con la posibilidad de una rápida difusión (algunos minutos después del terremoto) a las agencias de protección civil de una nota informativa con la valoración de los posibles daños a ambos lados de la frontera en la zona oriental del Pirineo.

## Red Sísmica VSAT

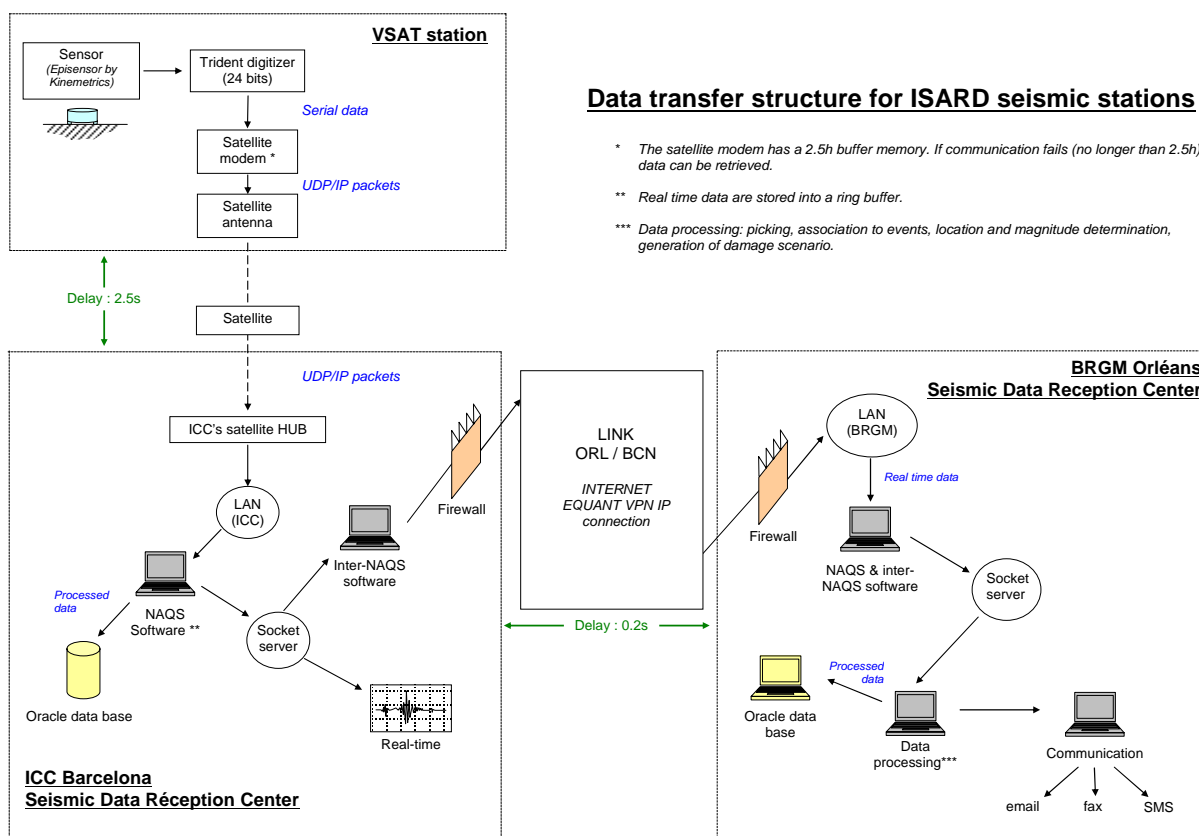
Un sistema en tiempo real basado en una red sísmica VSAT se ha desarrollado inicialmente en Cataluña (Goula et al., 2001) y se espera que sea operacional al final del proyecto en una región extendida que cubrirá también a Andorra y el Departamento de Pirineos Orientales en Francia al añadir 3 nuevas estaciones acelerométricas en Francia y 1 en Andorra para un total de 19 estaciones sísmicas en el conjunto de la red.

Actualmente (marzo de 2007), son operativas 13 estaciones de campo (Figura 1), con sensores de banda ancha STS-2 y CMG-3T, junto con el centro de recepción y proceso de datos. Cuatro estaciones más están en proceso de instalación, tres de ellas en el Sur de Francia equipadas con epi-sensor de la firma Kinometrics. Se prevé que todas ellas sean operacionales a finales de 2007.

En la Figura 2 se muestran vistas de la estación de CASSA (CCAS en la Figura 1), con un sensor en fondo de pozo dentro de la caseta, paneles solares y una antena VSAT y de la estación de NEBIAS (FNEB en la Figura 1) con toma de corriente de 220V, cámara para el sensor y una antena VSAT. Todas las estaciones están provistas de protecciones ambientales y eléctricas de alto rendimiento

Las estaciones se basan en plataformas VSAT que envían en continuo los datos sísmicos en tiempo real (unos segundos de retraso) vía satélite al Centro de recepción y proceso de datos del Institut Cartogràfic de Catalunya e Institut Geològic de Catalunya (ICC e IGC, respectivamente) en Barcelona (España) y de allí al BRGM en Orleans (Francia), vía una red privada virtual segura ("VPN") que usa protocolo IP (Figura 3).





**Data transfer structure for ISARD seismic stations**

- \* The satellite modem has a 2.5h buffer memory. If communication fails (no longer than 2.5h), data can be retrieved.
- \*\* Real time data are stored into a ring buffer.
- \*\*\* Data processing: picking, association to events, location and magnitude determination, generation of damage scenario.

Figure 3: Estructura de la transferencia transfronteriza de datos para la red sísmica VSAT ISARD

**Sistema de Detección Automática (DAS)**

El sistema de Detección Automática, DAS, se ha creado a partir de módulos del Software Automatic Earthworm (USGS, 2005) adaptados a los requisitos del proyecto ISARD y de la red sísmica VSAT (Romeu et al., 2006), es decir:

- i) procesar en tiempo real las señales sísmicas procedentes del software de adquisición de Nanometrics (NAQS);
- ii) considerar las funcionalidades del algoritmo de disparo,
- iii) asociar disparos que sean coherentes,
- iv) localizar el hipocentro y archivar en la base de datos,
- v) calcular los valores máximos de la aceleración y velocidad a partir de los registros sísmicos.

Un diagrama simplificado de la arquitectura propuesta se muestra en la Figura 4.

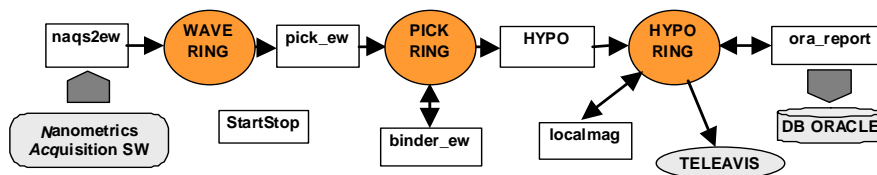


Figure 4: Diagrama simplificado de los módulos de Automatic Earthworm instalados en la red ISARD

Se ha llevado a cabo la configuración de los siguientes módulos *Automatic Earthworm* (EW):

- i) *Pick\_ew*: los parámetros del algoritmo de STA/LTA (Allen, 1978) se han adaptado a las condiciones de cada estación: ruido, tipo de sensor, etc., para producir disparos, incluso en eventos de pequeña magnitud, tratando de evitar los falsos disparos.
- ii) *Binder\_ew*: este módulo identifica eventos sísmicos de una manera coherente y rápida, a partir de los disparos declarados como primeras llegadas (fase P). El algoritmo se basa en una coincidencia espacio-temporal de las diferencias del tiempo de los disparos (cruce de hiperboloides). En el caso que más de 4 disparos sean coherentes se declara un nuevo evento y se calcula un hipocentro preliminar. Este hipocentro se utiliza como primera solución para un proceso iterativo de localización (HYPOINVERSE-2000, Klein, 2002). Finalmente el módulo puede decidir si el evento es válido o no, en función del número de fases, el valor del RMS, etc.
- iii) *Localmag*: este módulo utiliza los tiempos de recorrido correspondientes a las fases escogidas para estimar la longitud del registro que se conservará para cada componente horizontal de todas las estaciones. De los registros considerados, el algoritmo filtra el "offset" y procede a la corrección instrumental antes de obtener un registro Wood-Anderson simulado. La magnitud local  $M_l$  final se estima a partir del promedio de las magnitudes calculadas en todas las componentes horizontales seleccionadas.

### **Generación de escenarios de daño y del mapa de valores máximos del movimiento del suelo automáticos (TELEAVIS)**

TELEAVIS es una aplicación diseñada para la generación automática de informes, a partir de los parámetros focales de los terremotos detectados y localizados por el módulo DAS, para su difusión por telefax, SMS, ftp y correo electrónico. A partir de los resultados obtenidos por el módulo DAS, TELEAVIS prepara un mapa con la localización del epicentro y planimetría a escala 1:250000, varios mapas con los resultados de los escenarios de daños, y mapas con los valores máximos del movimiento del suelo registrados en las estaciones de la red.

Los escenarios de daño se realizan con las metodologías propuestas por Susagna et al. (2006); Roca et al. (2006) y las definidas en el proyecto ISARD (Irizarry et al., 2007). La metodología puede definirse según las siguientes etapas:

- i) Una vez se han determinado la localización y la magnitud del sismo, es posible dar una estimación de la intensidad epicentral a partir de una correlación realizada con datos regionales entre la magnitud y la intensidad epicentral.
- ii) Se ha procedido al ajuste de una relación de atenuación a datos macrosísmicos regionales. En esta primera versión se utilizan isosistas circulares. Además la hipótesis de una fuente puntual limita la validez del método a terremotos de magnitudes inferiores a 6.5, para los que es necesario considerar el tamaño de la ruptura a distancias próximas.
- iii) Evaluación de los daños sobre los edificios y sobre las personas. Se hace una estimación del número de edificios que resultarían inhabitables, el número de personas que quedarían sin hogar y el número de personas heridas de distinta gravedad. Se utilizan los valores medios de ocupación de los edificios (habitantes/edificio) para estimar el número de víctimas utilizando datos de

terremotos destructores (ATC-13, 1985) considerando la distribución de daños en edificios y el censo de población.

Para el cálculo automático del escenario de daños se utilizan dos métodos en función del grado de disponibilidad de los datos.

### **Escenario automático transfronterizo de daños de Nivel 0**

El método simplificado, o de Nivel 0, se basa en las hipótesis siguientes:

- i) la unidad de trabajo es el área total del municipio,
- ii) no se considera el posible efecto de amplificación de suelos,
- iii) se usa las definiciones de la escala EMS-98 para definir clases de vulnerabilidad y matrices de probabilidad de daño.

El escenario automático de Nivel 0 se aplicó en una primera fase de desarrollo a los municipios de Cataluña, a dos municipios de Andorra y, de manera demostrativa de su utilidad, a los municipios del Département des Pyrénées Orientales en Francia. Para ello, se ha elaborado una clasificación de los edificios de vivienda, de acuerdo con las clases de vulnerabilidad de la EMS-98, según los datos del censo de edificios realizado en 1990 por el Instituto de Estadística de Cataluña (IEC) y el INSEE para la parte francesa. Para el territorio andorrano, los datos se han extraído (González et al., 2007) de los Planes Municipales de Urbanismo y Organización (POUP) y se han completado con fotos aéreas y visitas técnicas. La información disponible consta de localización las zonas edificadas y la distribución de sus edificios según su edad y número de plantas.

La evaluación de la vulnerabilidad se basa en la clasificación de los edificios de cada municipio según las clases de la vulnerabilidad EMS-98 (Grünthal, 1998), usando la metodología desarrollada por Chávez (1998) y expuesta en Roca et al. (2006). Se puede encontrar una exposición más detallada del método para la obtención de escenarios de daños y su aplicación realizada en el proyecto ISARD a la Cerdaña y a Andorra en Irizarry et al., (2007) y González et al., (2007), respectivamente.

El informe automático generado por TELEAVIS, usando el Nivel 0 consiste en varios mapas con diferentes parámetros que caracterizan el daño, así como una lista de los municipios más afectados con la relación de daños. En la figura 5a se muestra un ejemplo de representación del número de personas que podrían perder su hogar para un terremoto virtual de M5 con epicentro en la Cerdaña.

### **Escenario automático transfronterizo de daños de Nivel 1**

El método mejorado, o de Nivel 1, se basa en las hipótesis siguientes:

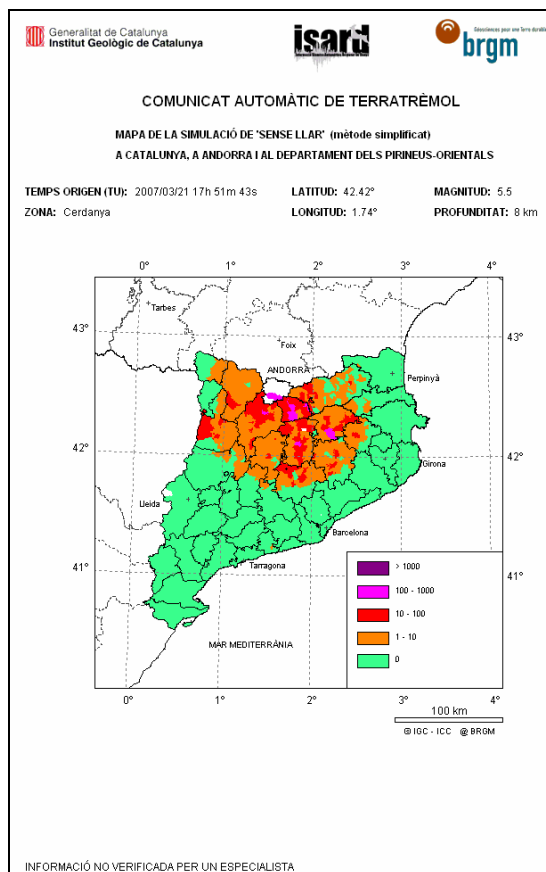
- i) la unidad de trabajo es el polígono urbano, y la unidad de representación del resultado es el municipio,
- ii) se consideran los posibles efectos de amplificación de suelos,
- iii) se usan las tipologías constructivas y, los índices y funciones de vulnerabilidad definidas en la metodología RISK-UE (Mouroux y Lebrun, 2006).

La evaluación de Nivel 1 se aplica a una zona piloto que incluye la Cerdaña francesa y la Cerdaña española, así como dos municipios de Andorra. Posteriormente la metodología usada en esas zonas piloto podrá extenderse a una región más amplia. Una descripción detallada de la metodología puede encontrarse en Irizarry et al. (2007).

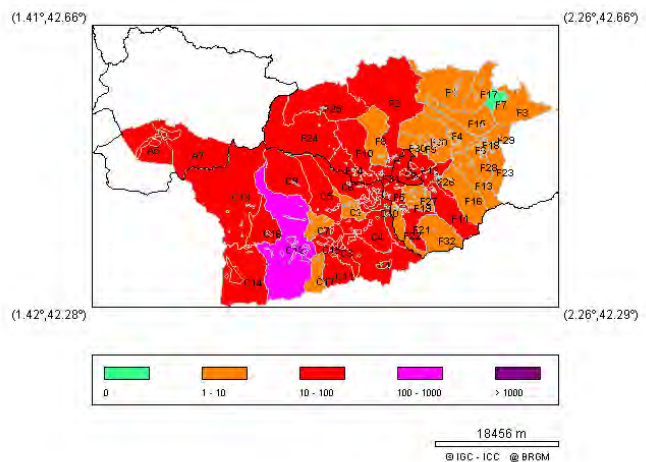
Se han definido polígonos de población, basados en las entidades de población establecidas por el INE para el lado español y, en visitas técnicas y la antigüedad de los edificios para el lado francés. La distribución de tipologías en los municipios españoles y franceses de la Cerdaña se ha podido realizar de acuerdo con las informaciones dadas por los arquitectos de la región concedores de la evolución constructiva regional, así como de los especialistas del Centro Científico y Técnico de la Construcción (CSTB), del BRGM y del IGC (Irizarry et al., 2007; Roussillon et al., 2006). Se obtienen de esta manera distribuciones de tipologías propias para cada región que dan lugar a una distribución de los índices de vulnerabilidad para cada polígono poblacional.

También se consideran los efectos de suelo para modificar la intensidad media estimada para cada municipio, y así obtener la intensidad con efectos de suelos que afectará a cada polígono poblacional (Macau et al., 2007). Así pues la distribución de índices de vulnerabilidad se combina con la intensidad con efectos de suelos que afecta a cada polígono para calcular la distribución de daños esperados en cada polígono poblacional.

La Figura 5b presenta un ejemplo de la representación del número de personas que quedarían sin hogar en la región piloto estimadas según la metodología de Nivel 1 en el supuesto de que un terremoto de M5 ocurriera en la Cerdaña.



(a)



(b)

Figure 5: Representación del número de personas que podrían resultar sin hogar después de un hipotético terremoto de M5 que ocurriera en la Cerdaña. a) Estimación realizada con el método simplificado (Nivel 0) en los municipios seleccionados de los tres países. b) Estimación realizada con el método mejorado (Nivel 1) en las zonas piloto, definida en los tres países.

### Mapas de valores máximos del movimiento del suelo en las estaciones que han registrado el terremoto

Los valores máximos de los registros horizontales de velocidad (PGV) y de aceleración (PGA) se calculan también de manera automática en el módulo DAS, utilizando las rutinas de EW disponibles.

En la figura 6 se muestra un ejemplo de esta representación automática para los valores obtenidos durante el terremoto de M5.1, del 17 de Noviembre de 2006, en los Pirineos Centrales franceses. Estos mapas también se enviarán de manera automática a los responsables del manejo de la crisis a través del programa TELEAVIS.

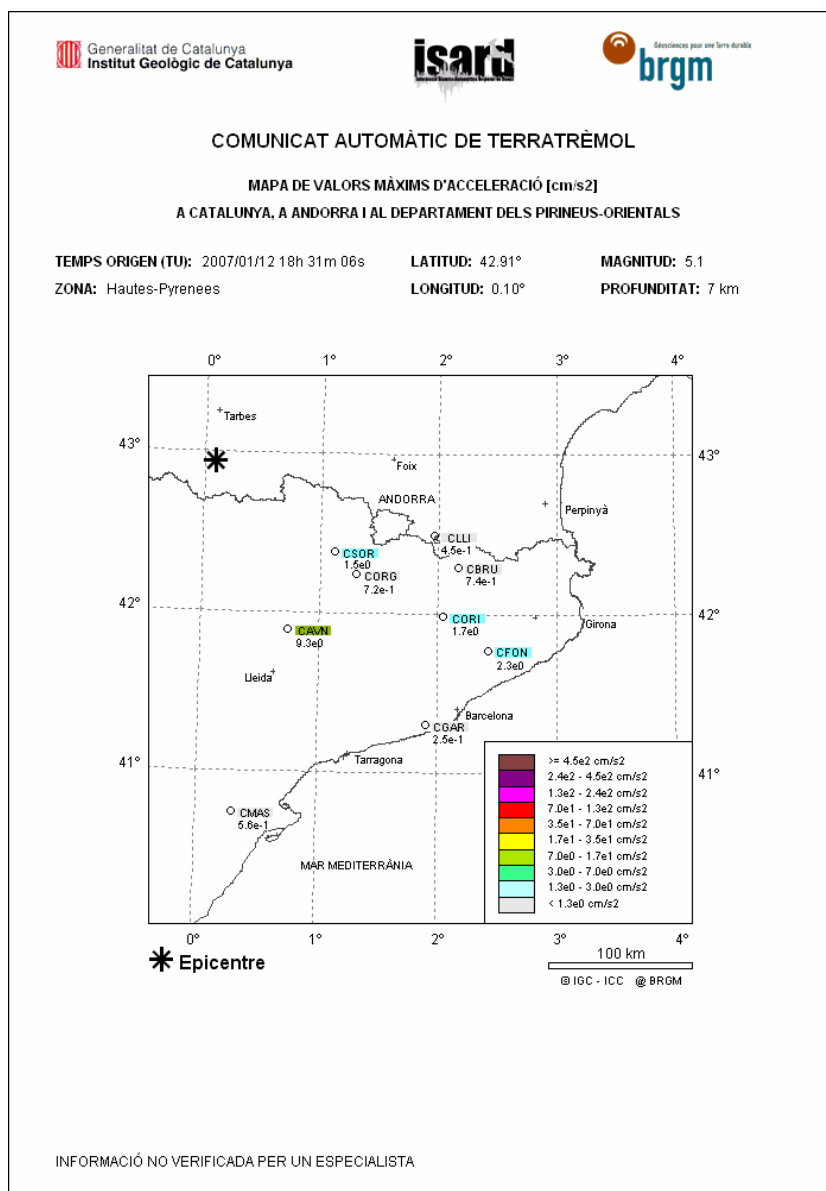


Figura 6 Mapa con los valores máximos de aceleración (PGA) obtenidos automáticamente a partir de los registros de las estaciones de la red ISARD durante el terremoto de 17/11/2006 de M5.1 ocurrido en los Pirineos Centrales franceses.



## Conclusiones

Se ha desarrollado e implantado en los centros de recepción y proceso de datos del IGC (Barcelona) y del BRGM (Orleáns) un sistema de Información Sísmica Automática Regional de Daños (proyecto ISARD). El sistema consta de los siguientes módulos:

- una transmisión en tiempo quasi real del registro continuo de 19 estaciones sísmicas, basado en tecnología VSAT, con sensores broad-band y acelerómetros instalados a ambos lados de la frontera franco-española,
- un sistema de Detección Automática de Sismos (DAS) basado en módulos *Earthworm* (USGS, 2005), que permite la detección y localización fiables de terremotos locales de  $M > 1.5$ , así como la extracción de los valores máximos del movimiento del suelo (PGA y PGV).
- un sistema de generación automática de escenarios de las intensidades percibidas y de los posibles daños sufridos en municipios de Francia, España y Andorra, calculados por dos métodos distintos.
- un sistema de envío automático (TELEAVIS) por SMS, Fax y correo electrónico con mapas y listas de los escenarios generados a los responsables de las distintas administraciones encargados de gestionar la crisis.

Los resultados obtenidos durante un período de varios meses, para la calibración de los parámetros, parecen satisfactorios, es decir muy pocos eventos no deseados (ruido o telesismos) pasan el filtro y por otro lado se detecta la casi totalidad de sismos locales de  $M > 1.5$ , siendo la precisión de la localización similar a la obtenida manualmente. Por otra parte la ocurrencia de sismos de magnitud moderada también ha permitido unas primeras calibraciones del mapa de intensidades estimadas, no así para los escenarios de daño, ya que no ha ocurrido ningún terremoto que haya causado daños en la región de estudio durante este período de pruebas.

Este sistema automático de información sísmica contribuirá a la mejora de la gestión de crisis al poder facilitar a las organizaciones de Protección Civil españolas y francesas la misma información de los daños posiblemente ocurridos a ambos lados de la frontera.

## Referencias:

- Allen, R.V. (1978). "Automatic Earthquake Recognition and Timing From Single Traces.", *Bull. Seism. Soc. Am.* 68, Oct 1978, pp. 1521-1532.
- ATC-13 (1985). "Earthquake damage evaluation data for California", Applied Technology Council (ATC). Redwood City, California.
- Chávez, J. (1998), "Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: Aplicación a Cataluña.", Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 343 p.
- González, M., Irizarry, J., Susagna, T., Goula, X. y Pujades, Ll. (2007). "Realización de escenarios de daños en el Principado de Andorra: Aplicación a la zona más poblada del País." 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Goula, X. y equipo de trabajo del proyecto Isard, (2007) "Proyecto ISARD: Información Sísmica Automática Regional de Daños". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona
- Goula, X., Jara, J. A., Susagna, T. y Roca, A. (2001). "A new Broad-Band Seismic Network with satellite Transmission in Catalonia (Spain)", In: Observatories and Research Facilities for European Seismology, *ORFEUS Newsletter*, vol.3, nº1.

- Grünthal, G. (editor) (1998). "European Macroseismic Scale 1998". *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, 7, Luxembourg, 99p.
- Irizarry, J., Roussillon, P. González, M., Colas, B. Sedan, O. y Susagna, T. (2007) "Escenarios transfronterizos de riesgo sísmico en el Pirineo Oriental". 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona
- Klein, F. W. (2002). "User's Guide to HYPOINVERSE-2000", a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes, Open File Report 02-171, U. S. Geological Survey,
- Macau, A., Figueras, S., Susagna, T., Colas, B., Le Brun, B., Bitri, A., Cirés, J., González, M., y Roullé, A., (2007), "Microzonación sísmica en el Pirineo Oriental en términos de aceleración y intensidad macrosísmica", 3er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, 8-11 Mayo 2007, Girona.
- Mouroux, P. y Lebrun, B. (2006), RISK-UE project: an advanced approach to earthquake risk scenarios with application to different european towns., In: C. S. Oliveira, A. Roca y X. Goula, (Editors), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, pp 479 - 508, Springer.
- Roca, A., Goula, X., Susagna, T., Chávez, J., González, M. y Reinoso, E. (2006). "A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia", *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4, 141 -158
- Romeu, N, Jara, J.A., Goula, X., Susagna, T, Figueras, S., Olivera, C. y Roca, A. (2006) "Seismic Information Automatic Sytem", 5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Sevilla, Febrero 2006.
- Roussillon, P., Irizarry, J., González, M., Delmotte, P., Sedan, O. y Susagna, T. (2006). "Cross-border Seismic Risk Scenarios (Eastern Pyrenees)", First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.
- Susagna, T., Goula, X., Roca, A., Pujades, L., Gasulla, N. y Palma, J.J., (2006), "Loss scenarios for regional emergency plans: application to Catalonia, Spain". In: C. S. Oliveira, A. Roca y X. Goula, (Editors), *Assessing and Managing Earthquake Risk*, pp 463 - 478, Springer.
- USGS, (2005). "Earthworm Documentation Release 6.2", in <http://folkworm.ceri.memphis.edu/ew-doc/>.

## Agradecimientos

El proyecto ha sido financiado por los fondos regionales de desarrollo de la UE (FEDER) a través del programa INTERREG IIIa (Francia- España) y también por el Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Catalunya y por el Ministerio Francés de Medio Ambiente.

Agradecemos a todas las personas y entidades que han dado soporte al proyecto facilitando la instalación de las estaciones sísmicas en territorio francés y español y a los servicios técnicos del ICC y del BRGM por el soporte a la instalación de las diversas infraestructuras informáticas y telemáticas, necesarias a la realización del proyecto.