

# Heritage protection in Valparaiso (Chile): The “Mar Vasto” project

## Protección del Patrimonio en Valparaíso (Chile): Proyecto “MAR VASTO”

Maurizio Indirli \*<sup>1</sup>, Sotero Apablaza Minchel\*\*

\* Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Bologna. ITALY

\*\* Colegio de Arquitectos de Chile A.G., Valparaíso. CHILE

Fecha de recepción: 01/ 10/ 2009  
Fecha de aceptación: 30/ 10/ 2009  
PAG. 21 - 62

### Abstract

The Project “MAR VASTO” (“Risk Management in Valparaíso”), <http://www.marvasto.bologna.enea.it> has been financed by BID (“Banco Interamericano de Desarrollo”). It started in March 2007 and ended in October 2008. It has been managed by ENEA (Italian Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development). The project saw the participation of Italian (Universities of Ferrara, Padua and Trieste) and Chilean (University Federico Santa María, in Valparaíso, and University of Chile, in Santiago) partners, and the support of local stakeholders. Being the city declared patrimony of the humanity by, UNESCO in 2003, the following main outcomes have been achieved: to evaluate the impact of main hazards (earthquake, tsunami, fire, and landslide); to provide a vulnerability analysis for three historical churches San Francisco, Las Hermanas de la Divina Providencia, La Matriz, comprised of various materials (masonry, concrete, wood, and adobe) and located in different city areas); to carry out an architectural and vulnerability analysis for a pilot building stock in the Cerro Cordillera historic area; to suggest guidelines for future urban planning; and to develop a GIS digital data base (well organized, user-friendly and easy to be implemented in the future), providing hazard maps and scenarios. The paper summarizes some final results, taking into account the in situ work of missions at Valparaíso (May and October-December 2007) and the “MAR VASTO” public final conference (September 2008), where all the above said activities have been presented.

**Keywords:** Hazard vulnerability and risk assessment, building inventory, heritage protection, GIS, urban planning

### Resumen

El Proyecto “MAR VASTO” (Manejo de Riesgos en Valparaíso), <http://www.marvasto.bologna.enea.it> ha sido financiado por el BID (“Banco Interamericano de Desarrollo”). Comenzó en Marzo del año 2007 y finalizó en Octubre 2008. Este ha sido administrado por ENEA (Agencia Italiana para Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sustentable). El proyecto contó con la participación conjunta de universidades italianas (Universidad de Ferrara, Padua y Trieste), universidades chilenas (Federico Santa María en Valparaíso y Universidad de Chile, en Santiago) y con el apoyo de entidades locales. Siendo esta ciudad declarada como patrimonio de la humanidad por la UNESCO, desde el año 2003, los siguientes resultados han sido alcanzados: evaluar el impacto de los principales peligros (sismos, tsunamis, incendios y deslizamiento de tierras); proveer un análisis de vulnerabilidad para las tres iglesias históricas: San Francisco, Las Hermanas de la Divina Providencia, La Matriz, construidas con diversos materiales (albañilería, concreto, madera y adobe) y ubicadas en diferentes lugares de la ciudad; desarrollar un análisis arquitectural y de vulnerabilidad para un conjunto piloto de edificaciones en la zona histórica de Cerro Cordillera; sugerir directrices para futuras planificaciones urbanas y desarrollar un archivo digital SIG (bien organizado, amistoso para el usuario y fácil de implementar en un futuro) que proporcione mapas y escenarios de peligro. El documento resume algunos resultados finales, tomando en cuenta el trabajo in situ de las misiones en Valparaíso (Mayo a Octubre 2007) y la conferencia pública final “MAR VASTO” (Septiembre 2008), donde todas las actividades anteriores fueron presentadas.

**Palabras Clave:** Vulnerabilidad de peligro y evaluación de riesgo, catastro de construcción, protección patrimonial, SIG (sistema de información geográfica), planificación urbana

## 1. Introducción

La mayoría de las ciudades altamente pobladas se encuentran expuestas a peligros de la naturaleza. Las principales catástrofes (variando en magnitud, frecuencia, duración, área involucrada, velocidad de ocurrencia, dispersión en espacio y distancia temporal) son sismos, erupciones volcánicas, deslizamiento de tierra, tsunamis,

## 1. Introduction

Most of the highly populated cities are prone to natural hazards. Main catastrophes (varying in magnitude, frequency, duration, extent area, onset speed, spatial dispersion and temporal spacing) are earthquakes, volcano eruptions, landslides, tsunamis,

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: maurizio.indirli@enea.it



erosiones costeras, inundaciones, huracanes, etc. En cuanto a habitantes urbanos, los incendios naturales y los inducidos por el hombre también deberían ser incluidos. Además, se debe evaluar cuidadosamente la vulnerabilidad de la construcción, especialmente en centros históricos y monumentos.

De hecho, el Riesgo (probabilidad de consecuencias nocivas, expectativa de pérdida de vidas, personas heridas, posibilidad de subsistencia, interrupción de la actividad económica, daño ambiental, etc.) es el resultado de la combinación entre Peligro, Vulnerabilidad (condición humana o el proceso resultante de factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que determinan la probabilidad y la escala del daño, a partir del impacto de un determinado peligro) y la Exposición física (elementos en riesgo, catastro de aquellas personas o artefactos expuestos a peligro). Es una realidad que, en términos absolutos (UNPD 2002, Munich Re Group, 2004), el costo económico derivado por desastres ha aumentado con las décadas; por lo tanto es indispensable contar con herramientas innovadoras e integrales para la evaluación de riesgo (Indirli 2007, 2010b). El Proyecto “MAR VASTO” (Manejo de Riesgos en Valparaíso, Servicios Técnicos”, Marzo 2007 – Octubre 2008, MAR VASTO 2007) se encuentra dentro del marco de los relevantes temas antes mencionados. Este ha sido coordinado por ENEA (Agencia Italiana para Nuevas Tecnologías, Energía y Desarrollo Económico Sustentable), con la participación conjunta de numerosos asociados (Italia: Universidad de Ferrara, Departamento de Arquitectura; Universidad de Padua, Departamento de Ingeniería Estructural y de Transportes; Centro Internacional Abdus Salam de Física Teórica y la Universidad de Trieste, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso, Departamento de Obras Civiles; Universidad de Chile, División de Estructura, Construcción y Geotecnia) y el apoyo de entidades locales.

## 2. El proyecto “mar vasto”

### 2.1 Breve descripción de Valparaíso

Valparaíso representa un caso distintivo de crecimiento, dentro de un paisaje espectacular, de un importante Puerto en el Océano Pacífico (durante los siglos 19 y 20), alcanzando una importancia estratégica en el comercio naviero, la cual disminuyó después de la apertura del Canal de Panamá (1914). De esta manera, Valparaíso cuenta la historia sinfín de una rígida interacción entre sociedad y medio ambiente, estratificando diferentes capas urbanas y arquitectónicas, a menudo siniestradas por desastres y siempre en peligro. Por cierto la ciudad está sujeta a muchos peligros de la naturaleza (eventos sísmicos

coastal erosions, floods, hurricanes, etc. As for urban habitats, both wild and human-induced fires should be included. Furthermore, the building vulnerability must be carefully evaluated, especially for historical centers and monuments.

In fact, the Risk (probability of harmful consequences, expected loss of lives, people injured, property, livelihoods, economic activity disrupted, environment damaged, etc.) results from the combination between Hazard, Vulnerability (human condition or process resulting from physical, social, economic and environmental factors, which determine the probability and scale of damage from the impact of a given hazard) and physical Exposure (elements at risk, an inventory of those people or artifacts exposed to hazard). It is worth noting that, in absolute terms (UNPD 2002, Munich Re Group, 2004) the economic cost of disasters has been increasing over decades; thus, innovative and integrated tools for risk assessment are necessary (Indirli 2007, 2010b). The Project “MAR VASTO” (“Risk Management in Valparaíso”, March 2007 - October 2008, MAR VASTO 2007) finds his place in the framework of the above said relevant topics. It has been coordinated by ENEA (Italian Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development), with participation of several partners (Italy: Ferrara University, Department of Architecture; Padua University, Department of Structural and Transportation Engineering; Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics and Trieste University; Chile: Valparaíso Technical University Federico Santa Maria, Civil Works Department; Santiago University of Chile, Division Structures Constructions Geotechnics), and support of local stakeholders.

## 2. The “Mar Vasto” project

### 2.1 A brief description of Valparaíso

Valparaíso represents a distinctive case of growth, inside a remarkable landscape, of an important Pacific Ocean seaport (over the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries), up to reaching a strategic importance in shipping trade, declined after the Panama Canal opening (1914). Thus, Valparaíso tells the neverending story of a tight interaction between society and environment, stratifying different urban and architectonic layers, sometimes struck by disasters and always in danger. Certainly, the city is subjected to various natural hazards (seismic events,

y también a tsunamis, deslizamiento de tierras, etc.) y a calamidades antrópicas (principalmente incendios naturales y provocados por el hombre). Estas características convierten a Valparaíso en un caso paradigmático de estudio en relación a la mitigación del peligro; y los factores de riesgo deben ser bien evaluados durante las fases de restauración a planificar en el futuro Figura 1.

La morfología de Valparaíso puede ser simplemente dividida en dos sectores principales: el área portuaria ubicada en el plano y la zona de cerros. Existen enormes edificios neoclásicos de albañilería, algunas construcciones de estilo colonial (aún en pie a pesar de los sismos y posteriores incendios), recientes obras arquitectónicas que se encuentran en el distrito comercial, con calles estrechas, carreteras, y líneas férreas paralelas a la costa. Un área extensa es ocupada por las instalaciones portuarias hasta la zona costera.

En contraste, los empinados cuarenta y nueve cerros, cortados por quebradas y accesibles por angostos caminos serpenteantes en ascenso, están completamente poblados con viviendas pequeñas y bajas, típicamente construidas con marcos de madera, paneles de adobe y cubiertas de calamina. Existen varios ascensores que suben inclinados. Valparaíso fue incluido en el año 2003 en la Lista de Patrimonio de la Humanidad de UNESCO, como lugar protegido. El distrito protegido por la UNESCO (Barrio Puerto) se encuentra en la parte sur de Valparaíso e incluye un sector que, comenzando por el plano, alcanza los cerros. Además de la multitud de viviendas habitadas mencionadas anteriormente, existen edificios históricos notables (Indirli et al., 2006a, Indirli 2010b).

but also tsunamis, landslides, etc.) and anthropic calamities (mainly wild and human-induced fires). These features make Valparaíso a paradigmatic study case about hazard mitigation, and risk factors must be very well evaluated during the restoration phases to be planned in the future (Figure 1).

The Valparaíso morphology can be roughly divided into two main sectors: the flat harbour area and the hill quarters. Large neoclassic masonry buildings, some previous colonial style constructions (still standing structures spared by earthquakes and following fires) and more recent architectures take place in the commercial district, with straight streets, highways and rail tracks parallel to the coast. A wide area is occupied by the port facilities up to the waterfront.

Otherwise, the steep forty nine hills, bounded by ravines and climbed by narrow and snaky lanes, are deeply filled by small and squat houses, typically made by wooden frames, adobe panels and tinsplate covers. Several old cable cars climb the hills. Valparaíso has been included since 2003 in the UNESCO World Heritage List of protected sites. The UNESCO protected district ("Barrio Puerto") lies in the Valparaíso Southern part and embraces a sector which, starting from the flat, reaches the hills. In addition to houses mentioned above, notable historical buildings are present (Indirli et al., 2006a, Indirli 2010b).

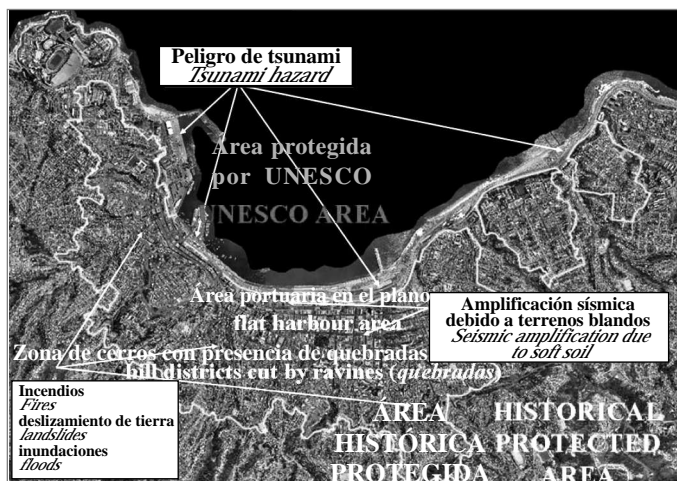


Figura 1. Valparaíso: áreas de peligro y seguridad  
 Figure 1. Valparaíso: hazards and safeguarded areas

## 2.2 Arquitectura del Proyecto

“MAR VASTO” puede ser resumido como se muestra en la Figura 2. Las líneas horizontales proporcionan las actividades del “objetivo general”, que son las siguientes: recolectar, analizar y elaborar la información disponible, con una evaluación satisfactoria de los principales peligros; desarrollar un archivo digital SIG, que incluya mapas y escenarios de peligro; sugerir directrices para futuras planificaciones urbanas y fortalecer las intervenciones.

Puesto que es imposible desarrollar investigaciones acuciosas para toda el área histórica de Valparaíso (debido a restricciones de recursos y tiempo), los objetivos a investigar con mayor prioridad se encuentran indicados por columnas (Figura 2).

Estas estructuras/áreas han sido seleccionadas en decisión conjunta con nuestros asociados en Chile y con los agentes locales (Figura 3):

- Tres importantes iglesias históricas (“La Matriz”, “San Francisco del Barón”, “Las Hermanas de la Divina Providencia”) construidas con diversos materiales (albañilería, concreto, madera y adobe) ubicadas en diferentes ciudades.
- Conjunto piloto de edificaciones en el Cerro Cordillera (parcialmente situado en la zona UNESCO y muy complicado desde el punto de vista social), comprende más de 200 edificios comerciales/residenciales.

## 2.2 Project architecture

“MAR VASTO” can be summarized as shown by Figure 2. Horizontal lines give the “general purpose” activities, that have been mainly the following: to collect, analyze and elaborate the existing information, with a satisfying evaluation of main hazards; to develop a Geographic Information System (GIS) digital data base, including hazard maps and scenarios; to suggest guidelines for future urban planning and strengthening interventions.

Being impossible to manage deep investigations for all the Valparaíso historical area (due to limited resources in funds and time), some targets to be investigated with highest priority are shown by columns (Figure 2).

These structures/areas have been identified after a common decision with Chilean partners and stakeholders (Figure 3):

- three important historical churches (“La Matriz”, “San Francisco del Barón”, “Las Hermanas de la Divina Providencia”), made by various materials (masonry, concrete, wood and adobe) and located in different city areas);
- a building stock in the Cerro Cordillera (partially included in the UNESCO zone and very complicated from a social point of view), consisting in more than 200 residential/commercial buildings.



Figura 2. Breve descripción del Proyecto “MAR VASTO”  
 Figure 2. Brief description of the “MAR VASTO” Project

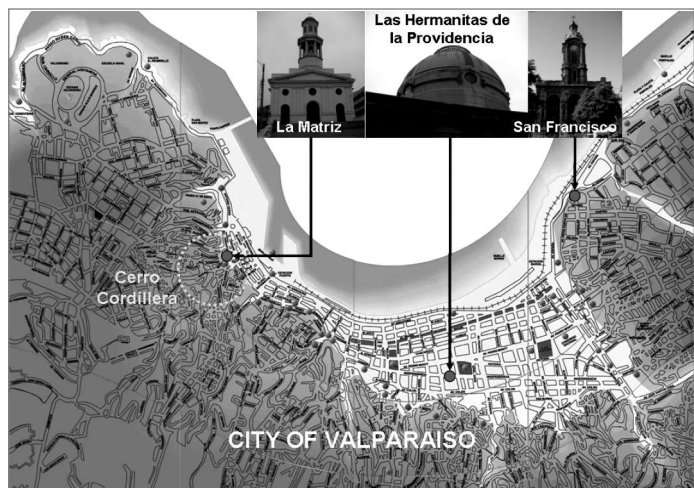


Figura 3. Tres Iglesias y lugares en el Cerro Cordillera  
 Figure 3. Three churches and Cerro Cordillera sites

### 3. Actividades del objetivo principal

#### 3.1 Estudio de Peligro Sísmico

La más completa información ha sido proporcionada por los asociados y entidades locales en Chile, incluyendo fotos históricas y material almacenado en informes originales de sismos, diarios locales y revistas.

Chile es uno de los países más propensos a terremotos en el mundo (Figura 4), afectado por el evento sísmico de mayor intensidad que se haya registrado (Terremoto y Tsunami de Valdivia en 1960). Valparaíso fue golpeado por otro de los mayores terremotos (Tabla 1). En particular, el evento de 1906 fue el más destructivo. Estudios de micro zonificación (con el fin de identificar los efectos del suelo local), nuevas evaluaciones de intensidad sísmica de los terremotos en Valparaíso en 1906 y 1985, mapas isosísmicos de las áreas dañadas, han sido proporcionados por los asociados chilenos, identificando también tres edificios centenarios sobrevivientes en 1906 (ver Figura 5, Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007, Sturm 2008, Indirli 2010b).

### 3. General purpose activities

#### 3.1 Study of seismic hazard

“State-of-the-art” information has been provided by Chilean partners and stakeholders, using historic pictures and materials stored in original earthquake reports, local newspapers and magazines.

Chile is one of the most earthquake-prone country in the world (Figure 4), struck by the most powerful seismic event ever recorded (1960 Valdivia earthquake and tsunami). Valparaíso was hit by other major earthquakes (Table 1). In particular, the 1906 event was the most destructive. Microzonation studies (in order to identify local soils effects), new evaluation of earthquake intensities of the Valparaíso 1906 and 1985 seismic events, isoseismal maps in the damaged area have been provided by Chilean partners, also identifying three 1906 centennial surviving buildings (see Figure 5, Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007, Sturm 2008, Indirli 2010b).

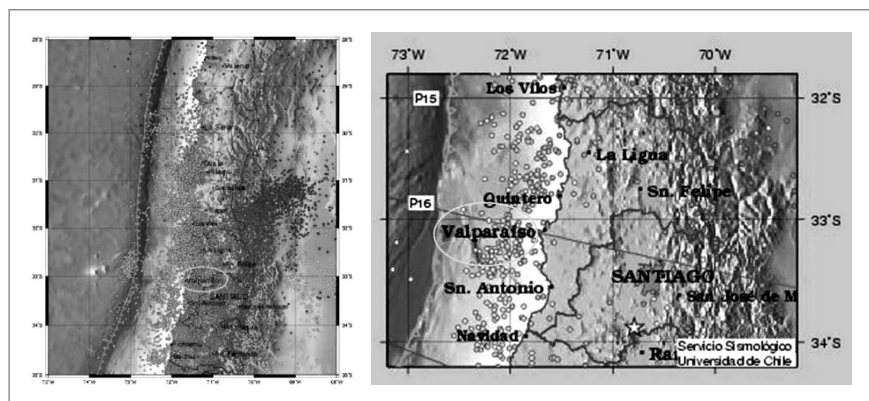


Figura 4. Historia de propensión sísmica en Chile Central y en el Área de Valparaíso (Eventos 1964-1995)  
 Figure 4. Historic seismicity in Central Chile and the Valparaiso area (Events 1964-1995)

**Tabla 1. Características de Fuertes terremotos que han golpeado a Valparaíso**  
**Table 1. Characteristics of strong earthquakes striking Valparaíso**

Fecha/Date	Longitud de la Ruptura/ Rupture Length L [km]	Ancho /Width A/W [km]	Desplazamiento promedio Average Displacement DP/AD [m]	Magnitud Magnitude Mts/Ms	Momento sísmico Seismic Moment M0 [1027 dyn cm]
17-03-1575	-	-	-	7-7.5 <sup>a</sup>	-
13-05-1647	365 <sup>b</sup>	-	-	8.5 <sup>a</sup>	-
08-07-1730	350-450 <sup>c</sup> ; 550 <sup>d</sup>	100-150 <sup>e</sup>	6-8 <sup>e</sup>	8.75 <sup>a</sup>	-
19-11-1822	200-250 <sup>b</sup> ; 330 <sup>e</sup>	100-150 <sup>e</sup>	3-6 <sup>e</sup>	8.5 <sup>a</sup>	-
16-08-1906	365 <sup>b</sup> ; 330 <sup>e</sup> ; 200 <sup>f</sup>	100-150 <sup>e</sup>	3-6 <sup>e</sup>	8.2 <sup>g</sup> ; 8.3 <sup>c</sup>	29-50 <sup>e</sup>
03-03-1985	170 <sup>b</sup>	100 <sup>b</sup>	1.23 <sup>b</sup> ; 1.6 <sup>c</sup>	7.8 <sup>g</sup>	10-11.5 <sup>c</sup>
epicentro en superficie terrestre cerca de Santiago; posteriormente (Lomnitz 1983) el epicentro cambió cerca de la costa de Papudo					
a	Lomnitz 1971, epicentre inland near Santiago; later (Lomnitz 1983) epicenter changed close to the Papudo shore.				
b	Comte et al. 1986;				
c	Kausel 1986;				
d	Carvajal & Saragoni 1989;				
e	Nishenko 1985;				
f	Okal 2005;				
g	Pereira et al. 1979.				

La micro zonificación del terremoto de 1906 concuerda con la resultante del terremoto de 1985, con un incremento de 1¼ intensidad MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik). Esta micro zonificación también concuerda con las estructuras de suelo identificadas por El Almendral. Comprende el área de Valparaíso entre la Plaza Victoria y Avenida Argentina, próxima al Cerro Barón. Esta zona fue la más afectada por el terremoto de 1906 en Valparaíso, con 3.764 víctimas. El Almendral se ha caracterizado por registrar la peor actividad sísmica, también en 1730, 1822 y 1851. La mayor parte de las viviendas ubicadas en esta área han sido siempre dañadas (Figura 6). Esta zona urbana triangular corresponde a una antigua playa en la costa, construida en sucesivas etapas de apropiación de terrenos (detalles en Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; ver también Indirli 2010b).

A partir de estudios previos sobre la periodicidad de terremotos en el Gran Valparaíso (Pereira et al., 1979) y de la distribución de los daños en 1906 en el vecindario de El Almendral, se realizó un experimento en 1982, para medir los acelerógrafos en dos lugares, separados aproximadamente por 2 km: un lugar con suelo arenoso en El Almendral, en la Iglesia Los Doce Apóstoles (Avenida Argentina cruzando la calle Juana Ross, a una cuadra del edificio del Congreso Nacional); otro lugar ubicado sobre el lecho descubierto de roca en Avenida España, cerca de la Universidad Federico Santa María (Saragoni 2006, 2007). El experimento funcionó exitosamente para el terremoto de 1985, confirmando los estudios previos (detalles en Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; ver también Indirli 2010b).

The 1906 earthquake microzoning is in agreement with the one resulting from the damages of the 1985 earthquake, with an increase of MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik) intensities of about 1/4. This microzonation is also in agreement with the soil structures identified at El Almendral. It is the part of Valparaíso between Victoria square and Argentina Avenue, near Baron hill. This zone was the most affected by the 1906 Valparaíso earthquake, with 3764 casualties. El Almendral has been always characterized to show the worst earthquake performance also in 1730, 1822 and 1851. Most houses located in this area were heavily damaged (Figure 6). This triangular urban zone corresponds to an old beach on the seaside, made up by successive stages of change in use land (details in: Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; see also Indirli 2010b).

From previous studies on the periodicity of large Valparaíso earthquakes (Pereira et al., 1979) and the distribution of 1906 damages at El Almendral neighbourhood, an experiment was set up in 1982, to record accelerograms in two sites, separated by about 2 km: a place with sandy soil in El Almendral, at Los Doce Apóstoles Church (Argentina Ave. crossing Juana Ross Street, one block from the National Congress building); a place located in the bedrock outcrop at España Ave., near the Federico Santa María University (Saragoni 2006, 2007). The experiment successfully worked for the 1985 earthquake, confirming the previous studies (details in: Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; see also Indirli 2010b).

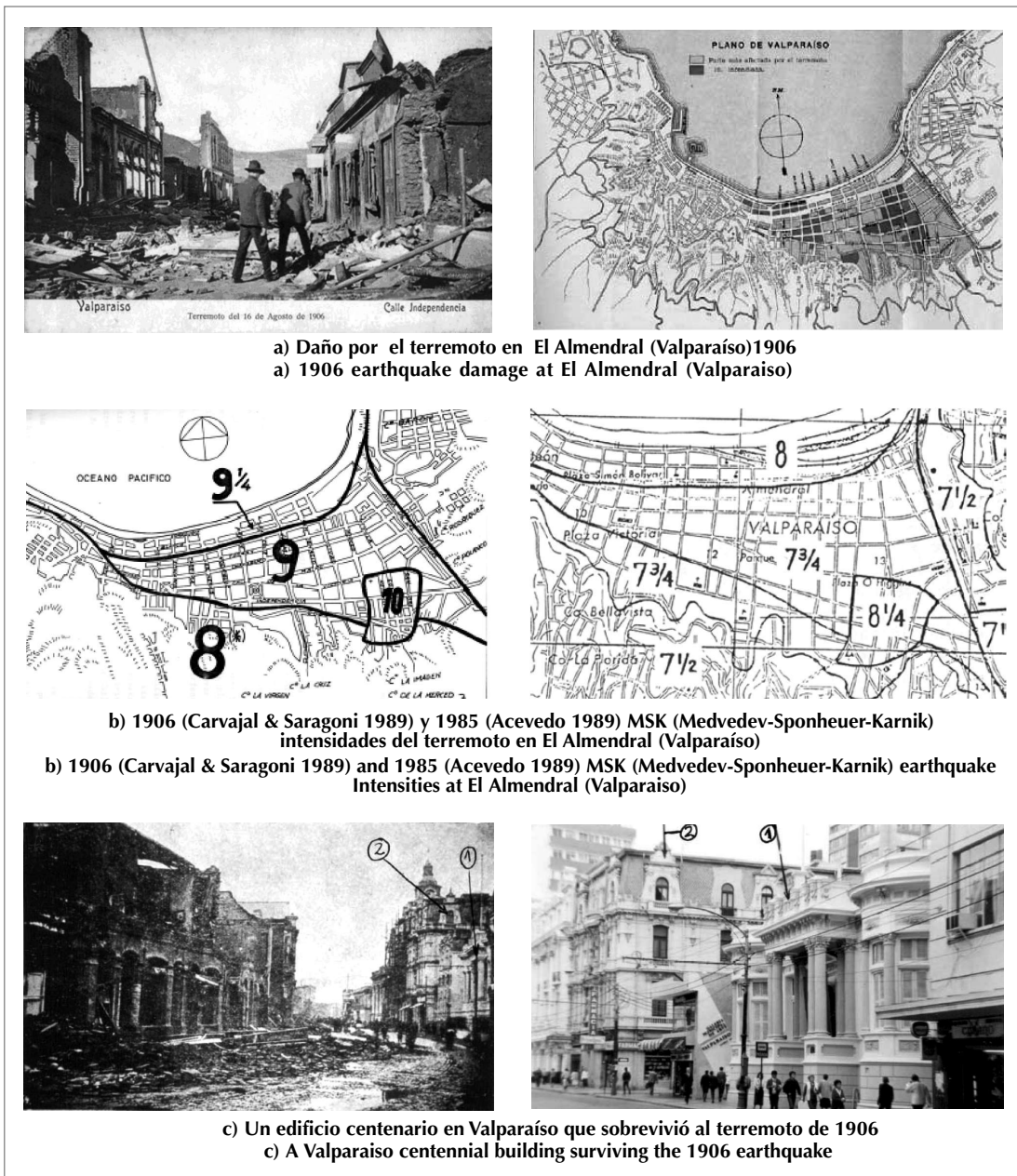


Figura 5. Terremotos en Valparaíso  
Figure 5. The Valparaíso earthquakes



Figura 6. Daño causado por el terremoto de 1906 en la Avenida Las Delicias (hoy Avenida Argentina), donde el terremoto de 1985 fue medido en El Almendral, Valparaíso.

Figure 6. 1906 earthquake damage at Las Delicias Ave. (today Argentina Ave.), where the 1985 earthquake was recorded at El Almendral, Valparaiso



Las principales características de estos acelerógramas son presentadas en la Tabla 2, donde se indican los valores máximos correspondientes para aceleración de suelo (PGA), velocidad (PGV) y desplazamiento (PGD). En esta tabla también se incluyen los valores de factor potencial de destructividad  $P_D$  (Araya & Saragoni, 1984), la intensidad de intersección cero  $v_0$  y la duración total  $t_0$ . El IDIEM (instituto perteneciente a la Universidad de Chile) desarrolló una profunda perforación a 56 mts, hasta la roca en la iglesia Los Doce Apóstoles. Las propiedades de suelo medido están resumidas en la Tabla 3, donde  $h$  indica la profundidad en metros,  $\mu$  la relación de Poisson,  $G_0$  el modulo de corte,  $E_0$  el modulo de Young e  $\gamma$  el peso específico. La velocidad de ondas de cortante fueron estimadas para cada capa: 350 mts/seg para los primeros 8 metros, 275 mts/seg para los siguientes 8 mts, 300 mts/seg para los siguientes 16 mts y 225 mts/seg para los últimos 24 m, que se encuentran en contacto con el lecho de roca. Las medidas de propiedades de suelo permiten comparar el modelo que considera la propagación de las ondas SH. Además, se encontró un período natural de suelo de 0.884 s ( $\omega_n=1.1787$  Hz). Se obtuvo la relación entre el Espectro de Fourier en los acelerógramas de El Almendral (terreno arenoso, S40E) y de la Universidad Federico Santa María (roca, S20E). La Tabla 4 resume los valores de las tres primeras frecuencias naturales de suelo  $\omega_i$  y los correspondientes factores de amplificación  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$ , comparándolos con valores teóricos. La Figura 7 informa la relación del Espectro de Fourier entre los acelerógramas S40E S20E. Las tres primeras frecuencias naturales demuestran la importante influencia de la respuesta del suelo en El Almendral, durante el terremoto de 1985. A partir de este resultado, es posible concluir que el efecto del suelo también se encontraba presente en El Almendral durante el terremoto de 1906. Las frecuencias naturales experimentales de la Tabla 4, coinciden muy bien con los valores teóricos, especialmente para  $\omega_1$  y  $\omega_2$ , cumpliendo con la relación  $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 3 : 5$ .

The main characteristics of these accelerograms are presented in Table 2, where the corresponding peak ground values for acceleration (PGA), velocity (PGV) and displacement (PGD) are given. In this table the values of the destructiveness potential factor  $P_D$  (Araya & Saragoni, 1984), the zero crossing intensity  $v_0$  and the total duration to are also included. IDIEM (a branch of University of Chile) performed a 56 m deep borehole up to rock at the Los Doce Apostoles church site. The measured soil properties are summarized in Table 3, where  $h$  indicates the depth in m,  $\mu$  the Poisson's ratio,  $G_0$  the shear modulus,  $E_0$  the Young's modulus and  $\gamma$  the specific weight. The shear wave velocities were estimated for each stratum: 350 m/s for the first 8m, 275 m/s for the next 8m, 300 m/s for the next 16 m and 225 m/s for the last 24 m, that are in contact with the bedrock. The measurements of the soil properties allow to compare the experimental soil amplification effect with the theoretical values given by the soil dynamics model that considers the propagation of SH waves. Furthermore, a soil natural period of 0.884 s ( $\omega_n=1.1787$  Hz) was found. The ratio between the Fourier Spectrum of the accelerograms of El Almendral (sandy soil, S40E) and Federico Santa Maria University (rock, S20E) was obtained. Table 4 summarizes the values of the three first soil natural frequencies  $\omega_i$  and the corresponding amplification factors  $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3$ , comparing them with theoretical values. Figure 7 reports the Fourier spectrum ratio between the accelerograms S40E S20E. The three first natural frequencies show the important influence of the soil response at El Almendral during the 1985 earthquake. From this result, it can be concluded that this soil effect was also present at El Almendral for the 1906 earthquake. The experimental natural frequencies of Table 4 coincide very well with the theoretical values, especially for  $\omega_1$  and  $\omega_2$ , satisfying the ratio  $\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 = 1 : 3 : 5$ .

Tabla 2. Características de los acelerógramas registrados en Valparaíso, durante el terremoto de 1985  
 Table 2. Characteristics of accelerograms recorded at Valparaiso for the 1985 earthquake

Station	Component	PGA [g]	PGV [cm/s]	PGD [cm]	PD [ $10^{-4}gs^2$ ]	$v_0$ [zero crossing/s]	$t_0$ [s]
El Almendral	N50E	0.290	28.59	5.37	47.33	8.40	87.845
	S40E	0.163	16.89	2.81	46.71	7.12	87.835
	Vertical	-	-	-	-	-	-
U.T.F.S.M.	S20E	0.164	6.40	1.33	3.44	11.61	79.425
	N70E	0.179	14.70	3.26	5.87	11.14	79.415
	Vertical	0.125	5.85	1.37	1.23	14.36	79.405





Tabla 3. Propiedades de suelo en la Estación Acelerográfica en El Almendral (Iglesia Los Doce Apóstoles)  
Table 3. Soil properties at el Almendral Accelerographic Station (Los Doce Apostoles Church)

H [m]	$\mu$	$G_0$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$E_0$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	PGD [cm]	$\gamma$ [kg/cm <sup>3</sup> ]
El Almendral	N50E	0.290	28.59	5.37	47.33
	S40E	0.163	16.89	2.81	46.71
	Vertical	-	-	-	-
U.T.F.S.M.	S20E	0.164	6.40	1.33	3.44
	N70E	0.179	14.70	3.26	5.87
	Vertical	0.125	5.85	1.37	1.23

Tabla 4. Frecuencias naturales de suelo y factores de amplificación en la Estación Acelerográfica de El Almendral (Iglesia Los Doce Apóstoles)  
Table 4. Soil natural frequencies and amplification factors at El Almendral Accelerographic Station (Los Doce Apostoles Church)

Station	Rock	$\omega_1$ [rad/s]	$R_1$	$\omega_2$ [rad/s]	$R_2$	$\omega_3$ [rad/s]	$R_3$	$T_1$
S40E	N70E	1.2088	3.984016	3.6264	2.6400	6.0440	1.1760	0.8273
	S20E	1.2210	10.165	3.5221	2.0570	7.9850	1.7700	0.8190
	N70E	0.9768	4.1080	3.2360	2.4600	7.0570	2.4680	1.0268
N50E	S20E	0.7692	7.1650	4.5675	2.5730	7.7410	3.3520	1.3000
theoretical value		1.1787	2.7951	3.5361	2.7951	5.8928	2.7951	0.8484

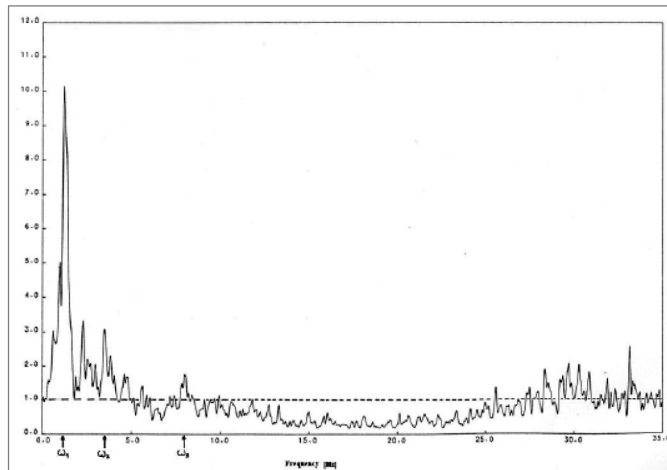


Figura 7. Relación del Espectro de Fourier entre los acelerógrafos de El Almendral S40E (arena) y de la Universidad Federico Santa María (UTFSM) S20E (roca)

Figure 7. Fourier spectrum ratio between the accelerograms of El Almendral S40E (sand) and Santa María University (UTFSM) S20E (rock)

Por lo tanto, se obtuvieron importantes amplificaciones para  $T_n=4 \cdot H/[VS \cdot (2 \cdot n - 1)]$ . Sin embargo, los factores de amplificación experimentales son bastante diferentes, por ejemplo para el modo fundamental, el experimental  $R_1$  es 3 veces mayor que el valor teórico. Estas diferencias no se pueden explicar sólo con el modelo de amplificación de suelo. Probablemente la influencia del mecanismo del terremoto también es importante (detalles en: Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; ver también Indirli 2010b).

Therefore, important amplifications were obtained for  $T_n=4 \cdot H/[VS \cdot (2 \cdot n - 1)]$ . However, the experimental amplification factors are quite different, for instance for the fundamental mode, the experimental  $R_1$  is more than 3 times the theoretical value. These differences cannot be explained only with the of soil amplification model. Probably the influence of the earthquake mechanism is also important (details in: Astroza 2006, 2007; Saragoni 2006, 2007; Sturm 2008; see also Indirli 2010b).

Estudios específicos sobre peligros sísmicos han sido desarrollados por el proyecto “MAR VASTO”. Es indispensable que se haya respetado el enfoque neo-determinístico, con el fin de evaluar la acción sísmica en el área de Valparaíso, para ciertos escenarios de terremoto (en forma general), y en algunas secciones bajo la ubicación de iglesias (en particular). Zuccolo et al. (2008) proporciona una completa descripción de la metodología neo-determinística, desde la definición de peligro hasta el cálculo de acción sísmica, para el diseño de una construcción. De hecho, estos estudios indican los límites de Análisis Probabilísticos de Peligro Sísmico (PSHA); metodologías empleadas actualmente y profundamente enraizadas en las prácticas comunes de la ingeniería; éstas proporcionan indicaciones útiles pero no lo suficientemente confiables (Decanini et al., 2001; Indirli et al., 2006b; Klügel et al., 2006, 2007), como se muestra en ejemplos recientes (terremotos de: Michoacan 1985, Kobe 1995, Bhuj 2001, Boumerdes 2003, Bam 2003 y E-Sichuan 2008). De hecho, la evaluación de peligro sísmico, indispensable para diseñar estructuras resistentes a sismos, se puede realizar de varias formas siguiendo un enfoque probabilístico o determinístico. Los códigos sísmicos nacionales y las zonaciones, a menudo están basadas en el análisis PSHA (Cornell, 1968; SSHAC, 1997; GSHAP; Tanner & Shedloc, 2004). Un ejemplo para Chile Central es mostrado en la Figura 8 (fuente: [http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic\\_tibx\\_w.html](http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_tibx_w.html)). Sin embargo, el PSHA podría no ser lo suficientemente confiable para caracterizar en forma completa el peligro sísmico, esto debido a la dificultad para definir zonas sísmogénicas y evaluar correctamente la ocurrencia del sismo (frecuencia – relaciones de magnitud), y la propagación de sus efectos (leyes de atenuación). Una descripción más adecuada de la acción del sismo se puede hacer siguiendo un enfoque neo-determinístico, que permite proporcionar una descripción realista del movimiento sísmico en tierra, provocado por un sismo a determinada distancia y magnitud (Panza et al., 2001). El enfoque, que puede ser aplicado a escalas urbanas, está basado en técnicas de modelamiento desarrolladas a partir del conocimiento en procesos de generación y propagación de fuentes sísmicas. Este es muy útil porque permite definir un conjunto de escenarios sísmicos y computar las señales sintéticas asociadas, evitando tener que esperar que ocurra un evento de mayor magnitud.

La metodología neo-determinística nos permitió generar un conjunto de escenarios de movimiento terrestre en el lecho de roca del área urbana de Valparaíso,

Specific studies on seismic hazard have been carried out in the “MAR VASTO” project. It is worth noting that the neo-deterministic approach has been followed, in order to evaluate the seismic input in the Valparaíso area for certain earthquake scenarios (in general), and in some sections underneath the churches locations (in particular). A complete description of the neodeterministic methodology, from the definition of the hazard to the seismic input calculation for the design of a building, is given in Zuccolo et al. (2008). In fact, case studies indicate the limits of the PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis) currently used methodologies, deeply rooted in engineering practice, supplying indications that can be useful but not sufficiently reliable (Decanini et al., 2001; Indirli et al., 2006b; Klügel et al., 2006, 2007), as shown by recent examples (earthquakes of: Michoacan 1985, Kobe 1995, Bhuj 2001, Boumerdes 2003, Bam 2003 and E-Sichuan 2008 events). In fact, seismic hazard assessment, necessary to design earthquakeresistant structures, can be performed in various ways, following a probabilistic or a deterministic approach. National seismic codes and zonations are often based on PSHA (Cornell, 1968; SSHAC, 1997; GSHAP; Tanner & Shedlock, 2004). A PSHA example for Central Chile is shown by Figure 8 (source: [http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic\\_tibx\\_w.html](http://neic.usgs.gov/neis/bulletin/neic_tibx_w.html)). Nevertheless, the PSHA could not be sufficiently reliable to completely characterize the seismic hazard, because of the difficulty to define the seismogenic zones and evaluate correctly the occurrence of the earthquakes (frequency - magnitude relations), and the propagation of their effects (attenuation laws). A more adequate description of the seismic input can be done following a neodeterministic approach, which allows to give a realistic description of the seismic ground motion due to an earthquake of given distance and magnitude (Panza et al., 2001). The approach, that can be feasibly applied at urban scales, is based on modelling techniques that have been developed from the knowledge of the seismic source generation and propagation processes. It is very useful because it permits to define a set of earthquake scenarios and to compute the associated synthetic signals, without having to wait for a strong event to occur.

The neo-deterministic methodology allowed us to generate a set of ground-shaking scenarios at the bedrock in the urban area of Valparaíso,

asociado a un “escenario” sísmico diferente. El escenario sísmico puede ser clasificado de acuerdo a su diferente a) magnitud,

b) momento de ocurrencia  $T_m$ , y c) nivel de riesgo (ver tabla 5). Su intención solo debe ser para fines de análisis en ingeniería y no en un sentido de período de recurrencia.

Para cada escenario dos tipos de ruptura han sido consideradas (unilateral de Norte a Sur y bilateral), para las señales sintéticas (desplazamiento, velocidades y aceleraciones) dos componentes horizontales de movimiento (N-S y E-O) han sido computarizadas en un denso enrejado (trecho de aproximadamente 0.02 km) de ubicaciones en el área urbana de Valparaíso. Los máximos movimientos terrestres, y su período de ocurrencia, han sido extractados en forma de matriz. Estos resultados han sido procesados por el SIG, que gráficamente emitió un conjunto de 96 mapas. Los resultados (ver ejemplo en Figura 9) son extremadamente importantes puesto que la información que dan puede ser mapeada en términos de escenarios de intensidad y así pueden ser comparados con las intensidades medidas para los escenarios de 1985 y 1906 (detalles en Indirli et al. 2010a, incluyendo descripción de la metodología para generar movimientos terrestres sintéticos).

associated to different “scenario” earthquakes. The scenario earthquakes can be classified, according to their different: a) magnitude,

b) occurrence period,  $T_m$ , and c) risk level (see Table 5). They have to be intended solely for an engineering analysis and not in the sense of a return period. For each scenario two rupture styles (unilateral North to South and bilateral) have been considered and the synthetic signals (displacements, velocities and accelerations) for the two horizontal components of motion (N-S and E-W) have been computed at a dense grid (step of approximately 0.02 km) of sites in the Valparaiso urban area. The peaks of the ground motion, and their period of occurrence, have been extracted in a matrix form; these results have been GIS processed and graphically rendered in a set of 96 maps. The results (see an example in Figure 9) are extremely important since the information they carry can be mapped in terms of Intensity scenarios and thus they can be compared with the available measured intensities for the 1985 and 1906 scenarios (details are given in Indirli et al. 2010a, including the description of the methodology to generate synthetic ground motions).

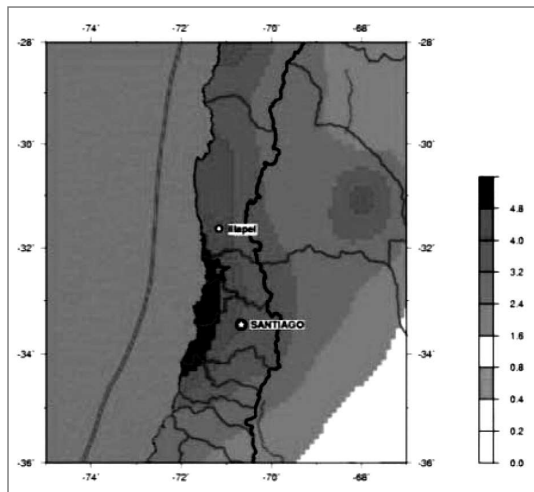


Figura 8. Mapa de Peligro Sísmico (PGA en mts/seg2 con un 10% de probabilidad de ser excedido en 50 años) de la zona Central de Chile usando el enfoque probabilístico tradicional. (Ver <http://www.seismo.ethz.ch/gshap/>)

Figure 8. Seismic hazard map (PGA in m/s2 with 10% probability of exceedence in 50 years) of the Central part of Chile using the traditional probabilistic approach (see <http://www.seismo.ethz.ch/gshap/>)

Tabla 5. Escenarios Sísmicos para Valparaíso  
Table 5. Earthquakes scenarios for Valparaíso

M			Período de ocurrencia Occurrence Period	
7.5	evento escenario/scenario event	ocasional/occasional	$T_m \approx 120-140$ años /years	fuerte/strong
7.8	evento 1985/1985 event	esporádico/sporadic	$T_m \approx 200-250$ años/years	muy fuerte/very strong
8.3	evento 1906 /1906 event	escaso/rare	$T_m \approx 500$ años/years	desastroso/disastrous
8.5	evento escenario /scenario event	excepcional/exceptional	$T_m \approx 1000$ años/years	catastrófico/catastrophic

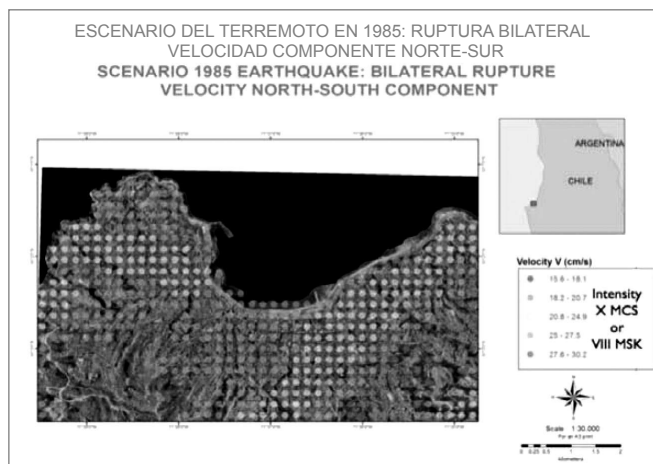


Figura 9. Un ejemplo del escenario movimiento terrestre, a nivel de lecho de roca, en la zona urbana de Valparaíso, para el evento de 1985: Componente de velocidades N-S para la ruptura bilateral

Figure 9. An example of ground-shaking scenario at the bedrock level in the Valparaíso urban area for the 1985 event: NS component of velocities for bilateral rupture

La Figura 10 Muestra la comparación entre señales simuladas y registradas, y la respuesta espectral, correspondiente a la estación UTFSM (lecho de roca), demostrando una buena concordancia.

The comparison between simulated and recorded signals, and the related response spectra, at the UTFSM station (bedrock) is shown in Figure 10, demonstrating a good agreement.

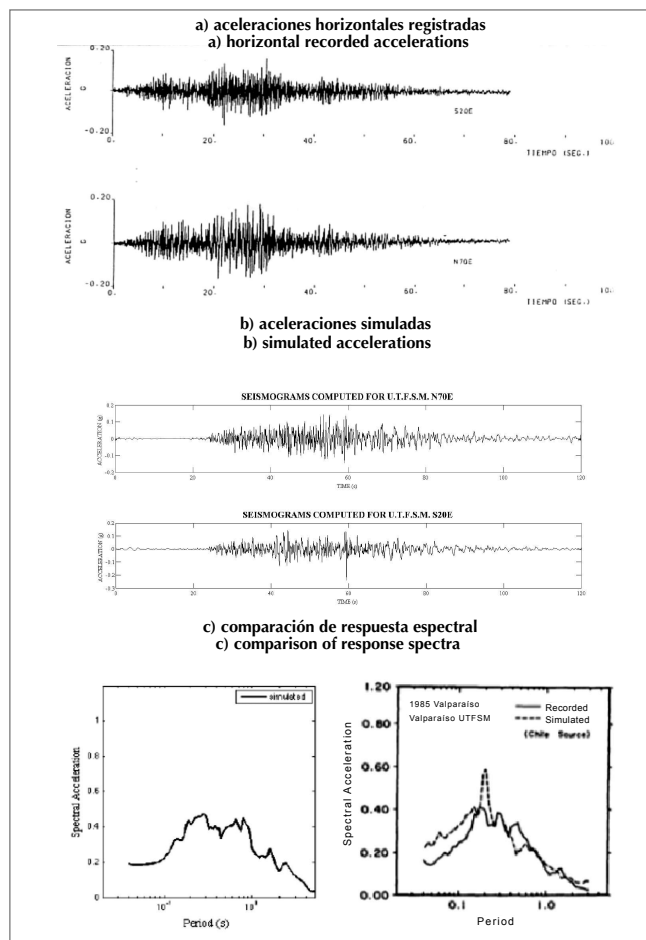


Figura 10. Evento de 1985 en la estación UTFSM: a) aceleraciones horizontales registradas; b) aceleraciones simuladas; c) comparación de respuesta espectral: este estudio incluye aceleraciones registradas y las simuladas por Somerville et al. 1991

Figure 10. 1985 event at UTFSM station: a) Horizontal recorded accelerations; b) simulated accelerations; c) comparison of response spectra: this study, recorded and the one simulated by Somerville et al. 1991

En lugares seleccionados como objetivos estratégicos para todo el proyecto (las tres iglesias: La Matriz, San Francisco y Las Hermanas de la Divina Providencia, ver Figura 3), la acción sísmica total fue computarizada (tiempo histórico de aceleración y respuesta espectral), en la zona del lecho de roca. Mientras La Matriz está sobre un lecho de roca, las otras dos se encuentran situadas en el área de El Almendral, caracterizada por la presencia de una cuenca sedimentaria (Figura 11). Los resultados de dos perfiles modelo son indicados en la Figura 12, junto con los valores de los parámetros elásticos y anelásticos.

Puesto que la computarización de la acción sísmica en las dos últimas ubicaciones ha sido afectada por amplificaciones locales (debido al suelo blando), también se han calculado los efectos de la ubicación. Los factores de amplificación computarizados para componentes horizontales explican, de buena forma, el modelo de las intensidades registradas en la zona urbana de Valparaíso, en relación a los eventos de 1985 y 1906, tal como documentaron Saragoni (2006, 2007) y Astroza (2006, 2007). De hecho, el resultado general de nuestra investigación ha sido que los efectos locales debido al engrosamiento de la cuenca sedimentaria (hasta 300 mts.), en la zona de El Almendral, puede causar un incremento mayor a una unidad en la intensidad sísmica, en relación a la intensidad promedio que afecta toda el área urbana. Mayores detalles se encuentran en Indirli et al., 2010a, Indirli 2010b y Peligro Sísmico 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

In the sites selected as strategic targets for the whole project (the three churches La Matriz, San Francisco and Las Hermanitas de la Divina Providencia, see Figure 3), the full seismic input (acceleration time histories and related response spectra) at the bedrock has been computed. While La Matriz is on a bedrock site, the other two lie on the El Almendral area, characterized by the presence of a sedimentary basin (Figure 11). The results of two profile models are shown by Figure 12, together with the values of the adopted elastic and anelastic parameters.

Because the seismic input computation at the latter two sites is affected by local amplifications (due to soft soil), site effects have been also calculated. The amplification factors computed for the horizontal components explain very well the pattern of the measured intensities in the Valparaiso urban area associated to the 1985 and the 1906 events, as reported by Saragoni (2006, 2007) and Astroza (2006, 2007). In fact, a general result of our investigation has been that the local effects due to the thickening of the sedimentary basin (up to 300 m) in the El Almendral zone can cause an increment greater than 1 unit in the seismic intensity, with respect to the average intensity affecting the whole urban area. More details are given in Indirli et al., 2010a, Indirli 2010b and Earthquake hazard 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

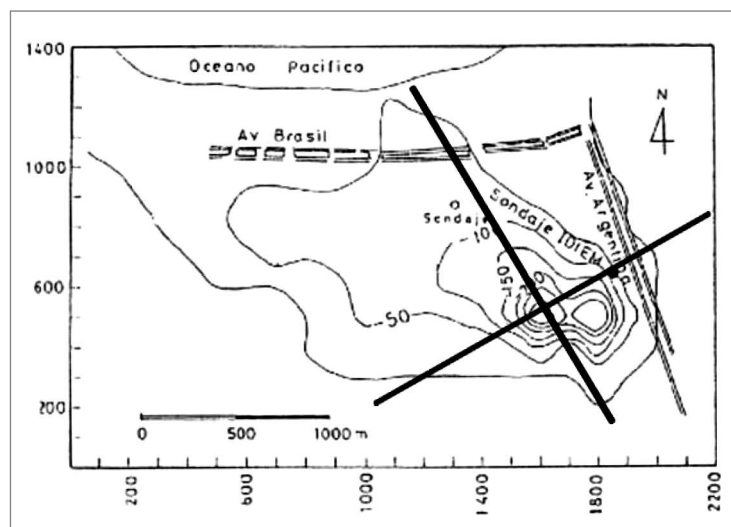


Figura 11. Modelo lecho de roca (profundidad) en El Almendral (Verdugo 1995; Saragoni 2006, 2007) y la posición de los dos perfiles  
Figure 11. Bedrock model (depth) at El Almendral (Verdugo 1995; Saragoni 2006, 2007) and the position of the two profiles



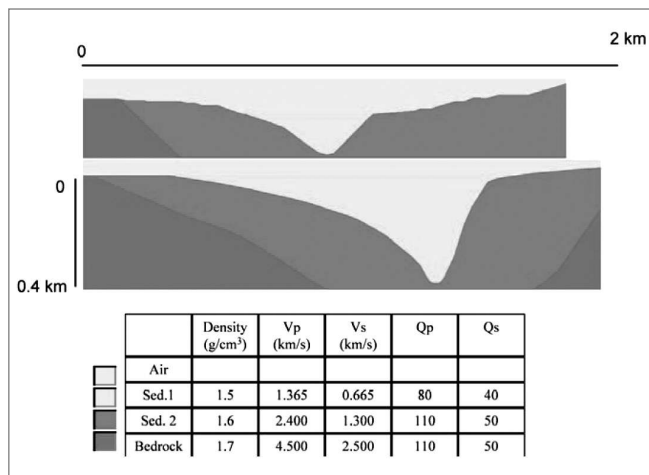


Figura 12. Perfiles locales (arriba: línea roja en la Figura 11; abajo: línea azul en Figura 11) con sus parámetros elásticos y anelásticos  
 Figure 12. Local profiles (up: red line of Figure 11; down: blue line of Figure 11) with their elastic and anelastic parameters

### 3.2 Estudio del peligro de tsunami

Un tsunami ocurre luego que una gran masa de agua es desplazada de su configuración de equilibrio por una determinada fuerza. La gravedad actúa como una fuerza de recuperación, tendiendo a traer la masa de agua desplazada a su estado de equilibrio original. La mayoría de los tsunamis son originados por terremotos submarinos, pero los terremotos continentales y costeros, deslizamientos de tierra e impactos de meteoritos también son posibles causas. Debido a su mecanismo de origen, los períodos y longitudes de olas asociadas a los tsunamis son mayores que aquellas asociadas con olas marinas comunes producidas por el viento. En terremotos submarinos, las amplitudes pueden ser impresionantes, especialmente cuando las olas se acercan al litoral.

Actualmente la costa chilena se encuentra expuesta a los efectos de tsunamis, originados en el Océano Pacífico (Gutiérrez, 2005), y Valparaíso fue inundado en numerosas ocasiones en el pasado. Por ejemplo, los catastróficos eventos del siglo antepasado, de 1868 y 1877, inundaron la costa de la región norte del país. Durante el siglo pasado, el desastre de mayor importancia fue el terremoto y tsunami de 1960 en Valdivia, ubicada al sur del país. Es bien sabido que este evento tuvo un enorme impacto en las costas de los países que comparten el Océano Pacífico, en particular Hawái, Islandia y Japón.

La organización a cargo de detectar y emitir las alertas de tsunamis es el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA; www.shoa.cl). Desde 1995, el Sistema TREMORS ha estado operando en Chile. Este consiste en un equipo de control que mejora la red sísmica existente y el sistema de alerta de tsunamis, proporcionando la información en tiempo real sobre parámetros sísmicos y su relación con el origen y riesgo de tsunamis.

### 3.2 Study of tsunami hazard

A tsunami occurs after a huge mass of water is displaced by some force from its equilibrium configuration. Gravity acts as a restoring force, tending to bring the displaced mass of water back to its original equilibrium state. Most tsunamis are generated by submarine earthquakes, but possible sources are also inland/coastal earthquakes, landslides and meteoric impacts. Due to their generation mechanism, periods and wavelengths associated with tsunamis are longer than those associated with ordinary wind-driven sea waves. For large submarine earthquakes, the amplitudes can be very impressive, especially when the waves approach the shorelines.

The Chilean coast is currently exposed to the effects of tsunamis generated in the Pacific Ocean (Gutiérrez, 2005) and Valparaíso was inundated several times in the past. For instance, the catastrophic events of the last century, 1868 and 1877, overwhelmed the coast of the northern region of the country. During this century, the most important disaster was the 1960 earthquake and tsunami in Valdivia, in the south of the country. It is well known that this event had a great impact on the coasts of most of the neighbouring countries in the Pacific Ocean, in particular Hawaii, Island and Japan.

The organization in charge of detecting and issuing the tsunami warning is the Hydrographic and Oceanographic Service of the Chilean Navy (SHOA; www.shoa.cl). Since 1995, a TREMORS System has been operating in Chile. This is a seismic monitoring equipment that improves the existing seismic network and tsunami warning system, giving information in real time about seismic parameters and their relationship with tsunami generation and risk.

El SHOA ha trabajado activamente en el procesamiento de mapas de inundaciones producidas por tsunamis para el litoral de Chile, empleando tecnología de proyecto TIME. Desde 1996, el Sistema nacional de Alerta de Tsunamis ha producido cartas de inundaciones para los principales puertos. Durante el período 1997-2004, veintiocho cartas han sido elaboradas bajo el proyecto "Procesamiento de Mapas de Inundación por Tsunamis para el Litoral de Chile. Las ciudades incluidas en estas cartas (<http://www.shoa.cl/servicios/citsu/citsu.php>) son: Arica, Iquique, Tocopilla, Mejillones, Antofagasta, Taltal, Caldera, Chañaral, Huasco, Coquimbo, La Serena, Los Vilos, Papudo, Quintero, Valparaíso, Viña del Mar, Algarrobo, San Antonio, Constitución, Talcahuano, Penco, Lirquén, Tomé, San Vicente, Coronel, Lebu, Corral y Ancud.

El informe del SHOA (SHOA 1999), discutido con el equipo italiano, en el cuartel general del SHOA durante una visita in situ, es el documento de referencia para la evaluación de peligro de tsunami para la ciudad de Valparaíso. El trabajo realizado por el proyecto MAR VASTO ha sido complementar los estudios del SHOA con a) un conjunto de estudios paramétricos sobre el potencial de origen de tsunamis en el escenario de terremoto de 1985 y 1906; b) modelamiento analítico del comportamiento de las olas para diferentes escenarios, con el fin de brindar un conjunto de datos complementarios para la evaluación de peligro de tsunamis en Valparaíso.

Para calcular los escenarios de peligro de tsunamis (Tabla 6), en primer lugar hemos adoptado eventos como referencia (1985 y 1906, incluyendo toda la región costera de Valparaíso) y el modelo fuente descrito por el SHOA (ver tabla 7, SHOA 1999). Luego procedimos a modelar el tsunami para otros posibles casos. Las técnicas de modelamiento empleadas para generar un conjunto preliminar de datos de mareogramas sintéticos, que realicen estudios paramétricos. Tomando en cuenta la influencia de los mecanismos fuente (inclinación, inmersión, pendiente y profundidad focal) del potencial de origen de tsunami asociado a los escenarios de eventos sísmicos (Terremoto Histórico Máximo, Terremoto Verosímil Máximo, y Diseño de Terremoto Máximo), se han estudiado diferentes tsunamis en la localidad de Valparaíso. Los cálculos se han realizado usando un modelo oceánico lateral homogéneo, con una capa de agua de 1.5 km. El valor de 1.5 km de espesor para la capa oceánica representa la profundidad batimétrica del área fuente en la localidad de Valparaíso, que se supone debe estar a una distancia alrededor de 50 km. Este simple modelo entrega un límite superior confiable de la altura del tsunami (cerca de 3 metros) y la señal registrada con esta configuración constituye una "referencia" para otras simulaciones (ver detalles en Indirli et al. 2010a).

SHOA has been working actively in the processing of inundation maps by tsunamis for the Chilean coast, using the TIME project technology. Since 1996, the National Tsunami Warning System has been producing inundation charts of the main ports. During the period 1997-2004, twenty eight charts have been produced under the project "Processing of Inundation Maps by Tsunamis for the Chilean Coast". The cities included in these charts (<http://www.shoa.cl/servicios/citsu/citsu.php>) are: Arica, Iquique, Tocopilla, Mejillones, Antofagasta, Taltal, Caldera, Chañaral, Huasco, Coquimbo, La Serena, Los Vilos, Papudo, Quintero, Valparaíso, Viña del Mar, Algarrobo, San Antonio, Constitución, Talcahuano, Penco, Lirquén, Tomé, San Vicente, Coronel, Lebu, Corral y Ancud.

The SHOA report (SHOA 1999), discussed by the Italian team at the SHOA headquarters during the in situ visit, is the reference document for the tsunami hazard assessment for the Valparaiso site. The work done in the MAR VASTO project has been to complement the SHOA studies with a) set of parametric studies about the tsunamigenic potential of the 1985 and 1906 scenario earthquakes; b) analytical modelling of tsunami waveforms for different scenarios, in order to provide a complementary dataset to be used for the tsunami hazard assessment at Valparaiso.

To calculate the tsunami hazardous scenarios (Table 6) we have first adopted the reference events (1985 and 1906, including all the Valparaíso Region coast) and the source model described by SHOA (see Table 7, SHOA 1999). Then, we proceeded to model the tsunami for other possible cases. Analytical modelling techniques have been used to generate a preliminary dataset of synthetic mareograms, performing parametric studies. Taking into account the influence of the source mechanism (strike, dip, rake and focal depth) on the tsunamigenic potential associated to selected scenario seismic events (Maximum Historical Earthquake, Maximum Credible Earthquake, and Maximum Design Earthquake), different tsunamis at the Valparaiso site have been studied. The calculations have been performed using a laterally homogeneous oceanic model, with a water layer of 1.5 km. The value of 1.5 km for the thickness of the oceanic layer represents the average bathimetric depth from the source area to the Valparaiso site, supposed to be about at a distance of about 50 km. This simple model gives a reliable upper bound of the height of the tsunami (about 3 meters), and the signal computed with this configuration represent the "reference" for the other simulations (see details in Indirli et al., 2010a).



**Tabla 6. Escenarios de tsunami para Valparaíso**  
**Table 6. Tsunami scenarios for Valparaíso**

M			Periodo de Ocurrencia Occurrence Period	
7.0	evento escenario/scenario event	frecuente/frequent	$T_m \approx 70-80$ años/years	moderado/fuerte/moderate/strong
7.5	evento escenario/scenario event	ocasional/occasional	$T_m \approx 120-140$ años/years	fuerte/strong
7.8	evento1985/1985 event	esporadico/sporadic (*)	$T_m \approx 200-250$ años/years	muy fuerte/very strong
8.3	evento1906 /1906 event	escaso/rare (*)	$T_m \approx 500$ años/years	desastroso/disastrous
8.5	evento escenario/scenario event	excepcional/exceptional	$T_m \approx 1000$ años/years	catastrófico/catastrophic

(\*) Fuente SHOA, modelos y simulaciones/From SHOA source models and simulations

**Tabla 7. Parámetros de Falla para la simulación de los tsunamis de 1906 y 1905 (SHOA, 1999)**  
**Table 7. Fault parameters for the simulation of the 1906 and 1905 tsunamis (SHOA, 1999)**

Parámetros /Parameters	tsunami 1906	tsunami 1985
Extremo Sur/South estreme	35.1°Lat.S-72° Lon.O/W	34.38°Lat.S-72° Lon.W
Desplazamiento/Slip	4.6 m.	2.8 m.
Longitud/Length	330 Km.	200 Km.
Ancho/Width	130 Km.	90 Km.
Inclinación/Strike	N10°E	N10°E
Inmersión/Dip	18°	18°
Profundidad/Depth	15 Km.	17 Km.
Pendiente/Rake	90°	105°



**Figura 13. Mapa de Inundación por Tsunami para el evento sísmico de 1906 (SHOA 1999)**  
**Figure 13. Tsunami inundation map for the 1906 seismic event (SHOA 1999)**



Resumiendo el trabajo, al emplear el mapa de inundación entregado por el SHOA (SHOA 1999, ver Figura 13) asociado al evento de 1906, el límite superior de factor de multiplicación para peligro de tsunami se puede leer en la Figura 14, asociado a diferentes escenarios. Las alturas de los tsunamis, computarizadas con una fuente extensa a escala son ploteadas versus la magnitud; más aún, las amplificaciones asociadas (usando como referencia el nivel de 1906, cuya efectiva altura registrada es debatible puesto que los informes son contradictorios) son mostradas (ver detalles en Indirli et al. 2010a).

Los resultados arrojan que la línea de la zona costera del puerto de Valparaíso, podría ser considerada como expuesta a un grado relativamente alto de riesgo de inundación. Detalles en Indirli et al., 2010a and Tsunami hazard 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 3.3 Estudio sobre el peligro de deslizamiento de tierra

Gracias a la avanzada información geológica (Figura 15), comprendemos que el área de la Ciudad de Valparaíso está situada sobre roca metamórficas Paleozoicas (en la zonas de altura y costa Oeste) y sobre rocas de granito Paleozoicas (en las zonas aguas abajo y del valle). El núcleo del triángulo costero está compuesto por una cubierta superficial de terrenos ocupados, cerradas capas coluviales de origen fluvial e interconexiones de afluentes volcánicos. Desde el punto de vista geomorfológico, el área en estudio muestra dos secciones distintas de pendientes, respectivamente expuestas al N.O. y N.E. Ambas conducen, en línea recta, a lugares localmente interrumpidos por incisiones fluviales profundas ("quebradas"), a veces surcadas por agua (Figura 16). Las cuencas muestran un fenómeno de erosión a diferentes niveles de elevación (terrazas marinas), debido al rápido levantamiento tectónico del área, causando las anteriormente mencionadas incisiones fluviales profundas.

En la sección aguas arriba, los valles generalmente son extensos (cerca de cientos de metros) y levemente inclinados (entre 20° y 45°). Además, a menudo la inclinación transversal es interrumpida por terrazas erosionadas sobre rocas enclavadas. En la parte baja de los cerros, los valles disminuyen y aumenta la inclinación de la pendiente (hasta 90°), a lo largo de afloramiento de granodiorita con baja o nula acción corrosiva.

Summarizing the work, using the inundation map provided by SHOA (SHOA 1999, see Figure 13) associated to the 1906 event, an upper bound of the multiplication factor for the tsunami hazard can be read in Figure 14, associated to different scenarios. The tsunami heights, computed with a scaled and an extended source, are plotted versus magnitude; moreover, the associated amplifications (using as reference the 1906 level, whose effective measured height is debatable since the reports are contradictory) are shown (see details in Indirli et al. 2010a).

From the results it emerges that the coastal line in the Valparaiso harbour zone could be considered exposed at a relatively high risk of flooding. Details are in Indirli et al., 2010a and Tsunami hazard 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 3.3 Study of landslide hazard

Thanks to state-of-the-art geologic information (Figure 15), The Valparaiso City area lies on metamorphic Paleozoic rocks (upstream and Western coastal parts), and granite Paleozoic rocks (downstream and valley parts). The core coastal triangle is a superficial covering of reclaimed lands, sealing colluvial layers due to fluvial origin and interconnections of debris flow deposits. From a geomorphologic point of view, the study area shows two different slope units, respectively exposed to NW and NE. Both of them lead to straight sides, locally interrupted by deep fluvial incisions ("quebradas"), sometimes ploughed by water (Figure 16). The watersheds show erosion phenomena at different elevation levels (marine terraces), due to a rapid tectonic uplift of the area, causing also the above said deep fluvial incisions. In the upstream portion, the valleys are often large (up to some hundred of meters) and slightly sloped (between 20° and 45°). Furthermore, the transversal slope is often interrupted by fluvial terraces eroded on intrusive rocks. In the lowest hill portion, the valleys cut down and the slope gradient increases (until 90°), along the granodiorite outcrops with low or void weathering.

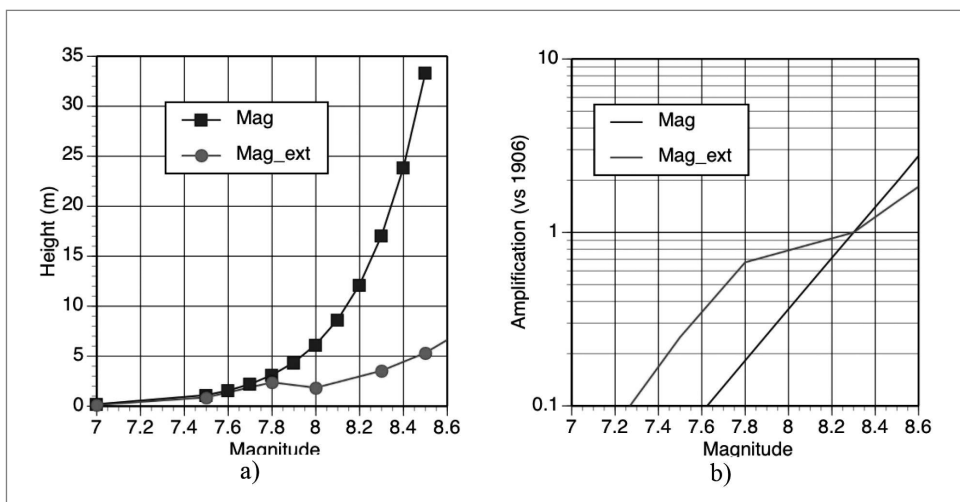


Figura 14. a) Altura máxima y b) amplificación comparada con el evento de referencia (terremoto de 1906) para el escenario sísmico considerado

Figure 14. a) Maximum height and b) amplification compared to the reference event (1906 earthquake) for the scenario earthquakes considered

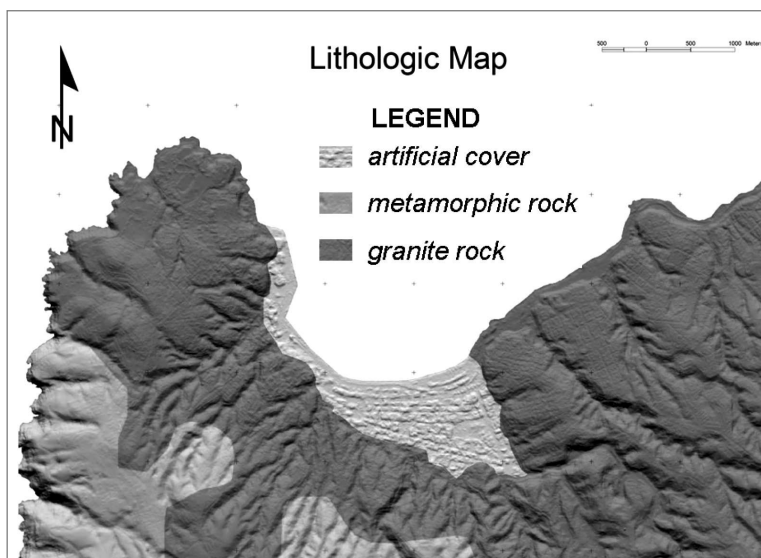


Figura 15. Mapa geológico de Valparaíso

Figure 15. Geological map of Valparaíso



Figura 16. “Quebrada” en Valparaíso, con potencial riesgo de alud por derrumbe de tierras o barro

Figure 16. A Valparaíso “quebrada”, with potential risk of debris/mud flows

Este potencial morfológico principalmente puede influir en los dos siguientes procesos:

- derrumbe de tierras o barro, fenómeno con rápida evolución en el material de recubrimiento;
- alud, fenómeno con rápida evolución en el lecho de roca.

This geomorphologic potential can mainly induce the following two processes:

- mud or debris flow, phenomena with a rapid evolution in the cover material;
- fall, phenomena with a rapid evolution in the bedrock.

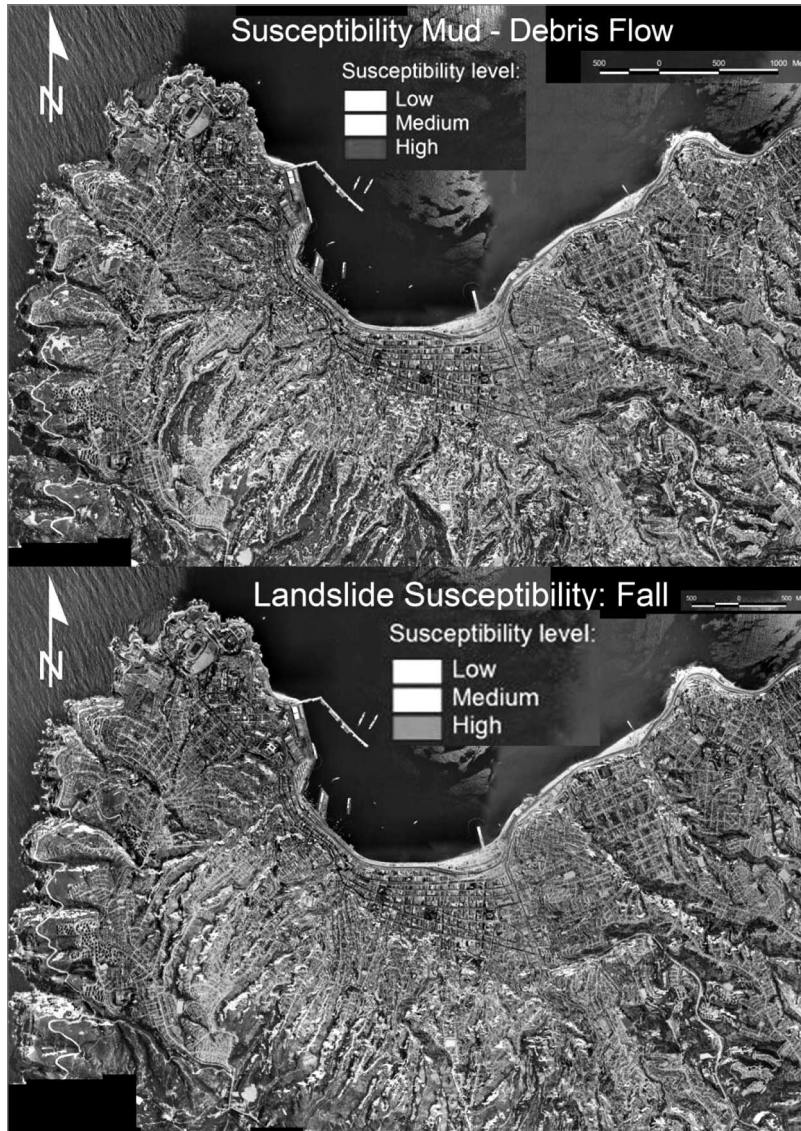


Figura 17. Susceptibilidad de derrumbe de tierra  
Figure 17. Landslide susceptibility

Para ambos eventos mencionados, un catastro de derrumbes de tierra y mapas de susceptibilidad han sido proporcionados gracias a campañas en terreno; datos de reconstrucción eventos de derrumbes de tierra, disponibles en archivos históricos; análisis pluviométrico; y a la extracción de modelos digitales de alta resolución (a través de la toma de fotos aéreas digitales/analógicas). La parte superior de los cerros se caracteriza principalmente por eventos de derrumbe de tierra o barro, que se producen un par de veces en el año, concentrándose en la época de verano. La intensidad de estos fenómenos puede variar ampliamente, pero la presencia de focos urbanos altamente poblados en barrancos, acantilados y nacimiento de los valles (a menudo con terrazas artificiales) hacen que el riesgo asociado sea aún mayor. El plano costero es alcanzado por el material desprendido sólo cuando el evento es de gran intensidad o cuando muchas áreas afectadas se unen y se desploman en la misma base. Los eventos de alud son puntuales y están caracterizados por efectos locales, a menudo destructivos, en la base de las secciones sub-verticales. Por cierto, los terrenos sísmicos, que actúan como punto de partida en el fenómeno de derrumbes de tierra, deben ser investigados cuidadosamente. En conclusión, los efectos de derrumbes (especialmente en la inclinación inferior, donde el territorio urbano es denso y expuesto al riesgo) pueden ser muy peligrosos (ver detalles en Landslide hazard 2008, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

For both the above said events, landslide inventory and susceptibility maps (Figure 17) has been provided thanks to: in-field campaigns; reconstruction of past landslide events from historic archives; pluviometric analysis; and extraction of high resolution digital models (through the elaboration of digital/analogical aerial photos). The upstream hill side is characterized mainly by mud-debris flow events, triggering a couple of times in the year, concentrated in the summer season. The intensity of those phenomena can vary widely, but the presence of densely populated urban settlements in ravine beds, escarpment sides and valley heads (often artificially terraced) makes the associated risk very high. The coastal flat is reached by moved materials only when the event is intense or when several activated areas merge and flow together in the same bed. Fall events are punctual and characterized by local effects, but often destructive, at the basis of the sub-vertical sides. Certainly, seismic ground shaking as starting point of landslide phenomena should be carefully investigated. In conclusion, landslide effects (especially in the slope lower section, where the urban territory is dense and exposed to risk) can be dangerous (details in Landslide hazard 2008, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 3.4 Estudio del Peligro de Fuego

El 3 de Febrero de 2007 una violenta explosión, producida por una fuga de gas, ocasionó la muerte de cuatro personas, destruyó algunos edificios patrimoniales y dañó otros en la Calle Serrano, en el núcleo de la Zona de Valparaíso protegida por la UNESCO. (Figura 18, ver detalles en Sur 2008).

### 3.4 Study of fire hazard

On February 3, 2007 a violent explosion due to a gas leak killed four people, destroyed some heritage buildings and damaged others in Calle Serrano, in the core of the Valparaíso UNESCO zone (Figure 18, see details in Sturm 2008).



Figura 18. Explosión e incendio en la Calle Serrano (Valparaíso)  
 Figure 18. Explosion and fire in Calle Serrano (Valparaíso)

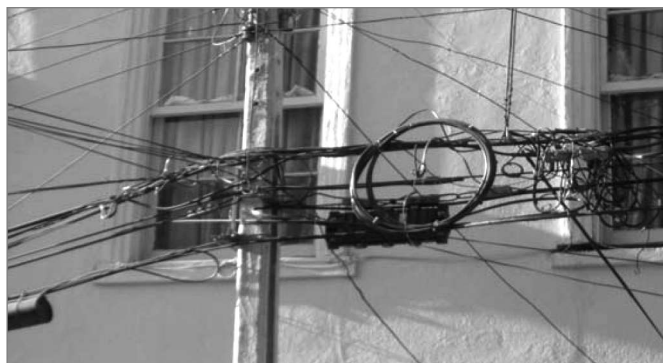


Figura 19. Tendido eléctrico instalado en poste en Valparaíso  
Figure 19. Overhead power distribution lines in Valparaíso

A pesar de la gran experiencia del Cuerpo de Bomberos local, el fuego es la catástrofe más peligrosa y común que se produce en el área urbana (debido a la mala mantención de los sistemas eléctricos, ver Figura 19, a las tuberías de gas, materiales de construcción, a la falta de educación y al vandalismo). Además, el riesgo aumenta con el acostumbrado clima ventoso, caminos estrechos y tortuosos de los cerros, presencia de viviendas de madera y a veces insuficiente presión de agua en los grifos. La presencia de las cercanas instalaciones portuarias representa un factor de riesgo mayor (manejo de combustible, trabajos de mantención, ataques terroristas, seguridad en el sector de contenedores, etc. Ver ISPS 2003).

Más aún, importantes monumentos fueron severamente dañados por incendios en el pasado, como la iglesia de “San Francisco del Barón” en 1983 (Figura 20). Aún cuando la fachada de ladrillo y la torre del campanario permanecieron intactas, las paredes de adobe de la nave y el techo de madera ardieron completamente, lo que hizo necesaria su posterior y completa restauración.

El principal objetivo del trabajo ha sido la implementación de una base de datos SIG, para entregar un primer análisis, detectando las áreas más propensas a incendios en Valparaíso. Los pasos básicos del trabajo han sido los siguientes:

- reunir y organizar toda la información disponible en una base de datos digital SIG, de acuerdo a la cartografía existente, de propiedad de la Municipalidad de Valparaíso;
- identificar los parámetros básicos para el análisis (acceso a las calles, exposición de la pendiente del cerro, presencia de vegetación y focos urbanos);
- implementar una base de datos SIG identificando las áreas con mayor peligro de incendio (Figura 21).

Despite the good expertise of the local Firemen Corp, fire is the most dangerous and common catastrophe occurring in the urban area (due to bad maintenance of electric systems, see Figure 19, and gas pipelines, building materials, lack of education and vandalism), but also in the surroundings forests and bushes (mainly human-made events). Furthermore, the risk is worsened by usual windy weather, narrow and tortuous hill roads, presence of wooden houses and sometimes insufficient water pressure in the hydrants. Also the presence of the close harbour facilities represents a further risk factor (fuel handling, maintenance works, terroristic attacks, container security, etc. see ISPS 2003).

Moreover, important monuments were severely damaged by past fires, as the Church of “San Francisco del Barón” in 1983 (Figure 20). Even if brick masonry façade and bell-tower remained untouched, the nave adobe walls and timber roof burned almost completely, to make necessary a subsequent complete restoration.

The main goal of the work has been the implementation of the GIS database, in order to provide a first analysis, detecting the most fire hazard Valparaiso prone areas. The basic work steps have been the following:

- to gather and organize all the available information into a digital GIS database, according to the existing cartography owned by the Valparaiso Municipality;
- to identify the basic parameters for the analysis (street accessibility, hill slope exposure, vegetation covering, urban covering);
- to implement a GIS database identifying the areas with the greatest fire hazard (Figure 21).





Figura 20. La Iglesia de San Francisco después del incendio (1983)  
Figure 20. The San Francisco Church after the fire (1983)

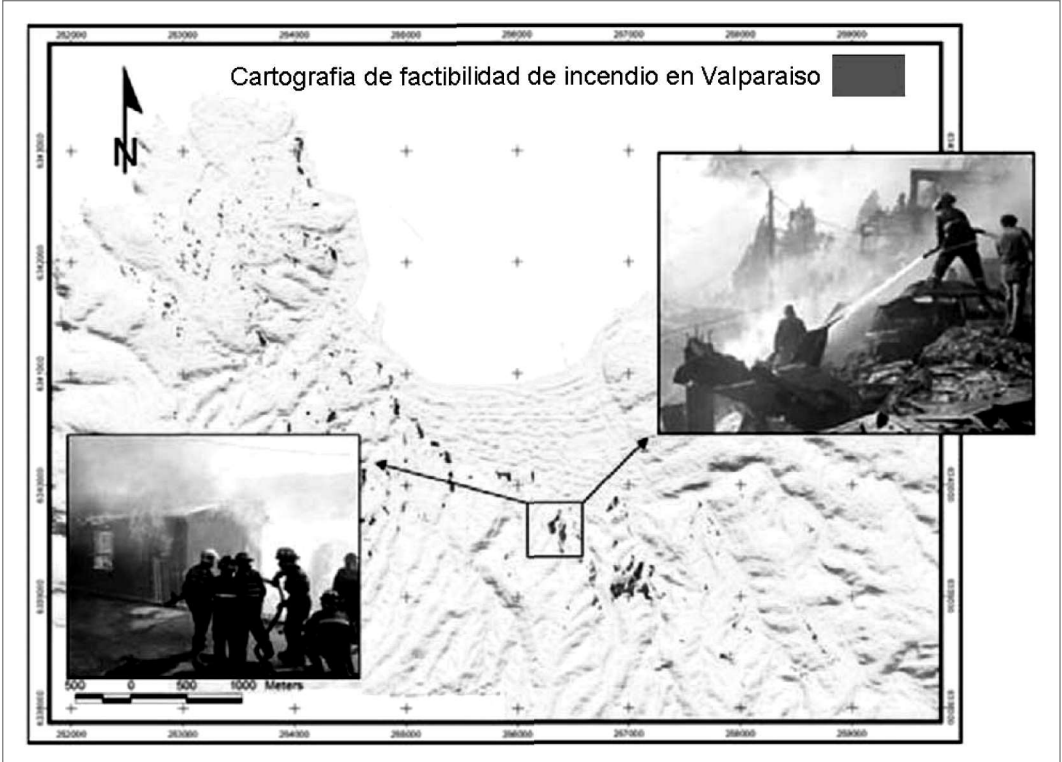


Figura 21. Mapa de peligro de incendios para un par de incendios recientes en Valparaíso  
Figure 21. Fire hazard map and location of a couple of recent fire events in Valparaíso

El trabajo ha sido comprobado por un par de eventos incendiarios: éstos ocurrieron exactamente en las zonas más propensas, identificadas por la base de datos SIG. Los detalles están documentados en Peligro de Fuego 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

The work has been verified by a couple of recent fire events: they occurred exactly in one of the most prone areas identified in the GIS database. Details are reported in Fire hazard 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

3.5 Inspecciones

En el curso de las misiones en Valparaíso, se realizaron numerosas inspecciones en terreno. Primero, alrededor de 50 puntos fueron medidos con un SDPG (Sistema Diferencial de Posicionamiento Global), para medir las coordenadas SIG, permitiendo despejar las dudas y aclarar inequívocamente las posiciones geográficas reales (Figura 22, ver Sección 3.6). En realidad la cartografía digital entregada por la Municipalidad de Valparaíso (calles, edificios, puntos citados, y otra información) a menudo no era bastante precisa y no concordaba con las fotografías aéreas de la región de Valparaíso. Las tres iglesias (ver Sección 4.2) y el acervo arquitectónico del Cerro Cordillera (ver sección 5) han sido documentados a través de fotografías (arquitectura, planificación urbana, características estructurales, daño y mantención). Se realizó una completa inspección empleando un escáner láser 3D, nuevamente en las iglesias. Los detalles se encuentran informados en la Inspección DGSP 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

3.5 Surveys

During the Valparaíso missions, several field surveys have been carried out. Firstly, about fifty points have been measured by DGPS (Differential Global Positioning System), to check the GIS coordinates, enabling to remove uncertainties and clarify univocally the real geographic position (Figure 22, see Section 3.6). In fact, digital cartography provided by Valparaiso Municipality (streets, buildings, quoted points, and other information) was often not very accurate and didn't match the aerial photo of the Valparaiso region. The three churches (see Section 4.2) and the Cerro Cordillera (see Section 5) building stock have been documented through pictures (architecture, urban planning, structural features, damage and maintenance). A complete 3D laser scanner survey, again on churches, have been done. Details are reported in DGPS survey 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

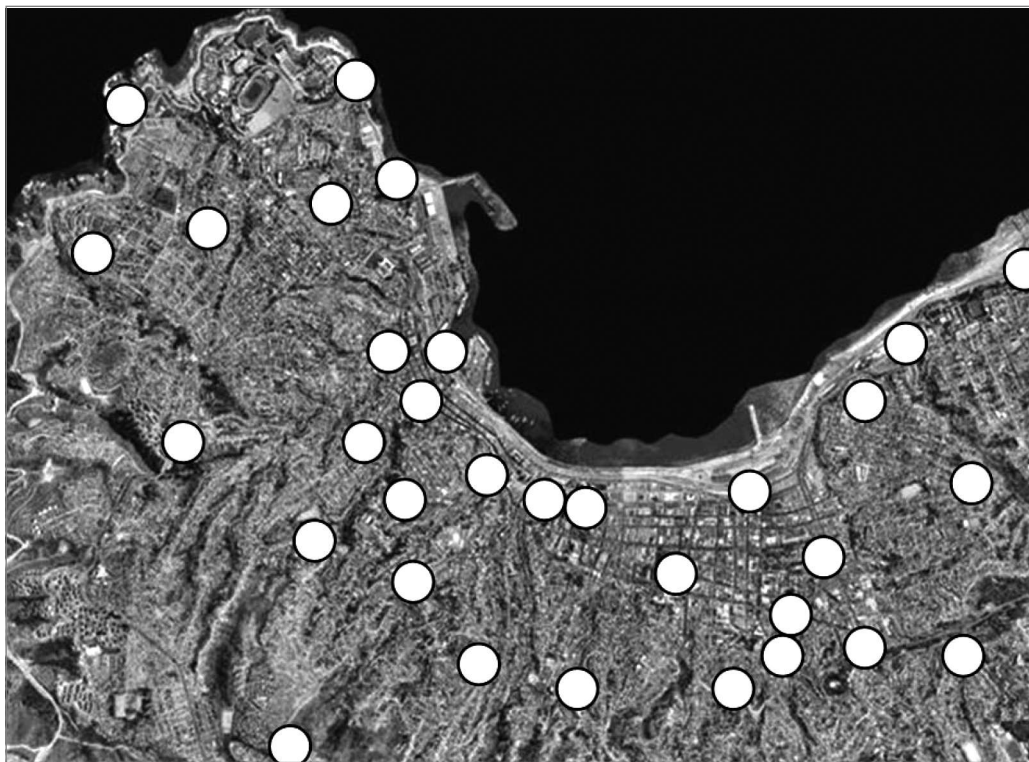


Figura 22. Ubicación de los puntos medidos por DGPS  
 Figure 22. Location of the points measured by DGPS

### 3.6 Desarrollo SIG

La elaboración de la base de datos SIG comenzó en Italia y continuó en, ambos países, Italia y Chile durante toda la duración del proyecto. Fue indispensable construir en ENEA un DEM (Modelo de Elevación Digital) del área de Valparaíso, generando ortofotos de cada una de las útiles fotos aéreas entregadas por el SHOA. La base de datos geo-referenciada SIG es una herramienta indispensable para almacenar los datos de peligro (terremotos, tsunamis, derrumbes de tierra, incendios), investigación de planificación urbana y arquitectónica, análisis de vulnerabilidad, propuestas de intervención, etc., siendo el resultado final del extenso trabajo, la entrega mapas claros y amistosos para el usuario (ver Figura 23), enfocándose en el área piloto del Cerro Cordillera (Ver Sección 5). En realidad, la arquitectura original del SIG identificada para este sector podría ser fácilmente extendida en el futuro a toda la zona histórica de la ciudad, dentro del marco de nuevas etapas de investigación.

La base de datos SIG provee un DEM, mapas aéreos, topobatimetría, capas peligrosas, capas urbanas, mapas históricos geo-referenciados de las capas, y capas que se enfocan en los análisis de planificación urbana, estructural y arquitectónica para el sector piloto del Cerro Cordillera. Los detalles están documentados en base de datos SIG 2008. (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 3.6 GIS development

The GIS database set up started in Italy and continued both in Italy and Chile for all the project duration. It has been indispensable to build at ENEA a detailed DEM (Digital Elevation Model) of the Valparaiso area, by generating ortho-photos from the very helpful aerial photos provided by SHOA. The GIS geo-referenced database, an indispensable tool in order to store hazard data (earthquake, tsunami, landslide, fire), architectonic and urban planning investigation, vulnerability analysis, intervention proposals, etc., is the final output of the entire work, giving clear and user-friendly maps (see Figure 23), focusing also the pilot area in the Cerro Cordillera (see Section 5). In fact, the original GIS architecture identified for this selected sector could be easily extended in the future to all the historic city, in the framework of further research stages.

The GIS database provides a DEM, aerial maps, a topo-batimetry, hazard layers, urban layers, georeferenced historic maps layers, and layers focusing the architectonic, structural and urban planning analyses in the Cerro Cordillera pilot sector. Details are reported in GIS database 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

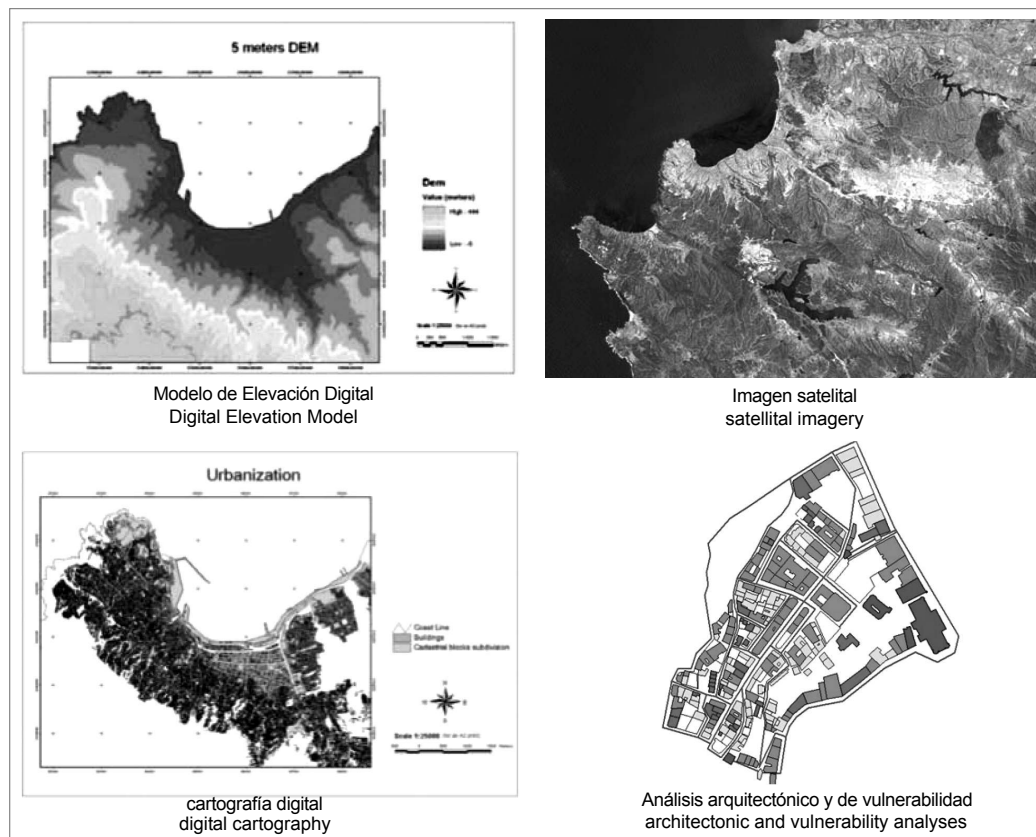


Figura 23. Datos de la base de datos SIG  
Figure 23. Data from the GIS database



### 3.7 Actividades Multimedia

Todas las actividades en terreno fueron filmadas. En particular, durante el trabajo en Cerro cordillera, se produjo una importante interacción con los residentes (a través de entrevistas), para explicar los objetivos de la investigación y recibir información sobre su conciencia del peligro.

Se han realizado numerosas presentaciones del proyecto "MAR VASTO" (una charla en la conferencia "El terremoto de Valparaíso de 1906" dentro del marco del VI Congreso Chileno de Geotecnia organizado por la Universidad Católica de Valparaíso el 29 de Noviembre de 2007; un seminario específico organizado por la Universidad Federico Santa María de Valparaíso el 22 de 2007; la conferencia final del proyecto MAR VASTO realizada en la iglesia "San Francisco del Barón" en Valparaíso y un poster en el SAHC-08, Análisis Estructural de Construcciones Históricas, Bath, Reino Unido, Julio 2-4, 2008). Además, se han realizado conferencias de prensa junto con el Alcalde de Valparaíso y se han publicado artículos de prensa durante las actividades en terreno. Finalmente se ha elaborado un proyecto de sitio web (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

## 4. Investigación en las iglesias

### 4.1 Breve descripción de las iglesias

Periódicamente destruida por terremotos, tsunamis e incendios, la actual y cuarta versión de la "Iglesia del Salvador, Matriz de Valparaíso" fue construida desde 1837 a 1842 (con modificaciones después de 1897) y se encuentra en el lugar original de la primera capilla, construida luego del descubrimiento de la Bahía de Valparaíso en 1559, en el antiguo núcleo del "Puerto". La iglesia (Figura 24) posee un simple estilo neoclásico, está hecha con muros de adobe perimetral (altura 12 mts y espesor de 1.30 mts), posee una fachada de albañilería y techo de tejas de arcilla. La torre del campanario (altura 40 mts), modificada a fines del siglo 19, está hecha de madera y tiene una escalera de hierro en forma espiral en el interior. Las columnatas interiores que forman las naves, también están hechas de madera. En el siglo 20 se produjo cierto daño debido a la actividad sísmica, escasa mantención y ataques de termitas. Se han hecho intervenciones parciales entre 1971 y 1988.

### 3.7 Multimedia activities

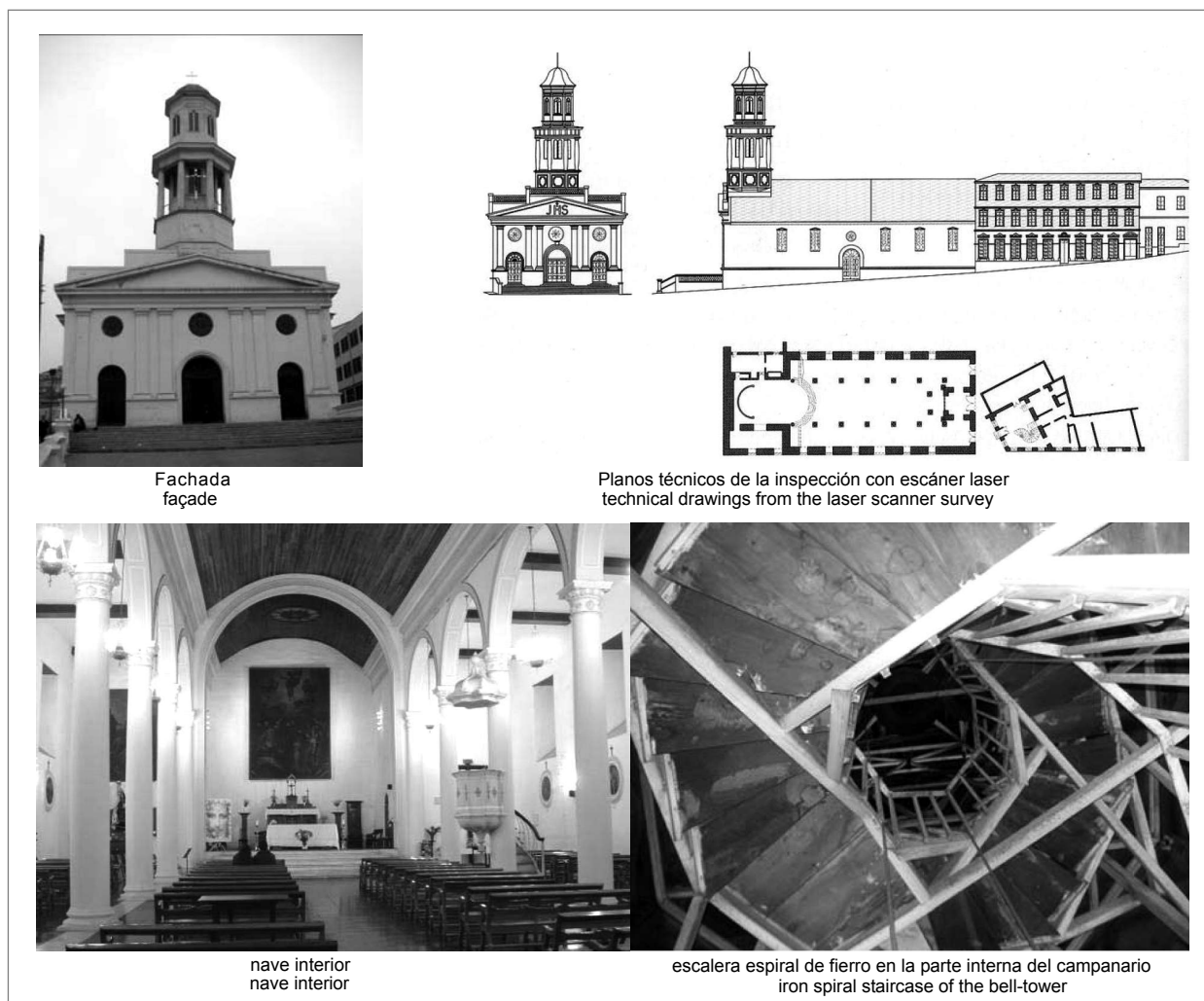
All the in-field activities have been filmed. In particular, during the work in the Cerro Cordillera, an important interaction with the resident people (through interviews) has been developed, in order to explain the research goals and receive their feedback about risk awareness.

Several presentations of the "MAR VASTO" project have been carried out (an invited lecture at the conference "El terremoto de Valparaíso de 1906" in the framework of the VI Chilean Congress of Geotechnics, held by the Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, November 29, 2007; a specific seminar organized at the Universidad Federico Santa Maria of Valparaíso, November 22, 2007; the final "MAR VASTO" Conference at the "San Francisco del Barón" Church in Valparaiso and a poster at the SAHC'08, Structural Analysis of Historic Constructions, Bath, United Kingdom, July 2-4, 2008). Furthermore, press conferences together with the Mayor of Valparaíso and press articles during the in-field activities have been carried out. Finally, a project website has been provided (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

## 4. The investigation on the churches

### 4.1 A brief description of the churches

Periodically destroyed by earthquakes, tsunamis and fires, the present fourth version of the "Iglesia del Salvador, Matriz de Valparaíso" was constructed from 1837 to 1842 (and modifications after 1897), in the same place of the original first chapel, built after the discovery of the Valparaíso Bay in 1559, in the ancient nucleus of the "Puerto". The church (Figure 24), in simple neoclassic style, is made by adobe perimetral walls (height 12 m and thickness 1.30 m), masonry façade, with a roof by clay tiles. The bell-tower (height 40 m), modified at the end of the 19<sup>th</sup> century, is wooden made and presents an iron spiral staircase inside. The internal colonnades, forming the naves, are also wooden made. In the 20<sup>th</sup> century a certain damage occurred, due to seismic activity, scarce maintenance and termite attacks. Partial interventions have been done between 1971 and 1988.



Fachada  
façade

Planos técnicos de la inspección con escáner laser  
technical drawings from the laser scanner survey

nave interior  
nave interior

escalera espiral de hierro en la parte interna del campanario  
iron spiral staircase of the bell-tower

Figura 24. “La Matriz”

Figure 24. “La Matriz”

La “Iglesia San Francisco del Barón” (Figura 25) fue construida cuando los Franciscanos se mudaron desde el “Puerto” al Cerro Barón, desde 1845 a 1851 (gruesas paredes de adobe, columnas de madera, tejas de arcilla fueron luego reemplazadas por planchas de acero galvanizado). Posteriormente se agregaron edificios adyacentes y claustros. La torre neo-barroca y la fachada fueron levantadas en 1890-92, gracias al proyecto del arquitecto Eduardo Provasoli (albañilería de ladrillo en forma de mortero de cal). La iglesia enfrentó varios terremotos (principalmente 1906 y 1985) sin colapsar, pero durante la investigación se determinó un severo daño en la torre del campanario y en los pórticos. En 1983 las naves de la iglesia fueron consumidas por el fuego (Figura 20) y posteriormente reconstruidas empleando técnicas similares.

The “Iglesia San Francisco del Barón” (Figure 25) was constructed when the Franciscans moved from the “Puerto” to the Barón Hill, from 1845 to 1851 (thick adobe walls, wood colonnades, clay tiles later replaced by galvanized iron plates). Later, adjacent buildings and cloisters were added. The neo-baroque tower and façade were erected in 1890-92, thanks to the project of the architect Eduardo Provasoli (brick masonry set in lime mortar). The church faced several earthquakes (mainly 1906 and 1985) without collapse, but a severe damage was found mainly in the bell-tower and the arcades during the investigation. In 1983, the church naves were burned by a fire (Figure 20) and later reconstructed using similar techniques.

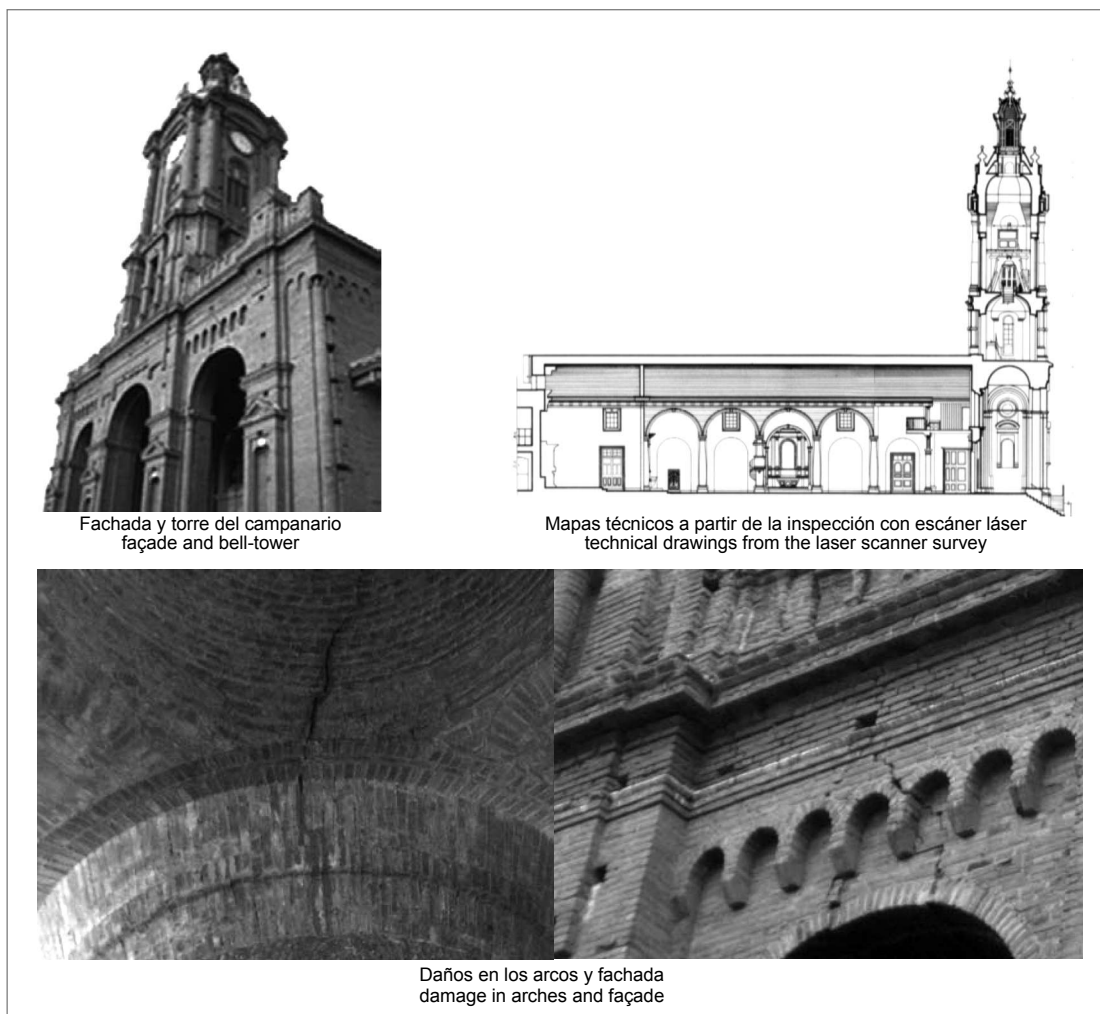


Figure 25. "San Francisco del Barón"  
 Figure 25. "San Francisco del Barón"

La primera "Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia" (Figura 26), construida en el "Puerto" después de 1867, fue destruida por un incendio en 1880. Luego una segunda versión fue levantada en el Cerro Merced (1880-1883), pero colapsó casi completamente por el terremoto de 1906 y fue demolida con posterioridad. El edificio actual (diseñado por el arquitecto Víctor Auclair con un estilo neo-renacentista, pero empleando un raro y primitivo concreto reforzado) está ubicada en El Almendral, a los pies del Cerro Merced, exactamente donde la intensidad alcanzó su mayor valor (Figura 5). La Iglesia, golpeada por el evento sísmico de fue severamente dañada y declarada insegura (para una acuciosa descripción de las iglesias, ver Waisberg 1992; detalles también están disponibles en Evaluación de Vulnerabilidad de las Tres Iglesias 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>)).

The first "Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia" (Figure 26), built in the "Puerto" after the 1867, was destroyed by a fire in 1880. Then, a second version was erected on the Merced Hill (1880-1883), but collapsed almost completely due to the 1906 earthquake and later demolished. The present building (designed by the architect Víctor Auclair in a neo-renaissance style but made by a rare primitive reinforced concrete) is located in the Almendral at the Merced foothill, exactly where the Intensity reached the maximum value (Figure 5). The church, hit by the 1985 seismic event, was severely damaged and declared unsafe (for an accurate description of the churches, see Waisberg 1992; details are also available in Evaluation of the vulnerability of three churches 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>)).

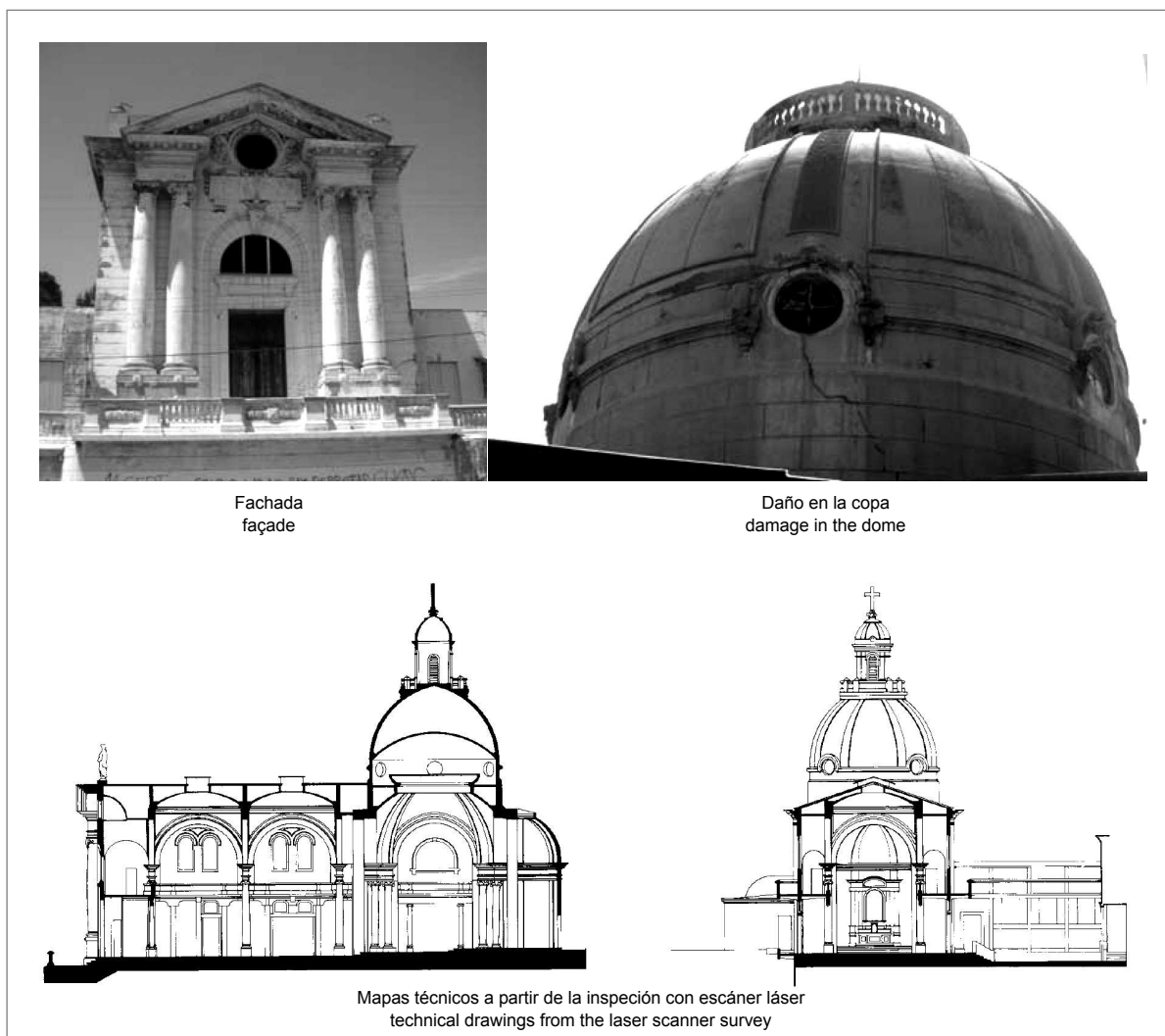


Figure 26. “Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia”  
 Figure 26. “Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia”

#### 4.2 Inspección con escáner laser 3D

La inspección con escáner laser 3D se realizó en cooperación con la empresa Geocom en Santiago y el cuerpo de Bomberos de Valparaíso y fue ejecutada en las tres iglesias (Figuras 27-29). Escáner Láser es un equipo de fácil manejo, gran velocidad y precisión (2-6 mm de rango), particularmente útil para patrimonio cultural. El proceso puede ser dividido en tres etapas: levantamiento de datos (en varias estaciones, que deben ser cuidadosamente combinadas); creación del modelo geométrico; elaboración de resultados (archivos de estado real, modelos de elementos finitos y planos de secciones planas y frontales). La gran cantidad de materiales ha sido procesada con el fin de obtener datos geométricos útiles para proyectos y análisis estructural. Detalles disponibles en Inspección con Escáner Laser 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

#### 4.2 The 3D laser-scanner survey

In cooperation with Geocom Santiago and the Valparaíso Firemen Corp, a 3D laser scanner (LS) survey has been completed for the three churches (Figures 27-29). LS is an easy-handling equipment of high velocity and accuracy (2-6 mm of range), particularly useful for cultural heritage. The process can be divided in three steps: data acquisition (from several stations which must be combined with care), geometric model creation, output elaboration (real status archives, Finite Element Models and plan, front, section drawings). The huge amount of materials has been processed in order to obtain geometric data useful for projects and structural analyses. Details are available in Laser scanner survey 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

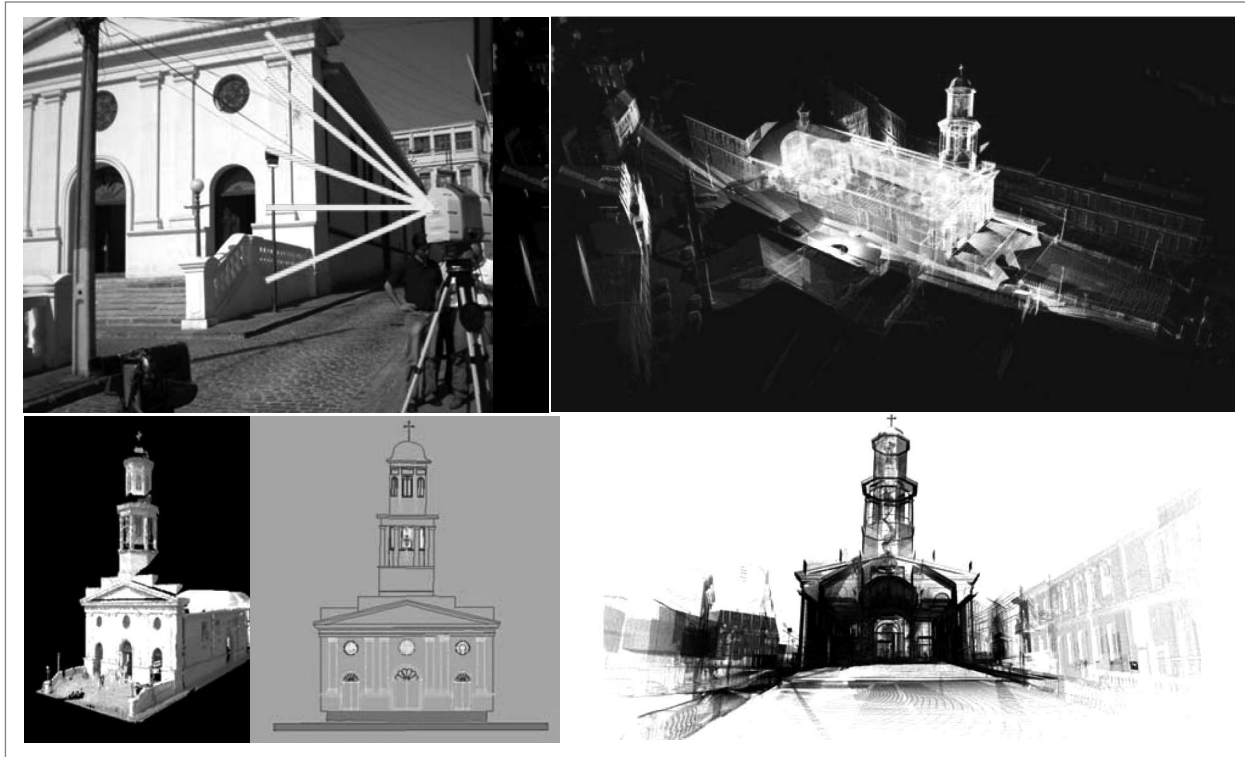


Figura 27. Escáner Laser en “La Matriz”  
Figure 27. Laser scanner at “La Matriz”



Figura 28. Escáner Laser en “San Francisco”  
Figure 28. Laser scanner at “San Francisco”

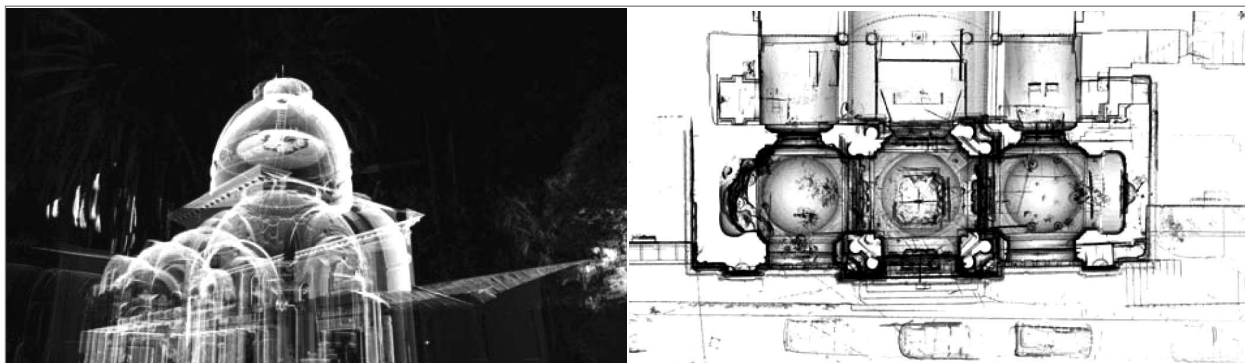


Figura 29. Escáner Laser en “Las Hermanas”  
Figure 29. Laser scanner at “Las Hermanas”

### 4. 3 Análisis de vulnerabilidad sísmica

El daño y la vulnerabilidad han sido evaluados empleando un procedimiento italiano bien conocido; consiste en completar formularios específicos de investigación concebidos para las iglesias (Molise 2003). El procedimiento está basado en una identificación cualitativa de los parámetros seleccionados (Figura 30).

### 4.3 The analysis of seismic vulnerability

Damage and vulnerability have been evaluated by using a well known Italian procedure, completing specific survey forms conceived for churches (Molise 2003). The procedure is based upon a qualitative identification of selected parameters (Figure 30).

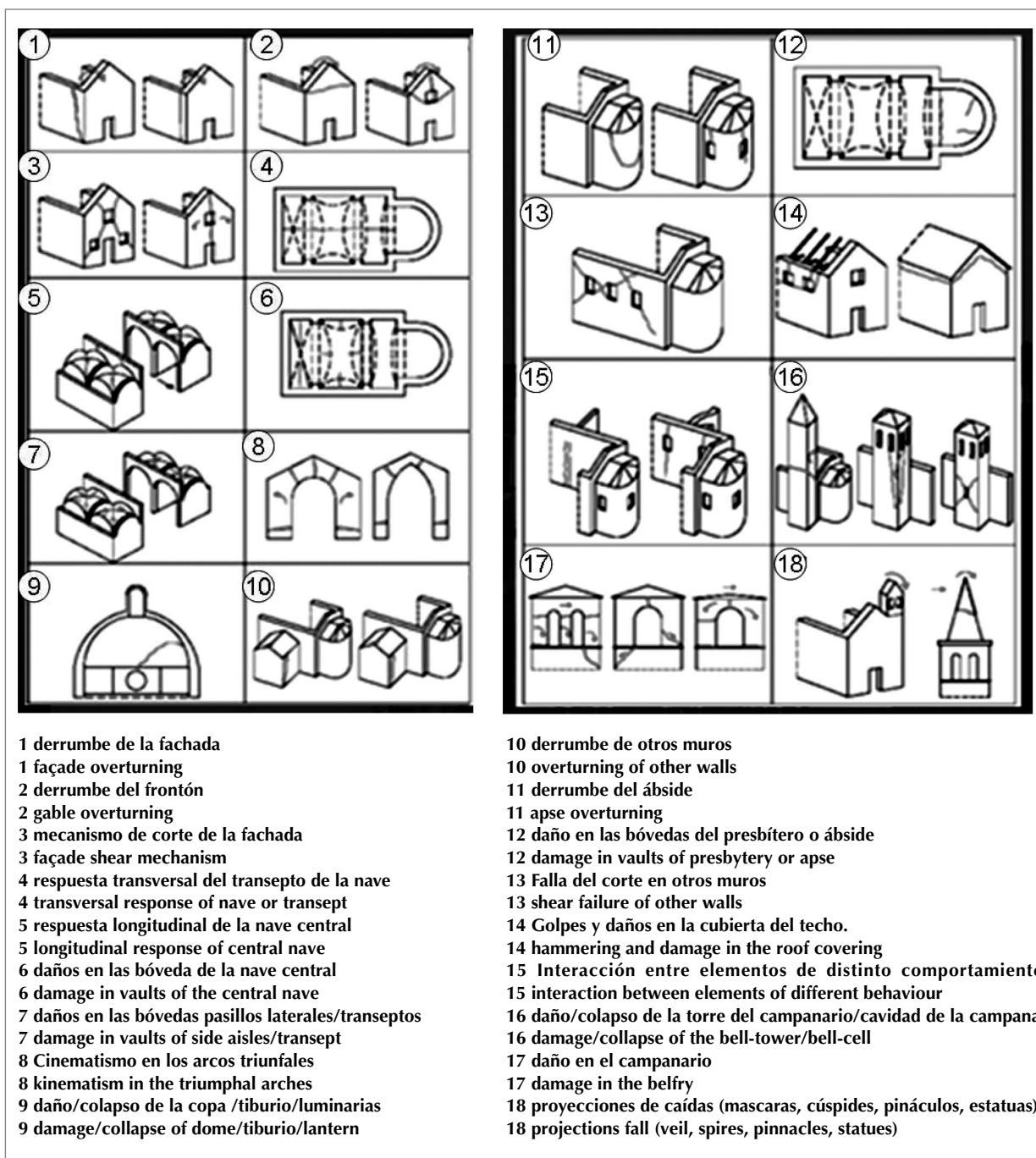


Figura 30. Esquemas de los formularios italianos para la evaluación del daño/vulnerabilidad en iglesias  
Figure 30. Sketches from the Italian form for the evaluation of churches damage/vulnerability

Puesto que la completa aplicación de la metodología es mostrada en la Evaluación de la Vulnerabilidad de las Iglesias 2008, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>, solo indicamos los resultados finales del estudio.

En “La Matriz”, el índice de daño global indica cerca de un 8%, que es un valor muy bajo; los mecanismos más importantes son: mecanismo de corte de fachada, daño/colapso de la torre del campanario y la cavidad de la campana. La situación es bastante buena desde el punto de vista sísmico; por esta razón no parece ser particularmente necesario efectuar cálculos numéricos en esta etapa preliminar de la investigación. Por otra parte, por cierto este edificio necesita una mejoría en la protección contra incendios, junto con medidas de preservación contra materiales de degradación y ataques de termitas (en particular para elementos de madera). Se puede prevenir intervenciones de reforzamiento muy simples, como instalar tirantes horizontales a la fachada y la nave, para minimizar el derrumbe fuera del plano. En “San Francisco”, el índice de daño global indica alrededor de 33%, pero el índice de daño local en la fachada y torre del campanario (66%) es muy alto; los mecanismos de daño más importantes son: derrumbe de la fachada, derrumbe del frontis, mecanismo de corte de la fachada; respuesta longitudinal de la nave central; falla del corte en otros muros; proyecciones de caídas (mascaras, cúspides, pináculos, estatuas); daño/colapso de la torre del campanario/de la cavidad de la campana. Las principales características del modelo FEM para cálculos preliminares se muestran en la Figura 31. Gracias a la simetría estructural, las formas modales de la iglesia principal muestran que la torre del campanario tiene un comportamiento que tiende a balancearse. Estos datos han sido empleados en un análisis cinemático lineal y no-lineal en los mecanismos de derrumbe (ver abajo, intervención de Prompt 2009).

La actual situación del daño debe ser considerada como preocupante, debido a que el colapso total o parcial (especialmente en la torre del campanario y en la fachada) pueden ocurrir en caso de terremoto (es decir movimientos telúricos de mediana o alta intensidad, como ocurre en la zona de Valparaíso); de hecho la iglesia no es segura y debe ser cerrada con urgencia, en forma parcial o total, planificando una intervención de reforzamiento lo antes posible. La construcción parece ser (en la fachada y en la torre del campanario) un trabajo común de albañilería de ladrillos, pero se recomienda firmemente realizar pruebas de diagnóstico. El edificio muestra amplio y serio daño estructural y falta de protecciones antisísmicas, aún si un par de amarres originales de acero estuvieran presentes y fueran efectivos. Los principales pasos de intervención se pueden prever de la siguiente manera:

Because the complete application of the methodology is shown in Evaluation of the vulnerability of three churches 2008, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>), only the final results are given here.

In “La Matriz”, the global damage index speaks about 8%, which is a very low value; the most important mechanisms are: façade shear mechanism; damage/collapse of the bell tower/bell-cell. The situation is good enough from the seismic point of view; for this reason, numerical calculations didn't seem particularly necessary, at this preliminary investigation state. On the other hand, this building needs surely an improvement of fire protection, together with preservation measures against materials degradation and termite attack (in particular for wooden elements). Very simple strengthening interventions can be foreseen, as the insertion of horizontal tie-rods connecting façade and nave, in order to minimize also out-of plane overturning. In “San Francisco”, the global damage index speaks about 33%, but the local damage index in the façade and bell-tower (66%) is very high; the most important damage mechanisms are: façade overturning; gable overturning; façade shear mechanism; longitudinal response of central nave; shear failure of other walls; projections fall (veil, spires, pinnacles, statues); damage/collapse of the bell-tower/bell-cell. The FEM model principal features for preliminary calculations are shown by Figure 31. Thanks to the structural symmetry, the church principal modal shapes show a prevalence of a bending behaviour of the bell-tower. These data have been used in linear and non linear kinematic analysis of the overturning mechanisms (see below, Prompt intervention 2009).

The present damage situation must be considered very worrying, because partial or total collapse (especially in the bell-tower and in the façade) can occur in case of earthquake (i.e. medium to high magnitude seismic excitations, as expected in the Valparaiso area); in fact, the church is unsafe and urgently must be closed partially or totally, planning a strengthening intervention as soon as possible. The construction seems to be (in the façade and in the bell-tower) a very regular masonry brickwork, but diagnostics testing is strongly recommended. The building shows heavy widespread structural damage and lack of effective antiseismic protections, even if a couple of original steel ties is still present an effective. The main intervention steps can be foreseen as follows:



- reforzar todas las partes o de todos los elementos resistentes, aumentando selectivamente la resistencia, rigidez, ductilidad o una combinación de éstos (siempre prestando cuidadosa atención a las modificaciones introducidas al esquema estructural); se puede realizar: incrementando la resistencia de la albañilería, a través de reparaciones locales en las partes agrietadas o deterioradas; reconstruyendo la unidad de albañilería más debilitada o deteriorada, empleando materiales con propiedades mecánicas y físico-químicas análogas; aplicando técnicas no-invasivas usadas en Italia como rasgar y coser, inyectar una mezcla de agentes adherentes, rediseñar las juntas;
- introducir nuevos elementos que sean compatibles con los existentes, eliminando la vulnerabilidad local de ciertas partes de la construcción y mejorar la funcionalidad general en términos de resistencia o ductilidad; se puede hacer principalmente a través de técnicas tradicionales, como la introducción de amarres (ubicados en las dos direcciones horizontales de la estructura, en el nivel de los pisos y en relación a las paredes de soporte) ancladas a la albañilería; los arcos y bóvedas se pueden reforzar también empleando amarres (normalmente ubicados en la parte trasera), ubicados en un lugar adecuado y previamente aprobado; otros métodos (envolver con concreto o franjas de materiales compuestos) deben ser evaluados con cuidado.

Una pronta intervención del proyecto para la fachada de la iglesia y la torre del campanario (incluyendo la evaluación de los mecanismos de derrumbe más importantes con un análisis cinemático lineal y no-lineal) ha sido entregada por el equipo italiano (enero 2009) a la Arquidiócesis y Gobierno Regional de Chile, con el fin de restablecer la seguridad del monumento a la brevedad posible (intervención de Prompt 2009).

- reinforcement of part or all the resistant elements, increasing selectively resistance, stiffness, ductility or a combination of these (always paying careful attention to induced modifications to the structural scheme); it can be done: increasing the strength of masonry, through local repairs to cracked or deteriorated parts; reconstructing masonry unity in the most weak or deteriorated parts, utilizing materials with analogous physical-chemical and mechanical properties; common non invasive techniques used in Italy are rip and sew, injections of mixed bonding agents, redrafting the junctions;
- insertion of new elements which are compatible with existing ones, eliminating local vulnerability of certain parts of the construction and improving the overall functionality in terms of resistance or ductility; it can be done mainly through the traditional techniques, as the insertion of tie-rods (placed in the two horizontal directions of the structure, at the level of floors and in correspondence to bearing walls) anchored to the masonry; arches and vaults can be strengthened also using tie-rods (normally placed at the rear), put in place with adequate pre-solicitation; other methods (jacketing by concrete or strips of composite materials) should be evaluated with care.

A prompt intervention project for the church façade and bell-tower (including the evaluation of the most important overturning mechanisms with linear and non linear kinematic analysis) has been provided by the Italian team (January 2009) to the Archbishop and the Chilean Regional Government, in order to put the monument in safety as soon as possible (Prompt intervention 2009).

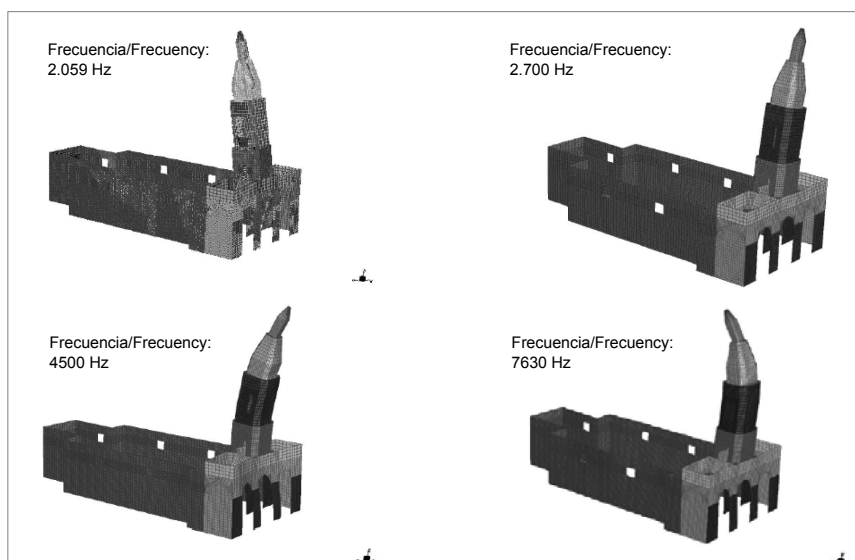


Figura 31. Modelo FEM para la Iglesia de San Francisco  
 Figure 31. FEM model for the San Francisco Church



La “Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia” está caracterizada por un alto índice de daño global de alrededor del 58%. Muchos parámetros críticos son evidentes: derrumbe del frontis; mecanismo de corte de la fachada; respuesta transversal de la nave o transepto; respuesta longitudinal de la nave central; daño en las bóvedas de la nave central; daño en las bóvedas de los pasillos laterales/transepto; cinematismo los arcos triunfales; daño/colapso de la copa/tiburio/luminarias; derrumbe del ábside; daño en las bóvedas del presbiterio o ábside; falla del corte de otros muros; golpes y daños en la cubierta del techo.

Las características principales del modelo FEM para los cálculos preliminares son mostrados en la Figura 32. Estos confirman la mayoría de los mecanismos de daño revelados por la evaluación de vulnerabilidad rápida; el elemento componente de torsión es evidente y la cúpula es, por cierto, un elemento estructural en riesgo de colapsar.

La situación actual debe ser considerada muy seria, ya que el colapso total o parcial (en numerosas zonas estructurales, debido a la debilidad propagada) puede ocurrir en caso de sismo (es decir de mediana o alta magnitud sísmica), como se espera en el área de Valparaíso.

Además, la iglesia está ubicada en el área X de mayor intensidad, como fue demostrado durante los eventos sísmicos de 1906 y 1985 (Figura 5). Actualmente la iglesia (declarada insegura después del daño sufrido por el terremoto de 1985) se encuentra completamente cerrada.

Debido a la particular tipología del material de construcción (concreto reforzado primitivo muy raro en el mundo), un reforzamiento con técnicas convencionales puede ser ineficaz e invasivo, sin embargo se debe planear una solución después de realizar una detallada caracterización del material y de un trabajo de diseño. Como sugerencia, se puede imaginar un proyecto innovador, con el fin de reducir drásticamente el impacto sísmico, como la introducción de un sistema base de aislación (con toda la debida precaución, evitando la elevación y el corte de los muros cimientos, a través de la introducción de un nuevo sistema de sub-cimiento), que pareciera posible debido a la ausencia de bóveda subterránea. La oportunidad de realizar un estudio de factibilidad para la solución mencionada, a desarrollar por un grupo de expertos chilenos-italianos, debiera ser tomada en cuenta en el futuro. Finalmente una misión de investigadora en Chile está prevista por el equipo italiano (para la primera mitad de Abril 2010), después del terremoto del 27 de febrero de 2010. Dentro de las actividades generales, se realizará una nueva inspección a las tres iglesias mencionadas, con el fin de actualizar la información.

The “Capilla de Las Hermanas de la Divina Providencia” is characterized by a high global damage index of about 58%. A lot of critical parameters is evident: gable overturning; façade shear mechanism; transversal response of nave or transept; longitudinal response of central nave; damage in vaults of the central nave; damage in vaults of side aisles/transept; kinematisism in the triumphal arches; damage/collapse of dome/tiburio/lantern; apse overturning; damage in vaults of presbytery or apse; shear failure of other walls; hammering and damage in the roof covering.

The FEM model principal features for preliminary calculations are shown by Figure 32. They confirm most of the damage mechanisms revealed by the quick vulnerability evaluation; a torsional component is evident and the dome is certainly a structural element at risk of collapse.

The present damage situation must considered very worrying, because partial or total collapse (in several structural parts, due to widespread weakness) can occur in case of earthquake (i.e. medium to high magnitude seismic excitations, as expected in the Valparaiso area.

Moreover, the church is located in the X highest Intensity area, as shown by the 1906 and 1985 seismic events (Figure 5). The church (declared unsafe after the damage subjected by the 1985 earthquake) is now almost completely closed. Due to the very particular typology of the construction material (a primitive reinforced concrete very rare in the world), a strengthening intervention with conventional techniques can be ineffective or very invasive, but a proper solution should be planned only after a detailed material characterization and design work. As a suggestion, an innovative project can be imagined, in order to reduce drastically the seismic input, as the introduction of a base isolation system (with all the due precaution, avoiding elevation and foundation wall cutting, by means of the insertion of a new subfoundation system), that seems possible due to the apparent absence of a crypt. The opportunity to do a feasibility study on the above said solution, by a Chilean-Italian group of experts, should be taken into account in the future. Finally, an investigation mission in Chile is foreseen by the Italian team (first half of April, 2010) after the February 27, 2010 earthquake. Among the overall activity, a new survey on the above said three churches shall be surely performed, to update the information.



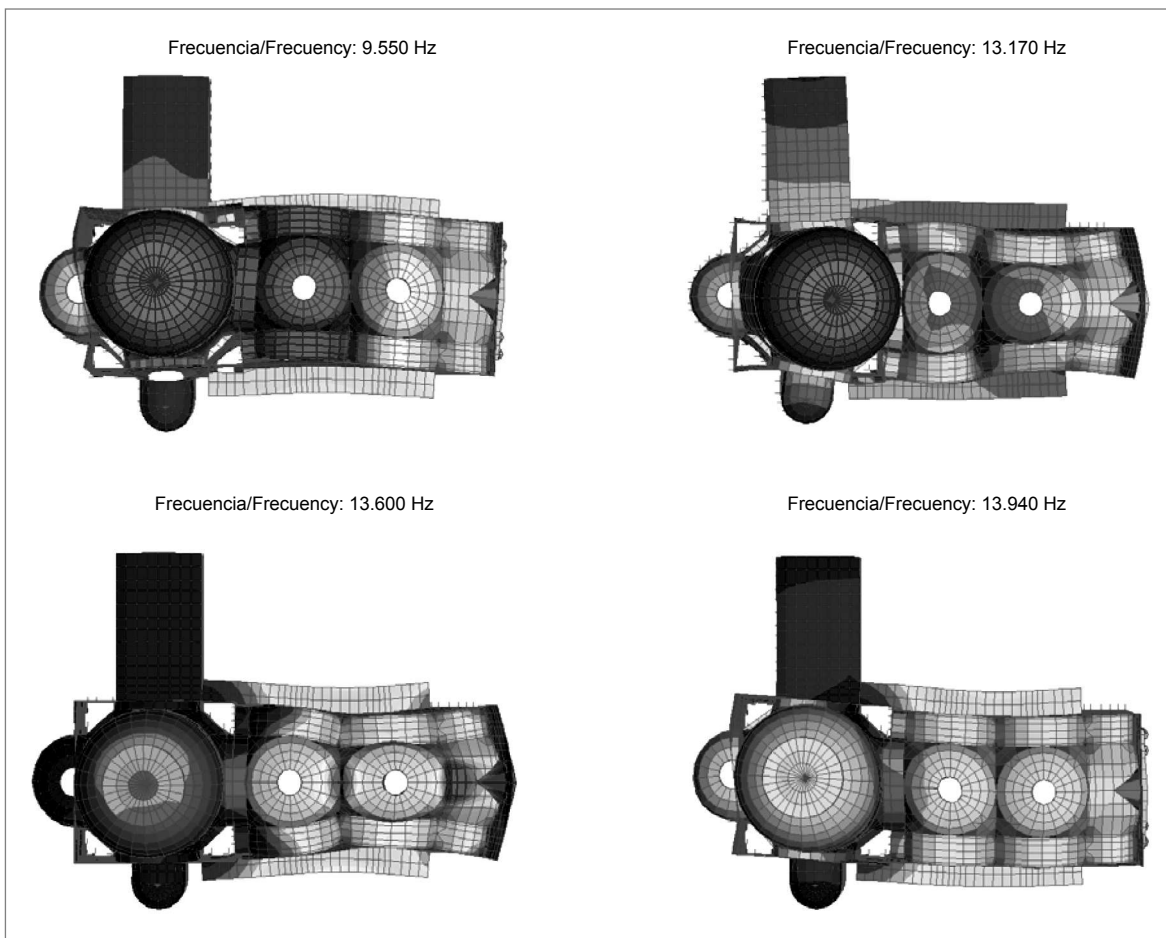


Figura 32. Modelo FEM para la iglesia Hermanas de la Providencia  
 Figure 32. FEM model for the Hermanas Church

## 5. El sector del cerro cordillera

### 5.1 Introducción

Los mapas de peligro geo-referenciados deben interactuar con un catastro de edificios y terrenos muy detallado, en el cual la planificación urbana y las construcciones individuales (arquitectura, características estructurales, vulnerabilidad, estado real, etc.) están ligados al contexto social y medioambiental que lo rodea (Indirli et al. 2006a). El trabajo específico, que une el análisis de planificación urbana y vulnerabilidad de los edificios para la reconstrucción de San Giuliano di Puglia, después del terremoto, es mostrado en Indirli 2009.

La zona piloto del Cerro Cordillera ha sido seleccionada en acuerdo con la Municipalidad de Valparaíso. Es un lugar históricamente “virgen”, socialmente complicado y un sector muy pobre, parcialmente dentro del área de la UNESCO, delimitado por la calle Serrano (en la zona del plano), por la estación del ascensor San Agustín (ladera del cerro) y por dos quebradas opuestas San Francisco y San Agustín (Figuras 33-35).

## 5. The sector of the cerro cordillera

### 5.1 Introduction

Georeferenced hazard maps must interact with a detailed land and building inventory, in which urban planning and single construction features (architecture, structural characteristics, vulnerability, real status, etc.) are linked to the surrounding environmental and social context (Indirli et al. 2006a). A specific work, crossing urban planning and building vulnerability analysis for the reconstruction of San Giuliano di Puglia after the earthquake, is given in Indirli 2009.

The Cerro Cordillera pilot zone has been selected in agreement with the Valparaíso Municipality. It is an historically “virgin”, socially complicated and poor sector, partially inside the UNESCO area, delimited by Calle Serrano (plan side), San Agustín cable car upper station (hill side), and by the two opposite “quebradas” of San Francisco and San Agustín (Figures 33-35).

Este estudio ha sido enunciado claramente, por lo tanto solo los resultados son presentados aquí. Para mayores detalles ver Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 5.2 Análisis de planificación arquitectónica y urbana

La investigación se interesó en 230 construcciones, 4 áreas públicas y 50 esquemas de redes de caminos. La información (arquitectura, función, condición estructural, calidad, etc.) ha sido tomada a través de inspecciones in situ (empleando planillas especiales elaboradas para Valparaíso) y luego almacenadas en el SIG. La Tabla 8 muestra justo un ejemplo del procedimiento para organizar y almacenar los datos de edificaciones. Lo mismo se hizo para espacios abiertos y redes de caminos.

Diferentes índices debidamente sobrepuestos (por ejemplo alta calidad arquitectónica y malas condiciones, ver Figura 36), permitieron identificar las prioridades de rehabilitación, in primis el ascensor San Agustín y sus alrededores.

Los detalles se encuentran en Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 5.3 Análisis de Vulnerabilidad

Tomando como base la clasificación de la planificación urbana arquitectónica SIG, antes mencionada, se realizaron análisis puntuales en 70 estructuras del sector piloto en el Cerro Cordillera, una vez que los datos catastrados exhaustivamente estuvieron disponibles (planos, prospectos, zonas, detalles de construcción, características geo-técnicas, etc.), excluyendo las viviendas ilegales e informales. Se elaboró una planilla especial, basada en los procedimientos italianos (Aedes 2000, GNDT 1999), y tomando en cuenta once parámetros (Tabla 9).

Los detalles se encuentran en Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

This study has been very articulated; therefore, only the main results are presented here. For details, see Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 5.2 Architectonic and urban planning analyses

The investigation interested 230 constructions, 4 public areas and about 50 road network stretches. The information (architecture, function, structural condition, quality, etc.) has been picked up through in situ surveys (by using special sheets elaborated for Valparaíso) and then stored in the GIS. Table 8 shows just an example of the procedure to organize and store data for buildings. The same has been done for open spaces and road network.

Different indexes properly overlapped (for example high architectonic quality and bad conditions, see Figure 36), enabled to identify rehabilitation priorities, in primis the San Agustín cable car and its surroundings.

Details are given in Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

### 5.3 Vulnerability analyses

On the base of the above mentioned architectonic and urban planning GIS classification, prompt vulnerability analyses interested 70 structures of the Cerro Cordillera pilot sector, when exhaustive cadastral data were available (plans, prospects, sections, construction details, geotechnical features, etc.), excluding informal and illegal houses. A special sheet has been elaborated, upon Italian established procedures (Aedes 2000, GNDT 1999), taking into account 11 parameters (Table 9).

Details are reported in Cerro Cordillera 2008 (<http://www.marvasto.bologna.enea.it>).

**Tabla 8. Formulario de análisis de planificación urbana y arquitectónica en la investigación de Valparaíso**  
**Table 8. Form for the architectonic/urban planning analyses in the Valparaiso investigation**

Sección 1: información general de edificaciones e identificación Section 1: identification and building general information	
ID – número de edificaciones SIG/ID – GIS building number	
Tipología/Typology	Adiciones horizontales/Horizontal additions
Estilo arquitectónico /Architectural style	Uso primario de la planta baja/Primary use at ground floor
Calidad de los elementos arquitectónicos/Quality of the architectonic elements	Uso primario de las plantas superiores/Primary use of upper floors
Presencia de fachada de interés/Presence of a facade of interest	Usos incompatibles/Incompatible uses
Número de pisos/Number of floors	Describe las características del uso de la edificación/Describe the characteristic building use
Propiedad/Property	Ocupación de la edificación/Building occupation
Modificaciones recientes/Recent alterations (in the last ten years)	Calidad arquitectónica general/General architectonic quality
Transformaciones en curso/Ongoing transformation	Nivel de interés/Level of interest
Adiciones verticales/Vertical additions	Nivel de integración en contexto urbano/Level of integration in the urban context
Sección 2: calidad de la edificación y de los materiales Section 2: building quality and materials	
Tipo de techo/Roof type	Tipología pilote de soporte/Support stilt typology
Material del techo exterior/External roofing material	Tipología pilote de soporte –material estructural/Support stilt typology – structural material
Condición del techo/Roof condition	Tipología pilote de soporte – estado, condición/Support stilt typology – state or condition
Tipología estructural primaria de la edificación /Primary building structural typology	Muros fuera de alineación/Out of alignment walls
Material externo de la estructura de soporte de carga/External material of load bearing structure	Extensión de la superficie agrietada/Extent of surface cracking
Condición de la edificación e integridad estructural/Building condition and structural integrity	Condición general de la edificación/General condition of the building
Condición del material de terminaciones exteriores/Condition of the external finishing material	
Sección 3: Fachadas principales de las edificaciones Section 3: building main facades	
Composición general de la fachada/General composition of the facade	balcones – materiales/Balconies - material
Planta baja – material de terminaciones exteriores/Ground floor –exterior finishing material	balcones – material barandilla/Balconies – balustrade material
Plantas superiores - material de terminaciones exteriores/Upper floors –exterior finishing material	balcones – condiciones generales/Balconies – general condition
Puertas – formas/Doors - shape	ornamentación – ubicación/Ornamentation - location
Puertas – materiales/Doors - materials	ornamentación – material/Ornamentation - material
Puertas – condición general/Doors – general condition	Ornamentación – tipo/Ornamentation - type
Ventanas – forma/Window - shape	Ornamentación – condición general/Ornamentation – general condition
Ventanas – material/Windows - material	Fachada – calidad arquitectónica general/Façade – general architectonic quality
Ventanas – condición general/Windows – general condition	Nivel de interés/Level of interest
Balcones – forma/Balconies - shape	Nivel de integración en contexto urbano/Level of integration into the urban context

**Tabla 9. GNDT Planilla de Parámetros para la investigación en el Cerro Cordillera**  
**Table 9. GNDT form parameters for the Cerro Cordillera investigation**

parámetro parameter		clase/class C <sub>vi</sub>				clase/weight P		
		A	B	C	D			
	Tipo y organización del sistema resistente/type and organization of the resistant system	0	5	20	45	1.00		
1	calidad del sistema resistente/quality of the resistant system	0	5	25	45	1.50		
2	resistencia convencional/conventional resistance	0	5	25	45	0.50		
3	cimientos y posición de la edificación/building position and foundations	0	5	25	45	0.75		
4	elementos horizontales /horizontal elements	0	5	15	45	0.35		
5	planimetría/planimetry	0	5	25	45	0.35		
6	regularidad de elevación/elevation regularity	0	5	25	45	0.35		
7	distancia máxima entre unidades estructurales/maximum distance between structural units	0	5	25	45	0.35		
8	techumbre/roofing	0	5	25	45	0.35		
9	elementos no-estructurales/non structural elements	0	0	25	45	0.75		
10	Situación actual/present situation	Param. 2: A-B		0	5	25	45	1.00
11		Param. 2: C-D		0	0	45	45	1.00
Índice de Vulnerabilidad V <sub>i</sub> /Vulnerability Index I <sub>v</sub>		$I_v = \sum_{i=1}^{11} C_{vi} P_i$						





Figura 33. Definición del área de estudio dentro de la clasificación de la UNESCO; el borde color púrpura muestra la zona de “conservación histórica” (designada por la UNESCO), el borde color verde indica la “zona típica” (zona de separación) y el borde rojo indica el área de estudio del Cerro Cordillera.

Figure 33. Definition of the study area within the UNESCO classification; the purple border indicates the “historical conservation” area (UNESCO designated), the green border indicates the “typical zone” (buffer zone) and the red border indicates the Cerro Cordillera study area

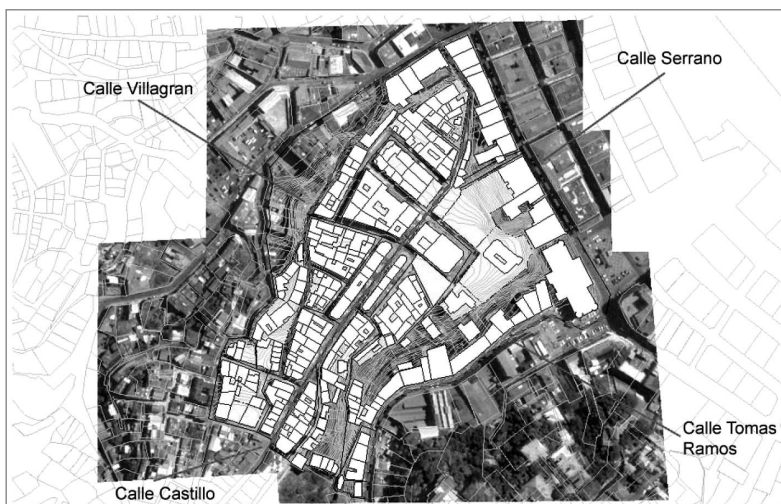


Figura 34. Cerro Cordillera: identificación del área de estudio y corredores urbanos  
Figure 34. Cerro Cordillera: identification of the study area and the urban corridors

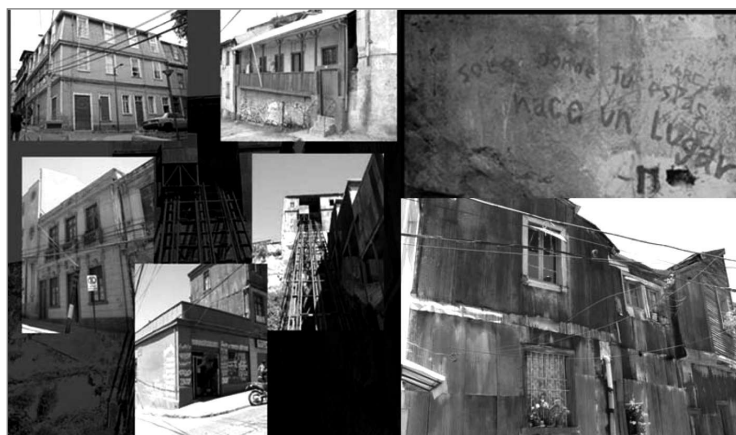


Figura 35. Algunas fotografías del Cerro Cordillera  
Figure 35. Some pictures of Cerro Cordillera

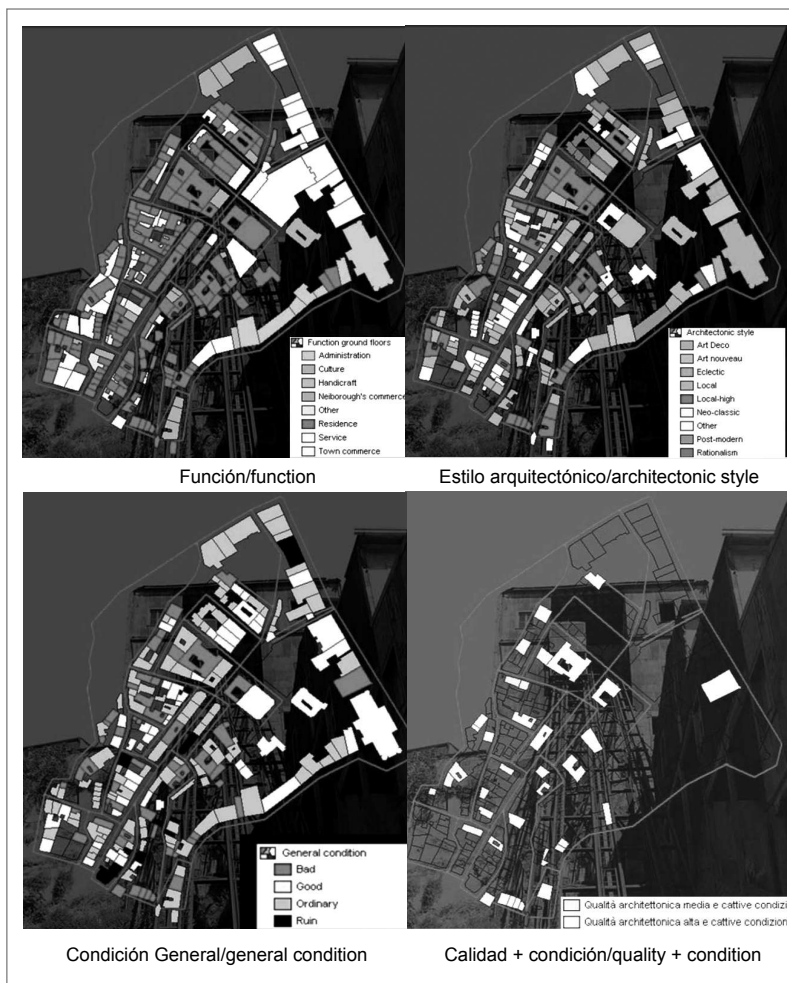


Figura 36. Investigación de planificación urbana y arquitectónica  
Figure 36. Architectonic and urban planning investigation

Gracias a los resultados preliminares (Figura 37), casi la mitad de los sectores analizados muestran un índice alta vulnerabilidad.

Thanks to preliminary results (Figure 37), almost one half of the analyzed units shows a high vulnerability index  $I_v$ .

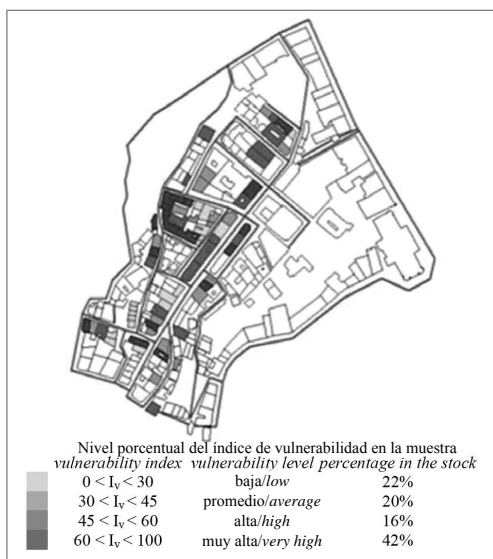


Figura 37. Investigación de Vulnerabilidad  
Figure 37. Vulnerability investigation

## 6. Conclusiones

El proyecto “MAR VASTO” proporcionó significativos resultados sobre la evaluación de los principales peligros naturales en la Ciudad de Valparaíso, sobre condiciones de vulnerabilidad en tres importantes iglesias, análisis de vulnerabilidad arquitectónica para una muestra importante de edificaciones ubicada en el área de la UNESCO (Cerro Cordillera). El trabajo puede ser de utilidad para sugerir opciones de mitigación y prioridades para una futura planificación urbana y proyectos de fortalecimiento a importantes monumentos individuales, como la pronta intervención de la iglesia “San Francisco del Barón”, entregado por el equipo italiano a las Autoridades de Chile (Enero de 2009). Se recomienda seriamente realizar una nueva investigación, en particular luego del terremoto del 27 de febrero de 2010; dentro de este marco una misión italiana de investigación está prevista para la primera mitad de Abril de 2010.

El proyecto “MAR VASTO” también mostró la importancia y efectividad de las bases de datos SIG, para estudiar los centros históricos, relevantes por su valor patrimonial, y expuestos a desastres naturales y antrópicos. En la presente etapa de la investigación, la metodología ha sido lo suficientemente definida en caso de terremotos (mapas de peligro, catastro de edificaciones, planificación urbana y arquitectónica, análisis de vulnerabilidad estructural, propuestas de intervención, etc.) Por otra parte, la futura estandarización del almacenamiento de datos y la aplicación de diferentes funciones de vulnerabilidad para un conjunto mayor de tipología de edificaciones (incluyendo algunos algoritmos específicos ya desarrollados por la comunidad científica), debieran ser necesarias. Además, la identificación del factor de riesgo global para un área determinada (o una edificación) requiere de un análisis más profundo a desarrollar en el futuro. Por lo tanto la investigación debiera ser profundizada, tomando ventaja en futuros estudios, puesto que la actividad ahora en curso, está prevista por la comunidad Económica Europea EU C26 Action (COST 2006), cuyo caso de estudio es la erupción del Vesubio.

## 7. Agradecimientos

Durante las misiones en Valparaíso (Mayo y Octubre-Diciembre 2007; Septiembre-October 2008), muchas Organizaciones regionales cooperaron estrechamente en el trabajo in situ, con los catorce expertos provenientes de Italia, sobre todo la Municipalidad de Valparaíso, entregando logística y soporte técnico; el Ministerio de Cultura (“Consejo Nacional de la Cultura y Las Artes”); la Autoridad Regional (“Intendencia V Región Valparaíso”); la Defensa Civil Regional (“OREMI”); el SHOA

## 6. Conclusions

The “MAR VASTO” Project provided significant results regarding the evaluation of main natural hazards in the City of Valparaíso (Chile), vulnerability conditions for three important churches, and architectonic/vulnerability analyses for a significant building stock partially located in the UNESCO area (Cerro Cordillera). The work can be useful to suggest mitigation options and priorities for future urban planning and strengthening projects on single important monuments, as the prompt intervention on the San Francisco del Barón Church provided by the Italian team to Chilean Authorities (January 2009). Further research is strongly recommended, in particular after the 27 February, 2010 seismic event: in this framework, an Italian investigation mission is foreseen in Chile in the first half of April 2010.

The “MAR VASTO” project showed also importance and effectiveness of GIS databases, in order to study historic centers, important for their patrimonial value, prone to natural/anthropic disasters. At the present research stage, the methodology has been enough defined in case of earthquake (hazard mapping; building inventory; architectonic/urban planning, structural vulnerability analyses; intervention proposals; etc.). On the other hand, further standardization in data storing and application of different vulnerability functions for a larger set of building typologies (including specific algorithms already developed by the scientific community) should be necessary. Furthermore, the identification of a global risk factor for a given area (or a building) needs deeper analyses to carry out in the future. Therefore, the investigation shall be deepened, taking advantage of further studies, as the activity, now in progress, foreseen by the ongoing EU C26 Action (COST 2006), in which the Vesuvius eruption is the study case.

## 7. Acknowledgements

During the missions at Valparaíso (May and October-December 2007; September-October 2008), many local Organizations strongly cooperated to the in situ work of the fourteen experts coming from Italy: above all, the Municipality of Valparaíso, providing logistic and technical support; the Ministry of Culture (“Consejo Nacional de la Cultura y Las Artes”); the Regional Authority (“Intendencia V Region Valparaíso”); the Regional Civil Defense (“OREMI”); the SHOA



(“Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile”); PRDUV (“Programa de Recuperación y Desarrollo Urbano de Valparaíso”; el Cuerpo de Bomberos and el Cuerpo de Rescate Marino (“Bote Salvavidas”) de Valparaíso; organizaciones de la ciudad: el Colegio de Arquitectos de Valparaíso y otros profesionales; la Policía (“Carabineros de Chile”); Autoridades Eclesiásticas y otras Universidades (“Pontificia Universidad Católica de Valparaíso”, “Universidad de Valparaíso”); y la Comunidad Italiana residente en Valparaíso.

En el marco del proyecto “MAR VASTO” muchas personas deben recibir nuestro reconocimiento.

Equipo italiano: Lorenza Bovio, Fabio Geremei, Francesco Immordino, Lorenzo Moretti, Claudio Puglisi, Augusto Screpanti y Edi Valpreda (ENEA); Claudio Alessandri, Marcello Balzani, Daniel Blersch, Paolo Ceccarelli, Daniel Chudak, Gianfranco Franz, Luca Lanzoni, Marco Miglioli, Enrico Milani, Gian Paolo Simonini y Antonio Tralli (Universidad de Ferrara); Nieves Lopez Izquierdo (ENEA y Universidad of Ferrara); Claudio Modena y Marco Munari (Universidad de Padua ); Cristina La Mura, Giuliano Panza, Hoby Razafindrakoto, Fabio Romanelli, Franco Vaccari, y Elisa Zuccolo (ICTP/Universidad de Trieste).

Asociados chilenos: Rodolfo Saragoni H., Maximiliano Astroza I. y Thomas Sturm (Universidad de Santiago Chile); Carlos Aguirre A., Luis Álvarez, Raúl Galindo U., Marcela Hurtado S., Gilberto Leiva H. (Universidad Federico Santa María de Valparaíso); Geocom Santiago (Osvaldo Neira F. y Marco Quevedo T.), que proporcionó el equipo Escáner Laser y personal. Además del apoyo de Andrés Enríquez, Dante Gutiérrez y otros investigadores del SHOA (“Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile”) que fue maravilloso.

Durante el trabajo en Valparaíso muchas Organizaciones locales cooperaron con el equipo italiano: Municipalidad de Valparaíso: sobre todo Mauricio González L., Cristián Palma V., Carolina Avalos A., Claudia Zúñiga J. (profesionales de la Municipalidad de Valparaíso en el proyecto “MAR VASTO”, que se unieron al equipo italiano dentro del marco de tesorería proporcionada en Italia por el Instituto Latinoamericano Italiano); el Alcalde de Valparaíso Aldo Cornejo y Jorge Castro Vice-Alcalde Omar Jara A. y otro profesionales de la Municipalidad de Valparaíso, comenzando con Paulina Kaplán D., directora de la “Oficina de Gestión Patrimonial”, junto a muchos otros;

Intendencia V Región Valparaíso: Intendente Iván de la Maza, Karina Englander K., Juan Carlos García P. de Arce y otros;

(“Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile”); PRDUV (“Programa de Recuperación y Desarrollo Urbano de Valparaíso”; the Firemen (“Bomberos”) and the Sea Rescue (“Bote Salvavidas”) Corps of Valparaíso; city organizations; the Board of Architects of Valparaíso and other professionals; the Police (“Carabineros de Chile”); Church Authorities and other Universities (“Pontificia Universidad Católica de Valparaíso”, “Universidad de Valparaíso”); the Valparaíso Italian Community.

In the framework of the “MAR VASTO” project, many people need to be thanked.

Italian team: Lorenza Bovio, Fabio Geremei, Francesco Immordino, Lorenzo Moretti, Claudio Puglisi, Augusto Screpanti and Edi Valpreda (ENEA); Claudio Alessandri, Marcello Balzani, Daniel Blersch, Paolo Ceccarelli, Daniel Chudak, Gianfranco Franz, Luca Lanzoni, Marco Miglioli, Enrico Milani, Gian Paolo Simonini and Antonio Tralli (University of Ferrara); Nieves Lopez Izquierdo (ENEA and University of Ferrara); Claudio Modena and Marco Munari (University of Padua); Cristina La Mura, Giuliano Panza, Hoby Razafindrakoto, Fabio Romanelli, Franco Vaccari, and Elisa Zuccolo (ICTP/University of Trieste).

Chilean partners: Rodolfo Saragoni H., Maximiliano Astroza I. and Thomas Sturm (Chile University of Santiago); Carlos Aguirre A., Luis Alvarez, Raul Galindo U., Marcela Hurtado S., Gilberto Leiva H. (Federico Santa Maria University of Valparaiso); Geocom Santiago (Osvaldo Neira F. and Marco Quevedo T.), which provided Laser-Scanner equipment and personnel. Furthermore, the support of Andres Enriquez, Dante Gutierrez and other SHOA (“Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile”) researchers was wonderful.

During the work in Valparaiso many local Organizations cooperated with the Italian team: Valparaiso Municipality: above all, Mauricio Gonzalez L., Cristian Palma V., Carolina Avalos A., Claudia Zúñiga J. (Valparaiso Municipality professionals at the time of “MAR VASTO”, which joined the Italian team also in the framework of some bursaries provided in Italy by the Italian Latin American Institute); Mayors of Valparaíso Aldo Cornejo and Jorge Castro, Vice- Mayor Omar Jara A.; other Valparaiso Municipality professionals, starting from Paulina Kaplan D., director of the “Oficina de Gestion Patrimonial”, with many others;

Intendencia V Region Valparaiso: Intendente Ivan de la Maza, Karina Englander K., Juan Carlos Garcia P. de Arce and others;



**Autoridades Eclesiásticas:** Padre Fernando Candia (Iglesia San Francisco), Monseñor Gonzalo Duarte García de Cortázar (Arzobispo of Valparaíso), Padre Gonzalo Bravo (Iglesia La Matriz), Hermanas Iglesia La Divina Providencia, y otros.

**Otras instituciones chilenas:** el Ministerio de Cultura (“Consejo Nacional de la Cultura y Las Artes”); Ana María Icaza y Francisco Saavedra (Programa de Recuperación y Desarrollo Urbano de Valparaíso-PRDUV); Guillermo De La Maza (OREMI, Defensa Civil); Enzo Gagliardo L. (Comandante), Vicente Maggiolo O. y colegas de (“Bomba Italia”) en Valparaíso (“Cuerpo de Bomberos”); personal del Bote Salvavidas (Cuerpo de Rescate de Valparaíso) y la Policía (“Carabineros de Chile”); Nelson Morgado L. y muchos otros del Colegio de Arquitectos de Valparaíso; otras Universidades (“Pontificia U. Católica de Valparaíso”, “U. de Valparaíso”, U. de Playa Ancha Valparaíso); Luis Enríquez, Javier Troncoso (“Gerencia Barrio Puerto”, el Histórico Barrio de la Ciudad); “Junta de Vecinos” del Cerro Cordillera;

**Profesionales chilenos:** sobre todo Milagros Aguirre D., quien siempre se mostró cooperadora y amable; Luis Bork V., Fabio Mezzano P., Octavio Pérez A., Alfonso Salinas, Francisco Silva I., Gunther Sührcke y muchos otros;

Un reconocimiento especial al enorme apoyo de la Embajada de Italia en Santiago; Roberto Santilli, Maruzzella Giannini y otros funcionarios de la Cámara de Comercio Italiana en Chile; Pablo Peragallo de la Comunidad Italiana Residente en Valparaíso.

Y al final, pero no menos importante, especial agradecimiento a Arcindo Santos y otros profesionales del BID/IADB (Banco Interamericano de Desarrollo).

**Church Authorities:** Father Fernando Candia (San Francisco Church), Mons. Gonzalo Duarte García de Cortázar (Bishop of Valparaíso), Father Gonzalo Bravo (La Matriz Church), Sisters of the La Divina Providencia Church, and others;

**Other Chilean Institutions:** the Ministry of Culture (“Consejo Nacional de la Cultura y Las Artes”); Ana María Icaza and Francisco Saavedra (Programa de Recuperación y Desarrollo Urbano de Valparaíso-PRDUV); Guillermo De La Maza (OREMI, Civil Defense); Enzo Gagliardo L. (Head), Vicente Maggiolo O. and colleagues (“Bomba Italia”) of the Valparaíso (“Bomberos”) Firemen; the Bote Salvavidas personnel (Valparaíso Sea Rescue Corp); the Police (“Carabineros de Chile”); Nelson Morgado L. and many others of the Valparaíso Board of Architects; other Universities (“Pontificia U. Católica de Valparaíso”, “U. de Valparaíso”, U. de Playa Ancha Valparaíso); Luis Enríquez, Javier Troncoso (“Gerencia Barrio Puerto”, the historic district of the City); “Junta de Vecinos” of the Cerro Cordillera;

**Chilean professionals:** above all, Milagros Aguirre D., always very helpful and kind; Luis Bork V., Fabio Mezzano P., Octavio Pérez A., Alfonso Salinas, Francisco Silva I., Gunther Sührcke and many others;

A grateful thought for the great support to: the Italian Embassy in Santiago; Roberto Santilli, Maruzzella Giannini and other office workers of the Italian Trade Commission in Chile; Pablo Peragallo of the Valparaíso Italian Community.

Last but not least, special thanks to Arcindo Santos and other professionals of BID/IADB (Banco Interamericano de Desarrollo/InterAmerican Development Bank).

## 8. Referencias / References

- Acevedo P., Astroza M., Canales J.C., Monge J., and Perretta C. (1989), Relación entre las unidades geotécnicas y los daños producidos por el sismo del 3 de marzo de 1985 en la ciudad de Valparaíso. Proc. 5as Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Santiago, Chile.
- AeDES (2000), First Level survey form for damage, prompt intervention, and safety assessment of ordinary buildings in the post-seismic emergency/Scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento, e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica, 2000.
- Araya R. and Saragoni G.R. (1984), Earthquake accelerogram destructiveness potential factor. Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, USA, Vol II, 835-842.
- Astroza I.M., Astroza E.R., Norambuena O.A. (2006), A re-evaluation of the Valparaíso August 16, 1906 earthquake intensities, Proc. Seminar of the Centennial of the 1906 Valparaíso earthquake, Valparaíso, August 16, 2006.
- Astroza I.M. (2007), A re-interpretation of the Valparaíso 1906 earthquake intensities, Reinterpretación de las intensidades del terremoto de 1906. Proc. VI Congreso Chileno de Geotécnica, Valparaíso, Chile, 28-30 November 2007.
- Caravajal A. and Saragoni H.R. (1989), Estudio comparativo de los terremotos de Valparaíso de 1906 y 3 de marzo de 1985. Proc. 5th Chilean Congress on Seismology and Earthquake Engineering, Santiago, Chile, Vol 1, pp. 345-356.
- Cerro Cordillera (2008), Cerro Cordillera pilot project (Valparaíso), <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Comte D., Eisenberg A., Lorca E., Pardo M., Ponce L., Saragoni R., Singh S. K. and Suárez G. (1986), The 1985 central Chile earthquake: A repeat of previous great earthquakes in the region?. Science, 233, 393-500.
- Cornell C.A. (1968), Engineering seismic risk analysis. In Bull. Seism. Soc. Am., 58, 1583-1606.
- COST (2006), COST, European COoperation in the field of Scientific and Technical research, Transport and Urban Development, COST Action C26: “Urban Habitat Constructions Under Catastrophic Events”. In: Proc. Symposium on “Urban habitat construction under catastrophic events”, Working Group 4 “Risk assessment for catastrophic scenarios in urban areas”, Session 6: Volcanic hazard and the Vesuvius study case; Malta, 23-25 October 2008.
- Decanini L., Mollaioli F., Panza G.F., Romanelli F. and Vaccari F. (2001), Probabilistic vs deterministic evaluation of seismic hazard and damage earthquake scenarios: a general problem, particularly relevant for seismic isolation. Proc. 7th International Post-Smirt Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures, Assisi, Italy, 2-5 October, 2001.

- DGPS survey (2008), DGPS survey in the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Earthquake hazard (2008), Earthquake hazard in the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Evaluation of the vulnerability of three churches (2008), Evaluation of the vulnerability of three churches in Valparaíso and numerical calculations, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Fire hazard (2008), Fire hazard in the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- GIS database (2008), A GIS database for the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- GNDT (1999), Second Level vulnerability form for masonry buildings/Scheda di vulnerabilità di 2° livello per edifici in muratura, 1999. GSHAP. The Global Seismic Hazard Assessment Program, <http://seismo.ethz.ch/gshap/index.html>.
- Gutierrez D. (2005), Advances in the Chilean tsunami warning system and application for the TIME project on the Chilean Coast. Presentation at GFZ Potsdam.
- Indirli M. et al. (2006a), Natural multi-hazard and building vulnerability assessment in the historical centers: the examples of San Giuliano di Puglia (Italy) and Valparaíso (Chile). Proc. 7th European Commission Conference "SAUVEUR", Safeguarded Cultural Heritage, Prague, May 31 - June 3, 2006.
- Indirli M., Carpani B., Panza G., Romanelli F. and Spadoni B. (2006b), Damage evaluation and rehabilitation of the Montorio medieval tower after the September 14th, 2003 earthquake; Proc. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (a joint event of the 13th ECEE & 30th General Assembly of the ESC), Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Paper Number: 666.
- Indirli M. (2007), Overview on risk assessment approaches for natural hazards. Proc. Project Workshop EU COST ACTION C26 - Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events, Prague, March 30-31, 2007.
- Indirli M. (2009), Organization of a Geographic Information System (GIS) database on natural hazards and structural vulnerability for the historic center of San Giuliano di Puglia (Italy) and the city of Valparaíso (Chile). International Journal of Architectural Heritage, Conservation, Analysis and Restoration. Volume 3, Number 4, October-December 2009. Taylor & Francis Eds., ISSN 1558-3058.
- Indirli M., Razafindrakoto H., Romanelli F., Puglisi C., Lanzoni L., Milani E., Munari M. and Apablaza S. (2010a), Hazard evaluation in Valparaíso: the MAR VASTO Project. Pure and Applied Geophysics, 2010, to be published.
- Indirli M. (2010b), Natural multi-hazard and building vulnerability assessment in the historic centers: the examples of San Giuliano di Puglia (Italy) and Valparaíso (Chile). Ph.D. Thesis, Doctoral School in Structural Engineering, Modelling, Preservation and Control of Materials and Structures, University of Trento, 2010.
- ISPS (2003), The International Ship and Port facility Security code, 2003 Edition, IMO Publishing, Nautical Books, ISBN 978-92-801-5149-7, Copyright © 2008 Maryland Nautical Sales, Inc., 1400 E. Clement Street, Baltimore, MD 21230 US, sales@mdnautical.com.
- Kausel E. (1986), Proceso sísmico, parámetros focales y réplicas del sismo del 3 de marzo de 1985. Chapter 2 of the book The earthquake of March 3, 1985-Chile, El sismo del 3 de marzo de 1985-Chile, J. Monge (Editor), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Acero Comercial S.A., Edit. Universitaria.
- Klügel J.U., Mualchin L. and Panza G.F. (2006), A scenario-based procedure for seismic risk analysis. In Engineering Geology, 88, 1-22.
- Klügel J.U. (2007), Error inflation in probabilistic seismic hazard analysis. In Engineering Geology, 90, 186-192.
- Landslide hazard (2008), Geomorphological hazard in the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Laser scanner survey (2008), Laser Scanner survey of three churches in Valparaíso (Chile), <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- Lomnitz C. (1971), Grandes Terremotos y Tsunamis en Chile Durante el Periodo 1535-1955, Revista Geofísica Panamericana, Vol. 1, N°1, 151-178.
- Lomnitz C. (1983), On the epicenter of the great Santiago earthquake of 1647, BSSA.73, 885-886.
- MAR VASTO (2007), Risk Management in Valparaíso/Manejo de Riesgos en Valparaíso, Servicios Técnicos acronym MAR VASTO, funded by BID/IDB (Banco Inter-Americano de Desarrollo / Inter-American Development Bank). Project ATN/II-9816-CH, BID/IDB-ENEA Contract PRM.7.035.00-C, March 2007-June 2008.
- Munich Re Group (2004), Topics Geo Annual review, Natural catastrophes, knowledge series.
- Molise (2003), Regione Molise, Consiglio Nazionale delle Ricerche. Second level sheet for the evaluation of damage and vulnerability in the churches/Scheda chiese di secondo livello per la valutazione del danno e della vulnerabilità, 2003.
- Nishenko S.P. (1985), Seismic potential for large and great interplate earthquake along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal. Journal of Geophysical Research, 90, 3589-3615.
- Okal E.A. (2005), A re-evaluation of the great Aleutian and Chilean earthquakes of August 17, 1906. Geophys J. Int., 161, 268-282.
- Panza G.F., Romanelli F. and Vaccari F. (2001), Seismic wave propagation in laterally heterogeneous anelastic media: theory and applications to seismic zonation. Advances in Geophysics, vol. 43. Academic Press, pp. 1-95.
- Pereira M.-L., Crempien J. and Saragoni H.R. (1979), Estudio e Instalación de una red local de acelerógrafos de alta densidad en una placa de subducción fracturada. XX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Córdoba, Argentina.
- Prompt intervention (2009), Prompt intervention to put in safety the San Francisco del Barón Church. Indirli M., ENEA; Modena C., University of Padua; Tralli A., University of Ferrara. Technical report.
- Saragoni H.R. (2006), Comparative study of 1906 and 1985 Valparaíso earthquake damages at El Almendral zone; Proc. Seminar of the Centennial of the 1906 Valparaíso earthquake, Valparaíso, August 16, 2006.
- Saragoni H.R. (2007), The 1906 Valparaíso earthquake, El terremoto de Valparaíso de 1906. Proc. VI Congreso Chileno de Geotécnica, Valparaíso, Chile, 28-30 November 2007.
- SHOA (1999), Carta de inundación per tsunami para la Bahía de Valparaíso, Chile. Documento explicativo. Estudios y proyectos, December 1999.
- Somerville P. G., Sen M. K. and Cohee B. P. (1991), Simulation of strong ground motions recorded during the 1985 Michoacan, Mexico and Valparaíso, Chile earthquakes. In Bull. Seism. Soc. Am., 81(1), 1-28.
- SSHAC (1997), Senior Seismic Hazard Analysis Committee. Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts. NUREG/CR-6372.
- Sturm T.W. (2008), Valparaíso: its historic heritage and earthquakes, Valparaíso: su patrimonio histórico y los sismos", Civil Engineer Thesis, University of Chile, Faculty of Physical and Mathematical Sciences, Department of Civil Engineering, Santiago de Chile, April 2008.
- Tanner J.G. and Shedlock K.M. (2004), Seismic hazard maps of Mexico, the Caribbean, and Central South America, In Tectonophysics, 390, pp. 159-175.
- Tsunami hazard (2008), Tsunami hazard in the city of Valparaíso, <http://www.marvasto.bologna.enea.it>. MAR VASTO Project Technical Report.
- UNPD (2002), United Nations Development Programme, Bureau for Crisis Prevention and Recovery, Reducing disaster risk, a challenge for development, [www.undp.org](http://www.undp.org).
- Verdugo A.I. (1995), Estudio geofísico de los suelos de fundación para una zonificación sísmica de Valparaíso y Vina del Mar, Civil Engineer Thesis. Dept. Civil Engr. Fac. Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Waisberg M. (1992), La arquitectura religiosa de Valparaíso. Universidad de Valparaíso, segunda edición, 1992.
- Zuccolo E., Vaccari F., Peresan A., Dusi A., Martelli A. and Panza G.F. (2008), Neodeterministic definition of seismic input for residential seismically isolated buildings. Engineering Geology, Vol. 101, 89-95.