

Vol. 62 – Supplement 2

March 2021

Bollettino di Geofisica teorica ed applicata

An International Journal of Earth Sciences

**MARCA-GEHN, a prototype macroseismic
archive of four Central America countries**

**MARCA-GEHN, un archivo macrosísmico
prototípico para cuatro países de Centroamerica**



OGS

National Institute
of Oceanography
and Applied
Geophysics

ISSN 0006-6729

Responsibility for all statements made in B.G.T.A. lies with the authors

Typesetting: Luglioprint, Trieste
Printing: Luglioprint, Trieste

Authorised by the Tribunale di Trieste, n. 242, September 17, 1960
Direttore responsabile: P. Giurco

Preface

RIESCA (Escenarios de Riesgo en Central America) “Regional training project applied to Risk Scenarios with the Surveillance and Monitoring of Volcanic, Seismic and Geo-Hydrological phenomena in Central America”, is a project funded by the Italian Agency for Development Cooperation (AICS), and coordinated by the University of Palermo (UNIPA).

The overall objective of the project is to improve the knowledge and management of natural risks in Central America, in particular in the countries of El Salvador, Guatemala, Honduras and Nicaragua, affected by frequent natural disasters, in turn aggravated by considerable socio-economic vulnerability. By improving the qualification of human resources in the surveillance, monitoring and analysis of seismic, volcanic and geomorphological hazards, a reduction of environmental vulnerability in the region can be obtained, for a more sustainable territorial development.

The project is a know-how transfer of the best Italian experiences to the technical personnel of the academic and government institutions in Central America; it aims at creating and improving a regional link between Universities - Monitoring Institutions - Response Organizations - Communities, which act in Central America in the field of natural risks. It establishes an active collaboration between all those involved in the project that belong to different institutions: by sharing and discussing procedures, experiences and results within and among different countries, a common risk culture can be established, for the first time, with a transnational perspective.

To this end, a network was created among the Italian partners, namely the University of Palermo (UNIPA), the Geosciences and Georesources Institute of the National Research Council (CNR - IGG), and the National Institute of Oceanography and Applied Geophysics (OGS), and Central American academia and institutions, i.e.: the Universities of El Salvador (UES), Guatemala (USAC), Honduras (UNAH) and Nicaragua (UNAN), the Ministerio Ambiente - Observatorio Ambiental (MARN) and the Protección Civil of El Salvador; the Coordinadora Nacional Reducción de Desastres (CONRED) and the Instituto de Sismología, Vulcanismo, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) of Guatemala; the Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) of Honduras; the Sistema Nacional Prevención de Desastres (SINAPRED) and the Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER) of Nicaragua. The project has the patronage of the Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC), the Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), the Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA), and the Italian Latin American Institute (IILA).

The project activities (seminars, conferences, laboratories, field trips) have sought to pursue the specific objective of forming a community of local experts, integrated in the technical civil protection system, for the development and use of technical tools (database, hazard maps, etc.) in order to facilitate the identification of hazard scenarios and address mitigation procedures. The technical local teams may then have the necessary skills to independently produce hazard scenarios, and to disseminate and improve risk mitigation actions over time.

The macroseismic archive MARCA-GEHN described in this volume represents the first collection of data publicly available online for the Central American region. The prototype, after the conclusion of the RIESCA project, can be maintained, updated and improved by the growing community of Central American technical specialists.

Giuseppe Giunta

RIESCA Coordinator

Dipartimento Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo, Italy

Prefación

RIESCA (Escenarios de Riesgo en Centroamérica) “Proyecto regional de capacitación aplicada a Escenarios de Riesgo con la Vigilancia y Monitoreo de Fenómenos Volcánicos, Sísmicos y Geohidrológicos en Centroamérica”, es un proyecto financiado por la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo (AICS) y coordinado por la Universidad de Palermo (UNIPA).

El objetivo general del proyecto es mejorar el conocimiento y la gestión de los riesgos naturales en Centroamérica, en particular en los países de El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua, afectados por frecuentes catástrofes naturales, agravadas a su vez por una considerable vulnerabilidad socioeconómica. Al mejorar la cualificación de los recursos humanos en la vigilancia, el monitoreo y el análisis de los riesgos sísmicos, volcánicos y geomorfológicos, se puede obtener una reducción de la vulnerabilidad ambiental en la región, para un desarrollo territorial más sostenible.

El proyecto, consiste en la transferencia de conocimientos de las mejores experiencias italianas al personal técnico de las instituciones académicas y gubernamentales de Centroamérica; pretende crear y mejorar un vínculo regional entre Universidades - Instituciones de Monitoreo - Organizaciones de Respuesta - Comunidades, que actúan en Centroamérica en el campo de los riesgos naturales. Establece una colaboración activa entre todos los involucrados en el proyecto que pertenecen a diferentes instituciones: al compartir y discutir procedimientos, experiencias y resultados dentro y entre los diferentes países, se puede establecer, por primera vez, una cultura de riesgo común con una perspectiva transnacional.

Para ello, se ha creado una red entre los socios italianos, a través de la Universidad de Palermo (UNIPA), el Instituto de Geociencias y Georecursos del Consejo Nacional de Investigaciones (CNR - IGG), el Instituto Nacional de Oceanografía y Geofísica Experimental (OGS), y las instituciones académicas centroamericanas, entre ellas: las Universidades de El Salvador (UES), Guatemala (USAC), Honduras (UNAH) y Nicaragua (UNAN), el Ministerio Ambiente - Observatorio Ambiental (MARN) y Protección Civil de El Salvador; la Coordinadora Nacional Reducción de Desastres (CONRED) y el Instituto de Sismología, Vulcanismo, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) de Guatemala; la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO) de Honduras; el Sistema Nacional Prevención de Desastres (SINAPRED) y el Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER) de Nicaragua. El proyecto cuenta con el patrocinio del Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central (CEPREDENAC), el Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), el Consejo Superior Universitario Centroamericano (CSUCA) y el Instituto Italiano de América Latina (IILA).

Las actividades del proyecto (seminarios, conferencias, laboratorios, viajes de campo) han perseguido el objetivo específico de formar una comunidad de expertos locales, integrados en el sistema técnico de protección civil, para el desarrollo y la utilización de herramientas técnicas (base de datos, mapas de amenazas, etc.) con el fin de facilitar la identificación de los escenarios de amenazas y abordar los procedimientos de mitigación. Los equipos técnicos locales podrán entonces disponer de las competencias necesarias para elaborar de forma autónoma los escenarios de peligro, así como para difundir y mejorar las acciones de mitigación de riesgos a lo largo del tiempo.

El archivo Macrosísmico MARCA-GEHN descrito en este volumen representa la primera colección de datos disponible públicamente en línea para la región centroamericana. El prototipo, tras la conclusión del proyecto RIESCA, podrá ser mantenido, actualizado y mejorado por la creciente comunidad de especialistas técnicos centroamericanos.

Giuseppe Giunta

Coordinador del Proyecto RIESCA

Dipartimento Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo, Italy

MARCA-GEHN, a prototype macroseismic archive of four Central America countries

MARCA-GEHN, un archivo macrosísmico prototípico para cuatro países de Centroamérica

L. PERUZZA¹, E. ESPOSITO², F.E. RODRÍGUEZ GARCÍA³, R.A. GARCÍA CASTRO⁴, P. SANTOS^{5,*},
G. MARROQUÍN⁴, L. MIXCO⁴, L. TORRES BERNHARD³, R. TORRES⁴, D.A. HERNANDEZ⁴,
C. RUBI TELLEZ⁶, S. GUEVARA^{6,*}, N. CASTRILLO-OSORIO⁶, D. MONTERROSO⁷,
T. ORDÓÑEZ MARTÍNEZ^{8,*}, M. RUIZ³, C. TENORIO⁸, O. FLORES⁵, J. LUNA⁵,
A.A. ARGUETA PLATERO⁹, G. GIUNTA¹⁰

¹ *Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS, Trieste, Italy*

² *Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Napoli, Italy*

³ *Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de Honduras UNAH, Tegucigalpa, Honduras*

⁴ *Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales MARN, San Salvador, El Salvador*

⁵ *Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas CESEM, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala City, Guatemala*

⁶ *Instituto de Geología y Geofísica Centro de Investigaciones Geocientíficas, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua - UNAN, Managua, Nicaragua*

⁷ *Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres - CONRED Guatemala City, Guatemala*

⁸ *Departamento de Física de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de Honduras UNAH, Tegucigalpa, Honduras*

⁹ *Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador*

¹⁰ *Dipartimento Scienze della Terra e del Mare - DiSTeM, Università degli Studi di Palermo, Italy*

* *temporary affiliation during the Project Riesca*

(Received: 9 October 2020; accepted: 27 February 2021)

ABSTRACT In the frame of activities of the RIESCA Project, funded by the Italian Agency for Development Cooperation, the Seismology Working Group (SWG) agreed to build up a prototypal archive of macroseismic data points for the four Central America countries involved in the project, namely, El Salvador, Guatemala, Honduras, and Nicaragua. The objective of this collection is to establish a transnational, common, quality-checked macroseismic archive, for documenting, validating, and eventually updating the earthquake parameters of damaging and destructive events. The new earthquake parameters, supported by documented observations, can be used to update the regional earthquake catalogues and enter into more reliable fault/area source characterisation for seismic hazard purposes. Further, the seismic histories at the site may serve as benchmarks for local response analyses in metropolitan areas. With collaborative efforts, the procedure for selecting and inputting the data into working repositories was defined and realised in 2017: the first data collection adopted basic Google™ tools. During 2018, the RIESCA SWG uploaded and updated about 2030 intensity datapoints (IDPs) of some dozens of earthquakes, following codified revision phases. In 2019,

we released the first online prototypal archive, named MARCA-GEHN (Macroseismic Archive of Central America - Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, V.1.0), based on the MIDOP (Macroseismic Intensity Data Online Publisher) tools. The present MARCA-GEHN release (V.1.6, September 2020) allows the queries by earthquake and by locality, with interactive maps and seismic histories at more than 1080 sites. We will present the general features of the database and describe the more interesting case studies among the earthquakes collected. MARCA-GEHN is open to collaborative efforts for its further improvement and refinements.

Key words: Macroseismic intensity database, Central America, RIESCA Project.

RESUMEN En el marco de las actividades del Proyecto RIESCA, financiado por la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo, el Grupo de Trabajo de Sismología (SWG) acordó construir un archivo prototipo de datos macrosísmicos para los cuatro países de América Central involucrados en el proyecto: El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua. El objetivo de esta recopilación es establecer un archivo macrosísmico transnacional, común y de calidad comprobada, para documentar, validar y eventualmente actualizar los parámetros de terremotos dañinos y destructivos. Los nuevos parámetros de terremotos respaldados por observaciones documentadas, se pueden usar para actualizar los catálogos regionales, adentrarnos en una caracterización más confiable de las fuentes sísmicas (zonas sísmicas o fallas) para propósitos de análisis de amenaza sísmica y como punto de referencia para análisis de respuesta de sitio en áreas metropolitanas. Con esfuerzos de colaboración, el procedimiento para seleccionar e ingresar los datos en un repositorio, se ha iniciado con una primera recopilación de datos en 2017 adoptando herramientas básicas de Google™. Durante 2018, el SWG de RIESCA ha cargado y actualizado unos 2030 datos puntuales de intensidad (IDP) de algunas docenas de terremotos, pasando luego por las fases de revisión codificadas. En 2019 se lanzó el archivo prototipo en línea, llamado MARCA-GEHN (Archivo Macrosísmico de América Central - Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, V. 1.0), basado en las herramientas MIDOP (Editor en línea de datos de intensidad macrosísmica). El lanzamiento reciente de MARCA-GEHN (V.1.6, desde septiembre 2020) permite las consultas por terremoto y por localidad, con mapas interactivos e historias sísmicas en más de 1080 sitios. Presentaremos las características generales de la base de datos y describiremos los casos de estudio más interesantes entre los terremotos recopilados. MARCA-GEHN está abierto a esfuerzos de colaboración para su mejora y afinamiento.

Palabras clave: Archivo Intensidad Macrosísmica, America Central, Proyecto RIESCA.

1. Introduction

Earthquakes are the key ingredients of any seismic hazard analysis and risk assessment. The basic earthquake parameters, namely origin time, location, and energy released, derive primarily from instrumental observations: then, earthquake catalogues are fed by macroseismic data, derived from written historical sources (chronicles, annals, etc.), and sometimes archeoseismological and paleoseismological results are used too, to expand the limited time span of instrumental seismology.

After some years of oblivion, the interest about the detailed reconstructions of the effects of past earthquakes is increasing (e.g. Hough, 2014), for improving the recognition of the seismogenic sources, comprehending the nucleation processes of major events, and for identifying anomalous path or site response. In addition, the simplified classification of effects used by a macroseismic scale makes it a better way to communicate the earthquake related phenomena to a wider public (e.g. Musson, 2000).

Europe can be considered the ‘epicentre’ of such a Renaissance in qualified macroseismic data. After the pioneering work of Nicholas Ambraseys in the 1970s, that showed the potentialities of studying historical earthquakes, a big step forward for historical seismology was given in Italy by researchers with specific skills, side-by-side with professionals in seismology. Since the late 1990s, Italian national macroseismic archives have been released on the Internet [e.g. DOM4.1 (Monachesi and Stucchi, 1997), up the most updated releases of DBMI15 (Locati *et al.*, 2019)], thus setting the groundwork for new trends in seismotectonic modelling (e.g. Basili *et al.*, 2013) and methods for seismic hazard analyses (e.g. Albarello and Mucciarelli, 2002). At the

1. Introducción

Los terremotos son el ingrediente clave de cualquier análisis de amenaza sísmica y evaluación del riesgo. La información básica sobre los terremotos; como el tiempo origen, la ubicación y la energía liberada, se derivan principalmente de observaciones instrumentales. Además, los catálogos de terremotos se alimentan de datos macrosísmicos, derivados de fuentes históricas escritas o gráficas (crónicas, anales, fotos, grabados, etc.). A veces se utilizan resultados arqueosismológicos y paleosismológicos, para ampliar el lapso de tiempo limitado de la sismología instrumental.

Después de algunos años de olvido, el interés por las reconstrucciones detalladas de los efectos de los terremotos pasados está aumentando (e.g. Hough, 2014), para mejorar el reconocimiento de las fuentes sismogénicas, comprender los procesos de nucleación de los principales eventos e identificar anomalías en la respuesta de sitio. Además, la clasificación simplificada de los efectos utilizando una escala macrosísmica, hace que la comunicación sobre fenómenos relacionados a los terremotos mejore y llegue a un público más amplio (Musson, 2000).

Europa puede considerarse el “epicentro” de un interés renovado en el conjunto de datos macrosísmicos cualificados. Después del trabajo pionero de Nicholas Ambraseys en la década de 1970, que mostró las potencialidades del estudio de los terremotos históricos, se dio un gran paso hacia adelante en la sismología histórica de Italia, esto debido al trabajo conjunto de investigadores con formación muy completa como historiadores de la mano con profesionales en sismología.

Desde finales de los años noventa en Italia, los archivos macrosísmicos nacionales se han publicado en Internet (por ejemplo, DOM4.1, Monachesi y Stucchi 1997, hasta las versiones más actualizadas de DBMI15, Locati *et al.*,

transnational scale, the European Archive of Historical Earthquake Data (AHEAD, <https://www.emidius.eu/AHEAD/>) enables researchers to trace back the supporting information of each earthquake, to compare the different studies and helps keeping the earthquake catalogues up to date (Locati *et al.*, 2014). Furthermore, in the frame of the activities of the Global Earthquake Model (GEM), the Global Earthquake History component established and distributed an online resource, called Global Archive of Historical Earthquake Studies, where both reports and macroseismic data points of major historical earthquakes (namely with $M \geq 7.0$, till 1903) have been made available to the public (Albini *et al.*, 2013, 2014).

In the frame of the activities of RIESCA Project (“*Proyecto de formación aplicada a los Escenarios de Riesgo con la vigilancia y monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmicos e hidrogeológicos en América Central*”), funded by the Italian Agency for Development Cooperation, and coordinated by the University of Palermo, (<http://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>) we agreed to guide the efforts of involved seismologists [the so-called RIESCA Seismology Working Group (SWG), all the acronyms used in this text are listed in Appendix 1] toward realising a common prototypal archive of macroseismic data points for the four Central America countries involved in the project, namely, El Salvador, Guatemala, Honduras, and Nicaragua. The objective of this collection is to establish a multi-purpose, quality-checked macroseismic archive that will serve as a first benchmark for documenting, and eventually updating the earthquake parameters of damaging and destructive events.

The database has to account for the peculiarities of Central America countries that are exposed to a variety of seismogenic pro-

2019); sentando así las raíces de nuevas tendencias en estudios sismotectónicos (e.g. Basili *et al.*, 2013) y análisis de amenaza sísmica (Albarello y Mucciarelli, 2002). A escala transnacional, el Archivo Europeo de Datos Históricas de Terremotos (AHEAD, <https://www.emidius.eu/AHEAD/>), permite a los investigadores rastrear la información soporte de cada terremoto y comparar los diferentes estudios, lo que ayuda a mantener actualizados los archivos con información macrosísmica (Locati *et al.*, 2014). Además, en el marco de las actividades del Modelo Global de Terremotos (GEM), la componente “Historia Global de Terremotos” estableció y distribuyó un recurso en línea, llamado “Archivo Global de Estudios de Terremotos Históricos”, donde tanto los informes como datos puntuales macrosísmicos de los principales terremotos históricos ($M \geq 7.0$, hasta 1903), se han puesto a disposición del público (Albini *et al.*, 2013, 2014).

En el marco de las actividades del Proyecto RIESCA (“*Proyecto de formación aplicada a los Escenarios de Riesgo con la vigilancia y monitoreo de los procesos volcánicos, sísmicos e hidrogeológicos en América Central*”), financiado por la Agencia Italiana de Cooperación para el Desarrollo, y coordinado por la Universidad de Palermo, (<http://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>), acordamos impulsar los esfuerzos de sismólogos involucrados (el llamado Grupo de Trabajo de Sismología RIESCA - SWG, todas las siglas utilizadas en este texto se enumeran en el Apéndice 1) hacia la realización de un archivo prototipo de datos puntuales macrosísmicos para los cuatro países de América Central involucrados en el proyecto. El objetivo de esta recolección de datos, es establecer un archivo macrosísmico multipropósito y de calidad comprobada que sirva como primer punto de referencia para documentar y eventualmente actualizar los parámetros sísmicos de eventos dañinos y destructivos.

La base de datos tiene en cuenta las pecu-

cesses, different levels of ground shakings, non-uniform instrumental and historical seismic data availability. Noteworthy is the coexistence of three different tectonic regimes (cortical, interphase subduction and intraplate subduction) where earthquakes have occurred with different degrees of documentation due to the difference in perception and effects on the population. In addition, the local reference institutions have sometimes to face limitations in human and material resources.

Started in 2016 and expected to end in 2021, the RIESCA Project has been trying to adapt the best practices of the participating countries, and in particular the lessons learned in macroseismology, with the aim of strengthening international cooperation, with respect for the local scientific communities. Thus, the prototypal Macroseismic ARchive for Central America countries - Guatemala, El Salvador, Honduras, and Nicaragua (MARCA-GEHN), developed entirely within the RIESCA Project, faces different data availabilities, common problems occurring at the borders of neighbouring countries, and it is potentially open to the inclusion of other/revised studies.

The first bulk of events collected to date were selected for:

- representing the most damaging event occurring during the instrumental period, for better calibrations of magnitude versus intensity relationships [see for example Stucchi *et al.* (2013) and references therein], or as a guide to constrain the magnitude, depth and source parameters of past events;
- accomplishing the co-existence of deep and surficial earthquake sources, that can generate distinctive attenuation patterns of the different tectonic regimes in the region [see the latest applications in Griffin *et al.* (2018) and quoted papers];

liaridades de los países de América Central que están expuestos a una variedad de procesos sismogénicos, diferentes niveles de sacudidas del suelo y disponibilidad de datos sísmicos históricos e instrumentales no uniformes. Es de destacar, la coexistencia de tres regímenes tectónicos diferentes (cortical, subducción interfase y subducción intraplaca) donde han ocurrido terremotos con diferente grado de documentación debido a la diferencia de percepción y efectos en la población. Además, las instituciones de referencia locales a veces tienen que enfrentar limitaciones en recursos humanos y materiales.

El Proyecto RIESCA, que comenzó en 2016 y que se espera termine en 2021, ha tratado de adaptar las mejores prácticas de los países participantes, y en particular las lecciones aprendidas en macrosismología, con el objetivo de fortalecer la cooperación internacional, respetando en todo momento a la comunidad científica local. Por tanto, el prototipo de Archivo Macrosísmico para los países de América Central: Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua (MARCA-GEHN), desarrollado dentro del Proyecto RIESCA, enfrenta diferencias en la disponibilidad de datos, que son problemas comunes que ocurren en las fronteras de los países vecinos, y está potencialmente abierto a la inclusión de otros estudios revisados.

El primer grupo de eventos recopilados hasta ahora se seleccionó para:

- Representar el evento más dañino ocurrido durante el período instrumental, para mejorar las calibraciones de relaciones de magnitud versus intensidad (ver por ejemplo Stucchi *et al.*, 2013 y sus referencias), o como una guía para restringir los parámetros de magnitud, profundidad y fuente de eventos pasados;
- Contemplar la coexistencia de fuentes de terremotos profundos y superficiales, que pueden generar patrones de atenuación distintivos de los diferentes regímenes tectónicos en la región (ver las últimas aplicaciones en

- increasing the interest in the local seismic site response by highlighting recursive path/site amplification phenomena, and to promote alternative methods of hazard assessment [e.g. the ones based on the seismic site history, (e.g. D'Amico and Albarello, 2008)];
- encouraging the practices of experienced personnel in post-earthquake surveys, by enhancing the availability of technical unpublished reports;
- filling the lack of macroseismic data of the most recent events, that cannot be overcome by using intensity proxies (e.g. ShakeMap or data from online questionnaires).

After this first introductory chapter, some considerations on intensity are included and the existing seismic catalogues in Central America are briefly described. The methodological options and solutions to develop the MARCA-GEHN macroseismic file are presented in the third chapter; in the fourth, we include all the details related to the collected and reviewed data. The last two chapters discuss the results and conclusions of this collaborative work.

2. About Macroseismology

Knowledge of the seismic activity of a territory represents the starting point for any seismic hazard and seismic risk assessment. Both the methodological approaches that estimate the seismic hazard via probabilistic methods and models, or by means of deterministic earthquake scenarios, are mainly based on parametric earthquake catalogues; they derive from quantitative measurements of the instrumental seismology, and qualitative observations obtained by the so-called macroseismology. The actual usefulness of

Griffin *et al.*, 2018 y documentos citados);

- Aumentar el interés por la respuesta sísmica local de sitio resaltando el proceso de amplificación recurrente trayecto/sitio, y promover un método alternativo de evaluación de amenaza (por ejemplo, los basados en la historia sísmica del sitio, p.ej. D'Amico y Albarello, 2008);
- Alentar la práctica de la aplicación de encuestas para obtener percepciones personales posteriores al terremoto, mejorando la disponibilidad de informes técnicos no publicados;
- Suplir la falta de datos macrosísmicos de los eventos más recientes, que no se pueden obtener mediante el uso de proxies de intensidad (p.ej., ShakeMap o datos de cuestionarios en línea).

Tras este primer capítulo de introducción, se incluyen algunas consideraciones sobre la intensidad y se describen brevemente los catálogos sísmicos existentes en Centroamérica. Las opciones y soluciones metodológicas para desarrollar el archivo macrosísmico MARCA-GEHN se presentan en el tercer capítulo; en el cuarto, incluimos todos los detalles relacionados con los datos recopilados y revisados. En los dos últimos capítulos se presentan los resultados y conclusiones de este trabajo colaborativo.

2. Sobre la Macrosismología

El conocimiento de la actividad sísmica de un territorio representa el punto de partida para cualquier evaluación de amenaza y riesgo sísmico. Las metodologías que estiman la amenaza sísmica se clasifican en dos grandes grupos: probabilistas y deterministas. Ambas metodologías se basan principalmente en catálogos paramétricos de terremotos que se derivan esencialmente de mediciones cuantitativas enmarcadas en la sismología instrumental y de observaciones cualitativas obtenidas por la llamada macrosismología. Sin embargo, la utilidad real de los

instrumental seismic data is however limited by the short time coverage available, which satisfactorily covers only some parts of the world for approximately the last century [see for example Storchak *et al.* (2015) and references therein]. Thus, instrumental seismicity may not be sufficient for an adequate reconstruction of the seismic behaviour of a country, and studies using non-instrumental information derived from historical sources must be carried out, to fill this gap.

Macroseismology is commonly referred to as that branch of seismology based on the evaluation of the macroscopic effects produced by earthquakes, i.e. by means of intensity data. Earthquake intensity is a measure, or rather a classification, of the shaking strength of an earthquake at a particular place, based on the observation of earthquake-related effects such as perceptibility and damage.

In order to measure the severity of an earthquake, several scales of seismic intensity have been proposed. They provide simplified descriptions of the earthquake-related effects, classified in given degrees, from the weakest impact on instruments and humans, up to the strongest landscape changes; the best match between the observations and the idealised description enable us to assign a degree of intensity to the studied locality, usually referred to as site intensity. When all the assigned site intensities are plotted on a map, we obtain an intensity map, or an intensity data point set (in the following indicated as IDP set), that gives a comprehensive picture of the pattern of effects of that earthquake. After a decade of using isolines to represent the main features of a macroseismic field (that are expressions of the source radiation pattern, and the regional attenuation properties), isoseismals have been progressively abandoned in favour of site intensity data. In theory, the

datos sísmicos instrumentales está limitada por la baja cobertura disponible en el tiempo, que cubre satisfactoriamente sólo algunas partes del mundo durante aproximadamente el siglo pasado (ver, por ejemplo, Storchak *et al.*, 2015 y referencias allí). Por lo tanto, la sismicidad instrumental no puede ser suficiente para una reconstrucción adecuada del comportamiento sísmico de un país, y se deben realizar estudios que utilicen información no instrumental derivada de fuentes históricas para llenar este vacío.

La macrosismología se conoce comúnmente como esa rama de la sismología basada en la evaluación de los efectos macroscópicos producidos por los terremotos, es decir, mediante datos de intensidad. La intensidad del terremoto es una medida, o más bien una clasificación, de la fuerza de sacudida de un terremoto en un lugar en particular, basada en la observación de los efectos relacionados con el terremoto, como la perceptibilidad y el daño.

Para medir la severidad de un terremoto, se han propuesto varias escalas de intensidad sísmica. Estas proporcionan descripciones simplificadas de los efectos relacionados con el terremoto, y establecen clasificaciones en grados, desde el impacto más débil hasta el más fuerte. La mejor coincidencia entre las observaciones y la descripción idealizada nos permite asignar un grado de intensidad a la localidad estudiada, generalmente conocida como intensidad del sitio. Cuando todas las intensidades de sitio asignadas se trazan en un mapa, obtenemos un mapa denominado mapa de isosistas, o bien un conjunto de datos puntuales de intensidad (en lo sucesivo indicado como conjunto IDP), que proporciona una imagen completa del patrón de efectos de ese terremoto. En teoría, los valores de intensidad para un terremoto son más altos cerca de la fuente sísmica, y disminuyen gradualmente con la distancia. Por estas razones, los valores de intensidad se extrapolan en el epicentro hipotético, dada la intensidad epicentral (generalmente conocida como I_0), y este valor

intensity values for an earthquake are highest near the seismic source, and gradually decrease with distance; for these reasons, the intensity values are extrapolated at the hypothetical epicentre, given the epicentral intensity (usually referred as I_0), and this value can be considered a proxy of the energy released by an earthquake, and estimates of magnitude can be obtained by applying I_0 versus M relationships, for example.

Many intensity scales have been proposed throughout the world in the last centuries, to categorise the intensities of earthquakes; they are based on the effects on humans, building stock and natural environment (see Musson *et al.*, 2010; Musson and Cčić, 2012 and references therein). Whilst the first pioneer intensity scales proposed in the late 19th - early 20th century contain a very generic description of effects and damages pertaining to the different degrees, without a distinction regarding the construction typology (as practically all the building stock of that time was in masonry), the more modern scales, starting from the Mercalli-Cancani-Sieberg [MCS: Sieberg (1930)] scale, contain an increasingly precise description of building typologies, that represent implicitly their vulnerability model, and some statistical thresholds to quantify the distribution of damage for building types. After the review made for Medvedev, Sponheuer and Karnik [MSK: Medvedev *et al.* (1964)] scale, the last macroseismic scale released in Europe, in temporal order, came about from the efforts of the European Seismological Commission (ESC) in encouraging the co-operation between engineers and seismologists; the European Macroseismic Scale [EMS-98: Grünthal *et al.* (1998)], articulated in 12 divisions (degrees, or levels), is slowly becoming the standard for post-event surveys, as it contains clear grids for assigning each degree

puede considerarse un indicador de la energía (magnitud M) liberada por un terremoto. A partir de la intensidad epicentral se puede obtener una estimación de la magnitud, aplicando una correlación I_0 versus M .

Se han propuesto muchas escalas de intensidad en todo el mundo en los últimos siglos, para asignar grados de intensidad a los terremotos; están basadas en los efectos sobre los seres humanos, las construcciones y el entorno natural (Musson *et al.*, 2010; Musson y Cčić, 2012). Mientras que las primeras escalas de intensidad pioneras contienen una descripción muy genérica de los efectos y daños relacionados con los diferentes grados, sin distinción de la tipología de la construcción (ya que prácticamente todas las construcciones de la época eran de mampostería), las escalas más modernas, a partir de la escala Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS, Sieberg, 1930) contienen una descripción cada vez más precisa de las tipologías de edificios, que representan implícitamente su modelo de vulnerabilidad, y algunos umbrales estadísticos para cuantificar la distribución de daños para los diferentes tipos de edificios o clases de vulnerabilidad. Después de la revisión hecha para Medvedev, Sponheuer y Karnik (escala MSK, Medvedev *et al.*, 1964), la última escala macrosísmica lanzada en Europa, en orden cronológico, nació de los esfuerzos de la Comisión Sismológica Europea (ESC) para alentar la cooperación entre ingenieros y sismólogos. Se trata de la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98, Grünthal *et al.*, 1998), articulada en 12 divisiones (grados o niveles), que se está convirtiendo en el estándar para cualquier encuesta posterior al evento, ya que contiene tablas claras para asignar cada grado de intensidad, a partir de los efectos y distribución de daños para los diferentes tipos de edificios.

Una nueva era para la macrosismología comenzó en los años 80, cuando Internet hizo posible una gran recopilación de datos por medio de cuestionarios en línea, que serían pro-

of intensity, given the types of effects and damage distribution for building types.

A new era for macroseismology started in the late 1980s, when the Internet made possible a large data collection by means of online questionnaires, to be provided by non-specialised compilers in rapid times and with minimal costs. The “Did You Feel It?” (DYFI) program in the United States is an earthquake effect survey applicable to small to moderate shakings, systematically adopted by government agencies and other parties, by means of on-line macroseismic questionnaires. The DYFI portal has been operating since 1999 in California, since 2000 for the rest of the United States and since 2004 globally. The basic idea is that citizens, by answering online a multiple-choice questionnaire, provide their testimony and observations for the earthquake they have/have not felt. The questions are designed to be diagnostic of the Modified Mercalli Intensity [MM: Wood and Neumann (1931), Dewey *et al.* (1995)] at the observer location. The MM values assigned to individual responses are then, averaged to provide a mean MM and its variability across the affected region (Atkinson and Wald, 2007). In Europe the situation is more complicated, as there are several initiatives done at the national scale; a tendency toward global standards and common resources is emerging in the very last years [see e.g. the recent Workshop held in Slovenia, <https://blogs.egu.eu/divisions/sm/2017/11/20/crowdsourcing-in-europe-how-to-share-macroseismic-data-of-felt-earthquakes/>; Bossu *et al.* (2018)].

However, the availability of Internet-based macroseismic intensity data depends on several factors: the number of answers, the population density of the affected area, the delay time in compilation, the number of contradictory answers, and availability of additional information about “observers”

porcionados por compiladores no especializados en tiempos rápidos y con costes mínimos. El programa “Did You Feel It?” (DYFI) en los Estados Unidos es una encuesta de “efectos de terremoto” aplicable a terremotos de pequeños a moderados, adoptada sistemáticamente por agencias gubernamentales y otras entidades, mediante cuestionarios macrosísmicos en línea. El portal DYFI ha estado operando desde 1999 en California, desde 2000 para el resto de los Estados Unidos, y desde 2004 a nivel mundial. La idea básica es que los ciudadanos, al responder un cuestionario en línea de opción múltiple, brinden sus testimonios y observaciones sobre el terremoto que han (o no) sentido. Las preguntas están diseñadas para ser diagnósticos de intensidad en la escala Mercalli Modificada MM (Wood y Neumann, 1931; Dewey *et al.* 1995) en el punto de ubicación del observador. Los valores de MM asignados a las respuestas individuales se promedian para proporcionar una MM media y su variabilidad en la región afectada (Atkinson y Wald, 2007). En Europa la situación es más complicada, ya que hay varias iniciativas realizadas a escala nacional, pero también está surgiendo una tendencia hacia estándares globales y recursos comunes en los últimos años (ver por ejemplo el reciente workshop realizado en Slovenia, <https://blogs.egu.eu/divisions/sm/2017/11/20/crowdsourcing-in-europe-how-to-share-macroseismic-data-offelt-earthquakes/>; Bossu *et al.*, 2018).

Sin embargo, la disponibilidad de datos de intensidad macrosísmica a través de Internet depende de varios factores: el número de respuestas, la densidad de población del área afectada, el tiempo de retraso en la compilación, el número de respuestas contradictorias y la disponibilidad de información adicional sobre “observadores” (Tosi *et al.*, 2015; Mak y Schorlemmer, 2016). Un elemento clave para evaluar la fiabilidad de estos datos es poder conocer cuál ha sido el proceso de transformación desde la información cualitativa contenida en el cuestionario hasta el

(Tosi *et al.*, 2015; Mak and Schorlemmer, 2016). A key element for assessing the reliability of these data is the transformation of the qualitative information provided by the questionnaire into a numerical quantification given by the intensity degree; the reproducibility of the evaluation process needs a detailed explanation of the work-flow used, and of the variability of all possible cases. Even if a viable automatic method for the estimation of macroseismic intensities is highly desirable for quick preliminary estimates for planning and support to the Civil Protection Department and decision makers, the debate about the compatibility of these data with traditional intensity assessment is still on-going (see for example Tosi *et al.*, 2015).

Based on natural phenomena, the Environmental Seismic Intensity scale [ESI 2007: Michetti *et al.* (2007)] classifies earthquake intensity based only on Earthquake Environmental Effects (EEE), either directly linked to the earthquake source or triggered by the ground shaking. EEEs include primary effects such as surface faulting, regional uplift and subsidence, as well as secondary effects like landslides, liquefaction, hydrological variation, ground cracks, and tsunamis (Michetti *et al.*, 2007). This scale has been taken into consideration in this study as examples of how specific geologic and environmental effects have been classified and reported in some of the studied events.

Finally, it is worth mentioning the new Tsunami Intensity Scale (Papadopoulos and Imamura, 2001) that incorporates 12 divisions and is consistent with the previously mentioned 12-grade seismic intensity scales. The new scale is arranged according to the effects on humans, on nature and objects, including vessels of variable size, and on buildings and other engineered constructions. Similarly to ESI, some examples of

dato numérico que establece el grado e intensidad asignado. La reproducibilidad del proceso de evaluación necesita una explicación detallada del flujo de trabajo utilizado y de la variabilidad de todos los casos posibles. Incluso en el caso de emplear métodos automáticos fiables para la estimación de las intensidades macro-sísmicas, algo que es altamente deseable para estimaciones preliminares rápidas que ayuden a planificar y apoyar al Departamento de Protección Civil y a los tomadores de decisiones, el debate sobre la compatibilidad de estos datos con los derivados de la evaluación de intensidad tradicional, aún está en curso (véase por ejemplo, Tosi *et al.*, 2015).

A partir de la observación de procesos geológicos y otros procesos naturales, la escala de Intensidad Sísmica Ambiental (ESI 2007, Michetti *et al.*, 2007) clasifica la intensidad del terremoto basándose únicamente en los Efectos Ambientales del Terremoto (EEE), ya sea directamente vinculados a la fuente del mismo o activados por la sacudida del suelo. Los EEE incluyen efectos primarios, como ruptura de fallas en superficie, levantamiento y hundimiento regionales, así como efectos secundarios tales como deslizamientos de ladera, licuefacción, variación hidrológica, grietas en el suelo y tsunamis (Michetti *et al.*, 2007). Esta escala se ha tenido en cuenta en este estudio, ya que los ejemplos de efectos geológicos y ambientales específicos se han clasificado e informado en algunos de los eventos estudiados.

Finalmente, vale la pena mencionar la nueva Escala de intensidad de tsunami (Papadopoulos y Imamura, 2001) que incorpora 12 divisiones y es consistente con las escalas de intensidad sísmica de 12 grados mencionadas anteriormente. La nueva escala se organiza de acuerdo con los efectos en las personas, la naturaleza y los objetos, incluidos los recipientes de tamaño variable, así como en los edificios y otras construcciones de ingeniería. De manera similar a ESI, en este estudio se darán algunos ejemplos de

intensity assignment based on this scale (indicated with the acronym TSU hereinafter) will be given in this study.

2.1. *Macroseismic data in Central America*

In the Americas, the first historical written documents about earthquakes date back to the 16th century, even if some pre-Hispanic sources have been discovered recently (see for example, Garduño Monroy, 2016).

Concerning the instrumental era, a rudimentary seismoscope in Central America was deployed in Panama, in 1882, after a strong earthquake occurred during the first French attempt to build the canal (see Rose *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2012). Early seismometers were, then, installed in El Salvador in 1896 and Guatemala in 1926; the seismic monitoring of local earthquakes started in the 1970s and 1980s, usually after devastating events.

Regarding macroseismology, in Central and South America, the most commonly used macroseismic scale is the (MM) scale. It was developed in 1931 by Harry Wood and Frank Neumann, modifying the Mercalli-Cancani scale, as formulated by Sieberg in 1923. This was completely revised in 1956 by Richter (1958), becoming the Modified Mercalli scale of 1956, which takes into account four different classes of masonry, the quality of workmanship, construction materials employed, and resistance against lateral forces. The MM scale, composed of 12 increasing levels of intensity, is a hierarchical classification of observed effects that range from the lower degrees, effects on people, intermediate and higher degrees, little-medium damage on objects and buildings, and highest degrees, catastrophic destruction of buildings, and great effects on the environment.

Worldwide, macroseismic scales have been applied to retrieve the basic information of contemporary and historical events

asignación de intensidad basados en esta escala (indicada con el acrónimo TSU).

2.1. *Datos macrosísmicos de Centroamérica*

En las Américas, los documentos históricos sobre terremotos se remontan al siglo XVI, incluso también se han descubierto algunas fuentes prehispánicas (véase, por ejemplo, Garduño Monroy, 2016).

En lo referente a la sismología instrumental, se desplegó un sismoscopio rudimentario en Panamá, en 1882, después de un fuerte terremoto durante el primer intento francés de construir el canal (ver Rose *et al.*, 2004; Fernández *et al.*, 2012). Los primeros sismómetros se instalaron en El Salvador en 1896 y en Guatemala en 1926, si bien el desarrollo del monitoreo sismométrico local comenzó en los años 70 y 80, después del impacto de terremotos devastadores, como usualmente sucede.

En relación con la macrosismología, en América Central y del Sur, la escala macrosísmica más utilizada es la Escala de Intensidad de Mercalli Modificada (MM). Fue desarrollada en 1931 por Harry Wood y Frank Neumann, modificando la escala de Mercalli-Cancani, tal como fue formulada por Sieberg en 1923. Richter (1958) la revisó completamente en 1956, convirtiéndose en la Escala de Mercalli Modificada de 1956, que tiene en cuenta cuatro clases diferentes de mampostería, la calidad de la mano de obra, los materiales de construcción empleados y la resistencia contra las fuerzas laterales. La escala MM, compuesta por 12 niveles crecientes de intensidad, es una clasificación jerárquica de los efectos observados sobre las personas (desde los grados más bajos hasta los intermedios), los objetos (en grados intermedios), los edificios (en grados altos) y el terreno (en grados muy altos). La destrucción catastrófica de edificios con grandes efectos sobre el medio ambiente corresponde a los grados más altos.

En todo el mundo, las escalas macrosísmicas

too, sometimes disregarding the unavailability of key information, as for example the masonry typology. The conversion of intensity values given using different intensity scales [e.g. MM to MCS, see Musson *et al.* (2010)] is not trivial, for the discrete, non-numerical character of the intensity degrees, and it bounces the problem back to the intensity assignment criteria allowed by each scale. Assigning intensity to an earthquake is like verifying the correspondence between the detected effects and the description formalised in the various degrees of the macroseismic scale; if the formulation of the macroseismic scale does not take into account a statistical distribution of effects, it is very important to summarise the information contained in the different sources available, and, then, to compare this information with the scenarios depicted in one or more degrees of the macroseismic scale. The available observations are also closely linked to the study localities, and reflect the time of the analysis (building types, materials, but also lexicon used).

Although the macroseismic scales establish somewhat objective evaluation criteria, in reality it is often not easy to assign a single degree of intensity. In fact, there are frequent cases in which macroseismic observations provide ambiguous or even contradictory indications: aside from some indicators suggesting a given degree, other ones typical of lower or higher degrees can be found. In the past thirty years, major steps forward have been made in the investigation of historical earthquakes, especially in the search and selection of authoritative sources, in the definition of procedures allowing one to track the paths pursued in the analyses, and the method of data synthesis, qualifying elements for the assessment of the reliability of historical data. These results have been made possible thanks to a

se han aplicado para recuperar la información básica de eventos contemporáneos e históricos, a veces sin tener en cuenta la falta de disponibilidad de información clave, como por ejemplo la tipología de mampostería. La conversión de los valores de intensidad dados usando diferentes escalas de intensidad (por ejemplo, MM a MCS, ver Musson *et al.*, 2010) no es trivial, por el carácter discreto y no numérico de los grados de intensidad, y traslada el problema a los criterios de asignación de intensidad permitidos por cada escala. Asignar intensidad a un terremoto es como verificar la correspondencia entre los efectos detectados y la descripción formalizada en los diversos grados de la escala macrosísmica. Si la formulación de la escala macrosísmica no tiene en cuenta la distribución estadística de los efectos, es muy importante resumir la información contenida en las diferentes fuentes disponibles y luego comparar esta información con los escenarios representados en uno o más grados de la escala macrosísmica. Las observaciones disponibles también están estrechamente vinculadas a las localidades de estudio y reflejan el periodo de análisis (tipos de construcción, materiales, pero también el léxico utilizado). Aunque las escalas macrosísmicas establecen criterios de evaluación de algún modo objetivos, en realidad a menudo no es fácil asignar un solo grado de intensidad. De hecho, hay casos frecuentes en los que las observaciones macrosísmicas proporcionan indicaciones ambiguas o incluso contradictorias; aparte de algunos indicadores que sugieren un grado dado, se pueden encontrar típicamente otros grados más bajos o más altos. En los últimos treinta años, se han dado grandes pasos hacia adelante en la investigación de terremotos históricos, especialmente en la búsqueda y selección de fuentes autorizadas, en la definición de procedimientos que permiten rastrear las rutas seguidas en los métodos de análisis de datos, en los métodos de síntesis y en aspectos orientados a la evaluación de la fiabilidad de los datos históricos. Estos resulta-

stimulating combination of history and seismology, with regard to objectives, methods and points of view.

2.2. A brief inventory of earthquake compilations for Central America

The current knowledge on the Central America historical seismicity is based on some valuable regional and national catalogues as well as papers, reports, and monographic volumes, describing the results of the research even for single seismic events. These are mostly descriptive seismological compilations that often do not include estimates of focal parameters, intensity values or isoseismal drawings.

Here, a brief inventory of descriptive and parametric catalogues for Central America follows: the quoted sources have been provided by a reference code, given in Appendix 1, if frequently cited, or used for the macroseismic data set compilation; otherwise they are in the references list. The connections between the main documents have been tentatively tracked in Fig. 2.1.

An outstanding collection of data in Central America has been carried out by Peraldo and Montero (1999) (PEMO999). They describe the main features of the main seismic catalogues (Grases, 1974; Lardé, 1960; Leeds, 1974; Carr and Stoiber, 1977; Larios, 1979; Jordan and Martínez, 1980; Sutch, 1981), merged with more recent regional works by White (1984) (WHIT984) and White and Harlow (1993) (WHHA993). Similarly, White *et al.* (2004) (WHal004) and Ambraseys and Adams (1996) (AMAD996) are based on previous works, as tracked in Fig. 2.1 and commented hereinafter. All these works use new historical sources found in archives or other different sources of information: they provide new seismological interpretations, in terms of macroseismic analyses, with the definition of focal parameters

dos han sido posibles gracias a una estimulante combinación de historia y sismología, con respecto a objetivos, métodos y puntos de vista.

2.2. Un breve inventario de compilaciones de terremotos para América Central

El conocimiento actual sobre la sismicidad histórica de América Central se basa en algunos valiosos catálogos regionales y nacionales, así como en documentos, informes y volúmenes monográficos, que describen los resultados de la investigación incluso para eventos sísmicos únicos. Estos son principalmente catálogos descriptivos que no incluyen estimaciones de parámetros macrosísmicos, valores de intensidad local, mapas de isosistas o parámetros focales.

A continuación, se presenta un breve inventario de catálogos descriptivos y paramétricos para Centroamérica. Las fuentes citadas han sido proporcionadas por un código de referencia, que figura en el Apéndice 1, si se cita con frecuencia o se usa para la compilación de conjuntos de datos macrosísmicos; de lo contrario están en la lista de referencias. Las conexiones entre los documentos principales se han rastreado tentativamente en la Fig. 2.1.

Peraldo y Montero, 1999 (PEMO999) han realizado una excelente recopilación de datos en América Central. Describen las características más importantes de los principales catálogos sísmicos (Lardé, 1960; Leeds, 1974; Grases, 1974; Carr y Stoiber, 1977; Larios, 1979; Sutch, 1981; Jordan y Martínez, 1980); fusionados con los trabajos regionales más recientes de White, 1984 (WHIT984) y White y Harlow, 1993 (WHHA993). Del mismo modo, White *et al.*, 2004 (WHal004) y Ambraseys y Adams, 1996 (AMAD996) se basan en trabajos anteriores, como se muestra en la Fig. 2.1 y se comentan más adelante. Todos estos trabajos utilizan nuevas fuentes históricas encontradas en archivos u otras fuentes diferentes de información; proporcionan nuevas interpretaciones sismológicas, en términos de análisis macrosísmicos, con la

of the most destructive earthquakes recorded in Central America, and in terms of seismotectonic interpretations, sometimes suggesting the identification of seismogenic sources.

With regard to parametric catalogues, the main digital one for Central America was carried out by Rojas *et al.* (1993); it consists of approximately 17,000 events, occurring between 1505 and 1992, and incorporates the seismic data of about 30 different earthquake catalogues, published in institute reports, journals and bulletins, as well as a number of other individual earthquake reports. The Rojas *et al.* (1993) catalogue includes both macroseismic and instrumental observations, without additional information about the reference macroseismic data sets or historical sources. It has been

definición de parámetros focales de los terremotos más destructivos registrados en América Central. También proporcionan interpretaciones sismotectónicas, que pueden contribuir a la identificación de fuentes sismogénicas.

Sobre los catálogos paramétricos, uno de los principales catálogos digitales para Centroamérica fue realizado por Rojas *et al.* (1993); consta de aproximadamente 17.000 eventos, ocurridos entre 1505 y 1992, e incorpora los datos sísmicos de alrededor de 30 diferentes catálogos sísmicos, publicados en informes de institutos, revistas y boletines, así como en una serie de otros informes de terremotos individuales. Rojas *et al.* (1993) incluye tanto observaciones macro sísmicas como instrumentales, sin información adicional sobre los conjuntos de datos macrosísmicos de referencia o fuentes históricas. Este ha

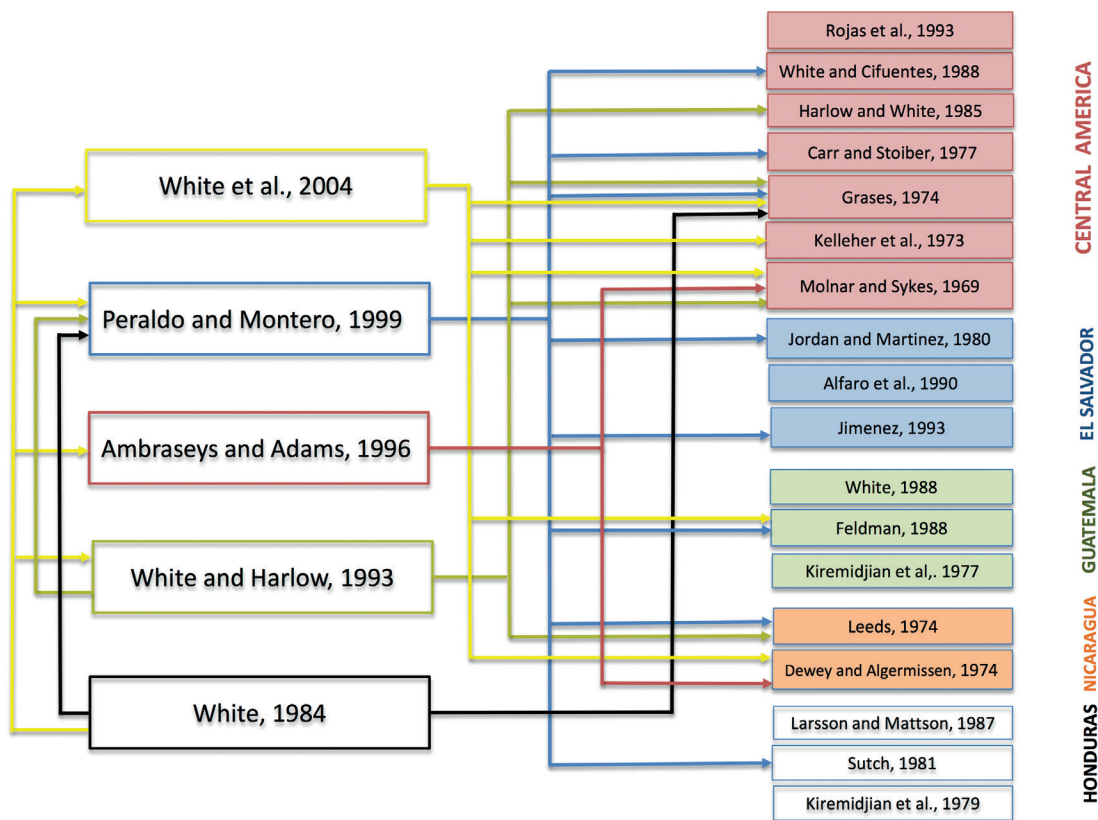


Fig. 2.1 - Tree of main compilations and catalogues for Central America: arrows show the principal connections.

Fig. 2.1 - Árbol de compilaciones y catálogos principales para Centroamérica: las flechas muestran las conexiones principales.

adopted, after revision and homogenisation, by major seismic hazard projects such as the 2010 RESIS II (Benito *et al.*, 2012), and CCARA (<https://ccara.openquake.org>).

3. Method for a brand-new MARCA-GEHN database

The RIESCA Project operates in view of fixing some limitations of the existing earthquake catalogues for Central American countries, by promoting the realisation of a first transnational, quality-checked macroseismic database for the four participating countries. The major limitations are related to an incomplete inventory of primary sources, the discontinuous IDPs (site intensities) collection, and non-uniform adoption of the intensity scales. Nonetheless, most of the devastating earthquakes ($I_0 > VIII$) of the last century have been studied with some details, and the deformation velocity in the area is usually so high to make a centennial collection of earthquakes a good sample of different seismic sources. Starting from these considerations and operating in a rigorous methodological way, the seismic catalogues available for each country have been analysed, jointly with international catalogues derived from projects and studies aimed at the requalification of historical and current seismic data; the scientific bibliography on seismic hazard and seismic risk, has been considered too, in order to individualise additional reference sources for each earthquake.

3.1. Macroseismic earthquake catalogues

The main source of information used in our study has been found in the most recent Central America and international seismic catalogues. Sometimes these works quote the primary sources that have been gathered

sido adoptado, después de su revisión y homogeneización, por proyectos de amenaza sísmica como el RESIS II 2010 (Benito *et al.*, 2012) y CCARA (<https://ccara.openquake.org>).

3. Metodología para la generación de la nueva base de datos MARCA-GEHN

El Proyecto RIESCA actúa bajo la perspectiva de corregir algunas limitantes del catálogo de terremotos existente para los países centroamericanos, promoviendo la realización de la primera base de datos macrosísmica transnacional para los cuatro países participantes. Las principales limitaciones están relacionadas con un inventario incompleto de fuentes primarias, la recolección discontinua de datos puntuales de intensidad (intensidades del sitio, I_s) y el uso no uniforme de las escalas de intensidad. No obstante, la mayoría de los terremotos devastadores ($I_0 > VIII$) del siglo pasado se han estudiado con cierto detalle, y la velocidad de deformación en el área suele ser tan alta como para que una colección centenaria de terremotos sea una buena muestra de la actividad de diferentes fuentes sísmicas. Partiendo de estas consideraciones y operando bajo una rigurosa metodología, se han analizado los catálogos sísmicos disponibles para cada país, conjuntamente con los catálogos internacionales derivados de proyectos y estudios destinados a la recalificación de datos sísmicos históricos y actuales. También se ha considerado la bibliografía científica sobre amenaza sísmica y riesgo sísmico, para individualizar fuentes de referencia adicionales para cada terremoto.

3.1. Catálogos macrosísmicos

La principal fuente de información utilizada en nuestro estudio se ha encontrado en los 11 más recientes catálogos sísmicos internacionales y de Centroamérica. En ocasiones, estos trabajos citan las fuentes principales que se han

and described. They are hereinafter briefly presented (for the codes refer to Appendix 1). Only in a few cases have the macroseismic data been assessed with a specific study, and parametric values for the earthquake assigned *ex novo*: additional references will be quoted in the individual description of the studied earthquakes, given in section 4.

- WHIT984: a catalogue of shallow historical earthquakes for the Guatemala region is presented by White (1984). It contains 25 damaging earthquakes, 18 of which were not previously published. The catalogue was drawn after a documentary search based on official contemporary documents, found at local archives in Guatemala, Nicaragua, and El Salvador. Their appendix contains information on the date of the seismic event, the cities affected, the date and reference of the origin source.
- WHHA993: they compiled a catalogue of 51 moderate size, upper-crustal earthquakes in Central America since 1900. The intraplate earthquakes were located along the volcanic front with a $6.0 < M < 6.5$ and (MM) intensity $> VII$. For each event the catalogue presents: date, UTC time, epicentre, the highest intensity contour, magnitude, and estimates of the number of deaths, injuries and homeless. Detailed seismological studies were also carried out on a few individual earthquakes.
- AMAD996: they collected and re-examined macroseismic information for large-magnitude ($M_s > 7.0$) Central American earthquakes that occurred between 1898 and 1994. A catalogue of 51 earthquakes was realised combining macroseismic and instrumental information. The authors gathered a large number of primary documents (from local and international press, published and unpublished reports, such as government documents,

recopilado y descrito. A continuación se presentan brevemente los catálogos que han constituido las principales fuentes de la base de datos desarrollada en el proyecto RIESCA (los códigos están descritos en el Apéndice 1). Solo en unos pocos casos se han evaluado los datos macrosísmicos con un estudio específico, y se han asignado valores paramétricos para el terremoto en cuestión. Se citarán referencias adicionales en la descripción individual de los terremotos estudiados, dada en la sección 4.

- WHIT984: Presenta un catálogo de terremotos históricos poco profundos para la región de Guatemala. Contiene 25 terremotos dañinos, 18 de los cuales no habían sido publicados previamente. El catálogo fue elaborado después de una búsqueda documental basada en documentos oficiales contemporáneos, encontrados en archivos locales en Guatemala, Nicaragua y El Salvador. El Apéndice contiene información sobre la fecha del evento sísmico, las ciudades afectadas, la fecha y la cita de la fuente original.
- WHHA993: Compilaron un catálogo de 51 terremotos de tamaño moderado en la corteza superior de América Central desde 1900. Los terremotos intraplaca se ubicaron a lo largo del frente volcánico con $6,0 < M < 6,5$ y intensidad Mercalli Modificada (MM) $> VII$. Para cada evento en el catálogo se incluyen los datos de fecha, hora UTC, epicentro, isosista de mayor intensidad, magnitud y estimaciones del número de muertes, lesiones y personas sin hogar. También se realizaron estudios sísmológicos detallados en algunos terremotos individuales.
- AMAD996: Recolectaron y re-examinaron información macrosísmica para terremotos centroamericanos de gran magnitud ($M_s > 7,0$), ocurridos entre 1898 y 1994. Se realizó un catálogo de 51 terremotos combinando información macrosísmica e instrumental. Los autores reunieron una gran cantidad de documentos primarios (de la prensa local e

consular correspondence, shipping and weather reports as well as technical papers), providing accurate case histories (Appendix) of the 51 earthquakes where main sources of macroseismic information are reported. Maps with macroseismic locations and intensities estimations (MSK scale) are added.

- PEMO999: they published an earthquake catalogue according to modern techniques, including seismic information obtained directly from archives and/or other different referenced sources. Historical seismicity research, conducted according to historical-seismological settings, included a more complete earthquake documentation obtained from foreign and Central American repositories. The authors, with great compilative and interpretative effort, present new estimates of intensity, new macroseismic fields, indications on macroseismic magnitudes and seismotectonic interpretation.
- WHal004: they present a new catalogue from 1526 to 2000, related to the seismic history of the Middle America subduction zone, along the Pacific section going from central El Salvador to eastern Chiapas, Mexico. The catalogue concerns seismic events with $6.5 < M < 8$. Authors paid particular attention to the typology of sources used for the description of seismic events and new archives searches were also conducted for primary sources of information. 107 earthquakes were finally presented, 27 of which were previously unknown. IDPs as well as intensity maps are provided too.

In addition to the regional catalogues, two international ones have been taken into account, as will be described in the section Data.

internacional, informes publicados y no publicados, tales como documentos del gobierno, correspondencia consular, informes meteorológicos enviados, así como documentos técnicos), proporcionando historiales de casos precisos (Apéndice) de los 51 terremotos, cuyas principales fuentes de información macrosísmica fueron reportadas. Se compilan mapas con ubicaciones macrosísmicas y estimaciones de intensidades (escala MSK).

- PEMO999: Los autores publicaron un catálogo de terremotos de acuerdo con técnicas modernas, que incluye información sísmica obtenida directamente de archivos y/o otras fuentes de referencia diferentes. La investigación de sismicidad histórica, realizada de acuerdo con escenarios histórico-sismológicos, incluyó una documentación más completa sobre terremotos, obtenida de repositorios extranjeros y centroamericanos. Los autores, con gran esfuerzo de recopilación y interpretación, presentan nuevas estimaciones de intensidad, nuevos campos macrosísmicos y indicaciones sobre magnitudes macrosísmicas hasta la interpretación sismotectónica.
- WHal004: Presentan un nuevo catálogo de 1526 a 2000, relacionado con la historia sísmica de la zona de subducción de América Central, a lo largo de la sección del Pacífico que va desde el centro de El Salvador hasta el este de Chiapas, México. El catálogo se refiere a eventos sísmicos con $6,5 < M < 8$. Los autores prestaron especial atención a la tipología de las fuentes utilizadas para la descripción de los eventos sísmicos y también se realizaron búsquedas en nuevos archivos de fuentes primarias de información. Finalmente se presentaron 107 terremotos, 27 de los cuales se desconocían anteriormente. También se proporcionan datos puntuales de intensidad, así como mapas de Isosistas.

Además de los catálogos regionales, se han tomado en cuenta dos catálogos internacionales, como se describe en la sección de Datos.

3.2. Data entry and revision of macroseismic data point sets

The archive compilation starts with the identification of data sources and reference studies from which macroseismic intensities can be obtained, and geographically referenced.

A Google™ form (Fig. 3.1) has been set up to allow the data entry to users belonging to various institutions and are located in distinct countries. The first section of the form drives the compiler toward a unique identification of earthquake. The IDPs must be referred to, by means of an event code (EVENTID): this choice implies the selection of a parametric earthquake catalogue (to be selected among some choices suggested by a drop-down menu) that becomes the reference event for origin time, location, and magnitude. In the second section, the location of the individual site should be entered with administrative and geographical identifiers; this part can be customised according to the administrative levels of each nation, admitting four levels that span from a wide geographical region to a locality, part of the municipality (Municipios); geographical coordinates and a unique identification code for the site can be taken from the inventory of localities (Free Gazetteer data) available at <http://www.geonames.org/>. If not properly inserted, this datum can be adjusted/uniformised during the post-processing revision phase. Then, the site specific macroseismic data have to be selected from drop-down menus only: this choice forces the compiler to a clear identification of the intensity scale used, and avoids mistypes or unconventional intensity assignment (e.g. value spanning over several degrees, 6-8, sometimes found in the sources). Intensity values are always given by Roman numbers, in agreement with the original macroseismic scale defi-

3.2. Entrada de datos y revisión de conjuntos de datos puntuales macrosísmicos

La compilación del archivo comienza con la identificación de fuentes de datos y estudios a partir de los cuales se pueden obtener intensidades macrosísmicas con su referencia geográfica.

Se ha establecido un formulario de Google™ (Fig. 3.1) para permitir la entrada de datos a usuarios que pertenecen a varias instituciones y que se encuentran en distintos países. La primera sección del formulario conduce al compilador hacia una identificación única del terremoto al que se refieren los Datos Puntuales de Intensidad (IDP), por medio de un código de evento (EVENTID). Esto implica la selección de un catálogo paramétrico de terremotos (a ser elegido entre algunas opciones sugeridas por un menú desplegable) que se convierte en la fuente de referencia para datar el tiempo origen, ubicación y magnitud. En la segunda sección, la ubicación del sitio individual debe ingresarse con identificadores administrativos y geográficos; esta parte se puede personalizar de acuerdo con los niveles administrativos de cada nación, admitiendo cuatro niveles que abarcan desde una amplia región geográfica hasta una localidad, o parte de un municipio. Las coordenadas geográficas y un código de identificación único para el sitio pueden tomarse del inventario de localidades (datos del diccionario geográfico gratuito) disponible en <http://www.geonames.org/>. Si no se ingresa correctamente, este dato se puede ajustar/uniformar durante la fase de revisión posterior al procesamiento. Luego, los datos macrosísmicos específicos del sitio deben seleccionarse solo de los menús desplegables. Esta elección obliga al compilador a una identificación clara de la escala de intensidad utilizada y evita tipos incorrectos o asignaciones de intensidad no convencionales (por ejemplo, valores que abarcan varios grados, 6-8, a veces encontrado en las fuentes de datos. Los valores de intensidad siempre están dados por números romanos, de acuerdo con la definición original

Fig. 3.1 - A Google™ form has been set up within the RIESCA Project to enable macroseismic data collection from various compilers. Its utilisation started in November 2017. Two sections are shown: a) related to the site identification; b) related to the macroseismic intensity and references. The form is available at this link: <https://forms.gle/k52uX4h91ND1ktTf9>.

Fig. 3.1 - Se ha creado un formulario de Google™ dentro del Proyecto RIESCA para permitir la recopilación de datos macrosísmicos de varios compiladores. Su utilización comenzó en noviembre de 2017. Se muestran dos secciones: a) relacionadas con la identificación del sitio; b) relacionados con la intensidad macrosísmica y las referencias. El formulario está disponible en este enlace: <https://forms.gle/k52uX4h91ND1ktTf9>.

dition; other commonly used annotations (e.g. Not Felt, Heavy Damage) are allowed too. Finally, additional information such as the type and reference of the data source, quality identifiers for both the source and intensity assignment, annotation and the compiler’s name/s, are collected too.

The Google™ form has been used for

de la escala macrosísmica. También se permiten otras anotaciones de uso común (por ejemplo, no sentido, daño fuerte). Finalmente, se recopila información adicional como el tipo y la referencia de la fuente de datos, los identificadores de calidad tanto para la asignación de la fuente como de intensidad, la anotación y el nombre del compilador.

the initial data collection, after a training session for potential compilers, held in San Salvador in November 2017. The form is still available for new data entry.

At given collection deadlines, the general table obtained via the Google™ form went into a post-processing revision phase. An Excel table of IDPs for each earthquake has been sorted and provided with

El formulario de Google™ se ha utilizado para la recopilación de datos iniciales, después de una sesión de capacitación para compiladores potenciales, celebrada en San Salvador en noviembre de 2017. Una versión actualizada del formulario está disponible para la futura recopilación de datos.

En los plazos establecidos de recolección, la tabla general obtenida a través del formulario de

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	XLSSTAT
Date	Time	Err	RMS	Latitude	Longitude	Smaj	Smin	Az	Depth	Err	Ndef	Nsta	Gap	mdist	Mdist	Qual	Author	OrigID		
1996/04/01	18:40:58.41	0.50	1.320	12.0500	-86.7497	5.54	958	0.97	9	5.6	138	163	127	2.00	153.00	m	uk	isc	2061273	
http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=956538&out_format=IMS1.0&request=REVIEWED																				
28-Jan-18	laura	Fix municipios field (mandatory), unknown format problem at J15, REFID 5																		
02-Jan-18	sara	Municipios added. J15 format corrected, REFID 5																		
31-Jul-18	eliana	Verified intensity by location and administrative affiliations. Coordinates standardized at 3 digits																		
Informazioni cronologiche	Reference catalogue	Earthquake identificatio n code (EventID)	Country	1st Geographical (Region)	2nd Administrativ e (Departamen tos)	3rd Administrativ e level (Municipios)	4rd level (Localidad)	Site identifica tion code (siteID)	Site coordinate - Latitude (SiteLat)	Site coordinate: Longitude (SiteLon)	Locality of the original study (if revised)	Intensity scale	Intensity assigned	Source type	Full reference	Quality of the source	Intensity of the event	Add assignme nt note	your note	Compiled by
1/11/2018 22:13:44	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	León	León	Poneloya	12.374	-87.033	MM	IV-V	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:13:53	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	León	León	Puerto Sandino	12.190	-86.780	MM	IV-V	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:14:03	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Chinandega	Chinandega	Chinandega	12.626	-87.133	MM	IV	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:14:18	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	León	León	León	12.437	-86.909	MM	IV-V	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:14:30	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	León	Nagarote	Nagarote	12.286	-86.557	MM	IV	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:26:32	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Managua	Managua	Managua	12.147	-86.247	MM	IV	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:26:43	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Carazo	Jinotepe	Jinotepe	11.850	-86.200	MM	III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:26:55	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	León	Telica	Telica	12.518	-86.856	MM	II-III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:27:11	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Masaya	Masaya	Masaya	11.971	-86.103	MM	II-III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:27:26	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Belén	Belén	Belén	11.438	-85.822	MM	II-III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:27:37	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Rivas	San Juan del	San Juan de Sur	11.436	-85.850	MM	III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:27:48	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Rivas	Rivas	La Virgen	11.454	-86.090	MM	III	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@
1/11/2018 22:28:00	ISC - Bulletin	956538	Nicaragua	Pacifico	Granada	Granada	Granada	11.934	-85.956	MM	III-IV	Seismolog	Acosta, A., Bo	5	5	5				saratguevara@

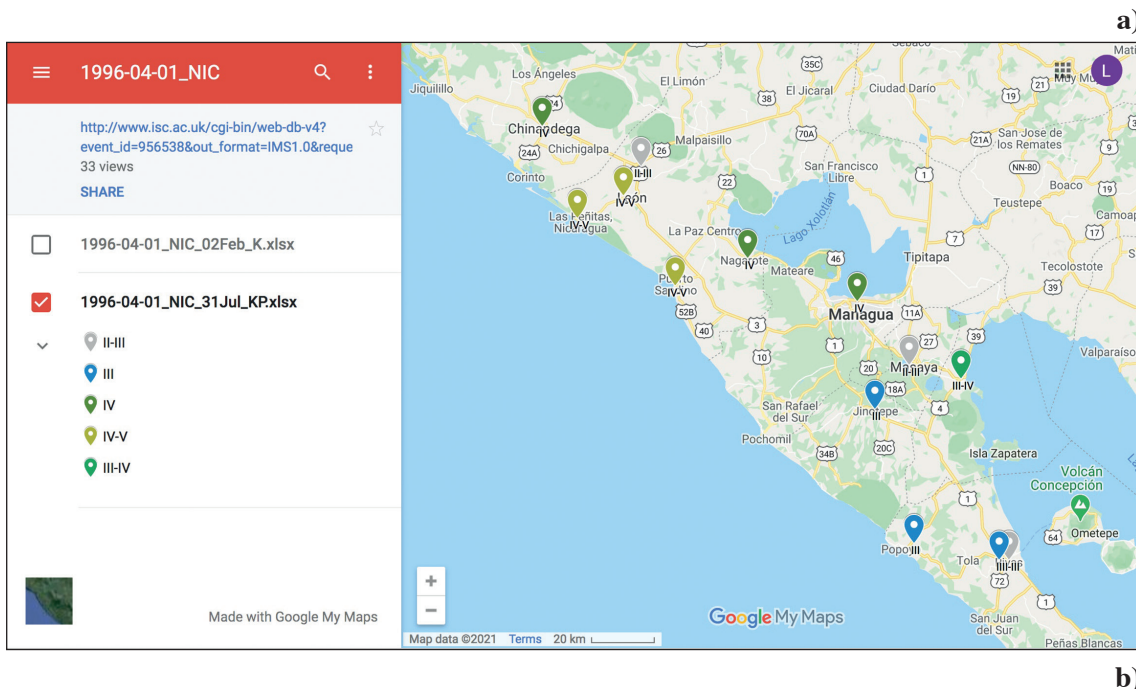


Fig. 3.2 - Intermediate processing of an IDP set: a) the records collected via the Google™ form are isolated into an Excel file for data revision and integration; b) they are plotted using Google™ Map, to check the site location.

Fig. 3.2 - Procesamiento intermedio de un conjunto MDP. a) Imagen de archivo excel donde se aíslan los registros recopilados a través del formulario de Google™ para la revisión y integración de datos, b) Ejemplo de imagen de Google™ map donde se representan los datos para verificar la ubicación del sitio.

additional information (e.g. the link to the hypocentral solution given by the reference catalogue, comments about the revision phases); typos were fixed, references and site codes uniformised, by mutual feedback among the revision team (Italian participants to the SWG) and the Central America compilers. Other Google™ tools (Map, Earth) were used for the first graphical representation; they provide the required easiness, interoperability and open access resources, which are needed in this international context. The final post-processing consisted of checking the geographical location of the data uploaded, re-assessing intensity values in some special cases, and integrating new sources not considered in the first version, especially to cover neighbouring countries. Once the revision is complete, a final numerical table and graphical representation for each earthquake has been uploaded in a common working area (Fig. 3.2).

3.3. Towards the online MARCA-GEHN archive

In March 2019, the RIESCA SWG decided that the macroseismic intensity data collection, still far from complete, needed to be available for the whole community, and, therefore, published online. We resorted to MIDOP [Macroseismic Intensity Data Online Publisher: Locati and Cassera (2010)] a tool for easily transforming macroseismic intensity data tables into interactive maps. As the authors say, MIDOP is an initiative related to the European Archive of Historical Earthquake Data (AHEAD) that encourages the adoption of common compilation standards and compatible data formats among macroseismic intensity data

Google™ entró en una fase de revisión posterior al procesamiento. Se ha ordenado una tabla Excel de IDP para cada terremoto y se le ha proporcionado información adicional (por ejemplo, el enlace a la solución hipocentral proporcionada por el catálogo de referencia, comentarios sobre las fases de revisión), se corrigieron los errores tipográficos, se uniformaron las referencias y los códigos de sitio, mediante comentarios consensuados entre el equipo de revisión (participantes italianos en el SWG) y los compiladores de América Central. Se utilizaron otras herramientas de Google™ (Map, Earth) para la primera representación gráfica, proporcionando la facilidad requerida, la interoperabilidad y los recursos de acceso abierto que se necesitan en este contexto internacional. El posprocesamiento final consistió en la verificación de la ubicación geográfica de los datos cargados, la reevaluación de los valores de intensidad en algunos casos especiales y la integración de nuevas fuentes no consideradas en la primera versión, especialmente para cubrir los países vecinos. Una vez que se completa la revisión, se carga una tabla numérica final y una representación gráfica para cada terremoto en un área de trabajo común (Fig. 3.2).

3.3. Hacia el archivo MARCA-GEHN en línea

En marzo de 2019, el SWG de RIESCA decidió que la recopilación de datos de intensidad macrosísmica, aún por completar, debía estar disponible para toda la comunidad y, por lo tanto, publicarse en línea. Recurrimos a MIDOP (editor en línea de datos de intensidad macrosísmica, Locati y Cassera, 2010), una herramienta para transformar fácilmente las tablas de datos de intensidad macrosísmica en mapas interactivos. Según los autores, MIDOP es una iniciativa relacionada con el Archivo Europeo de Datos Históricas de Terremotos (AHEAD) que fomenta la adopción de estándares de compilación comunes y formatos de datos compatibles entre los compiladores de datos de intensidad

compilers: it does not require any third-party product, and can be customised to specific needs. During a visiting stage in Italy in May 2019 of one of the authors, the working files of the studied events were modified to fit the entry rules of MIDOP.

Three tables were compiled, namely the earthquake catalogue table, the IDPs table and the references table. The existing EVENTID and SITEID were checked and uniformised; additional identification codes were added (e.g. the MDPid, univocal code assigned to each macroseismic observation) to support the interconnection of tables required by the software. Thanks to the assistance of the code developer (M. Locati) a first release Beta0.1 was published in June 2019, then updated in mid-July (Beta0.2).

MARCA-GEHN (Fig. 3.3) has been available online since the end of November 2019 at <http://marca-riesca.inogs.it> and throughout the RIESCA web site at <http://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>. The version at the time of the submission of this paper is the V.1.6, released in September 2020.

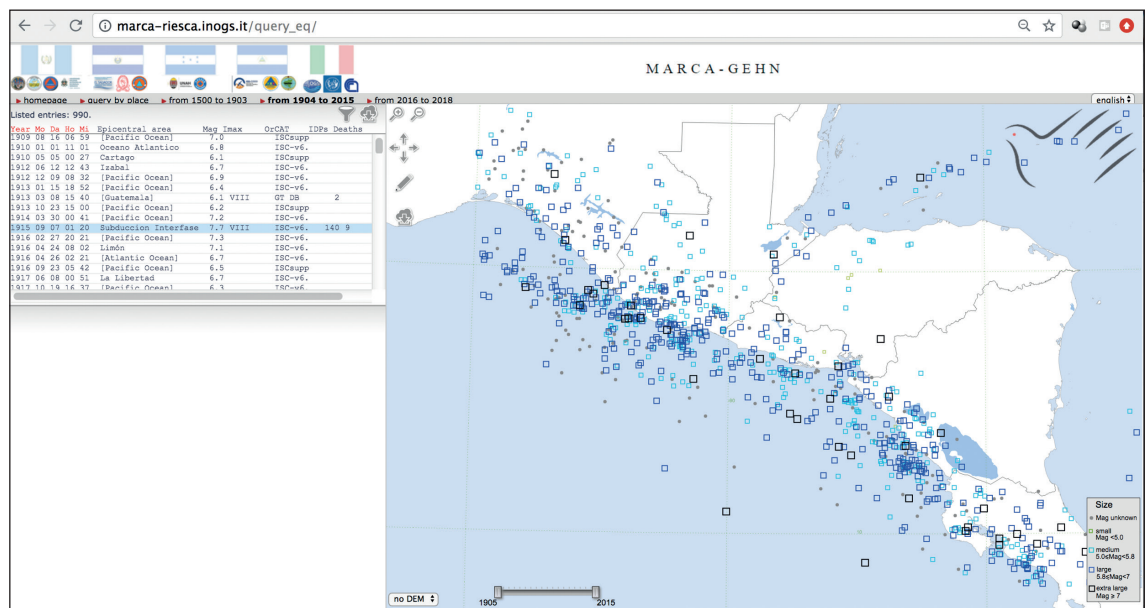
Similarly to the other online archives of macroseismic data published using MIDOP (Locati and Cassera, 2010, <https://emidius.eu/MIDOP/examples/>), data can be accessed by earthquakes and by localities. With the “query by earthquake” option, an earthquake list appears in the upper left frame: it is linked to a global earthquake map (main frame on the right) with interactive zooming, and time-windowing capabilities. Note that multiple time frames of the catalogue are allowed, to accomplish the different characteristics of the parametric data, as will be explained in chapter 4. When an earthquake is selected (both by clicking on top of the list, or on the epicentre symbol), the map changes to represent the specific event, with the macroseismic data set, when available.

macro sísmica. No requiere ningún producto de terceros, y puede ser personalizado a necesidades específicas. Durante una etapa de visita de uno de los autores en Italia en mayo de 2019, los archivos de trabajo de los eventos estudiados se modificaron para ajustarse a las reglas de ingreso de MIDOP.

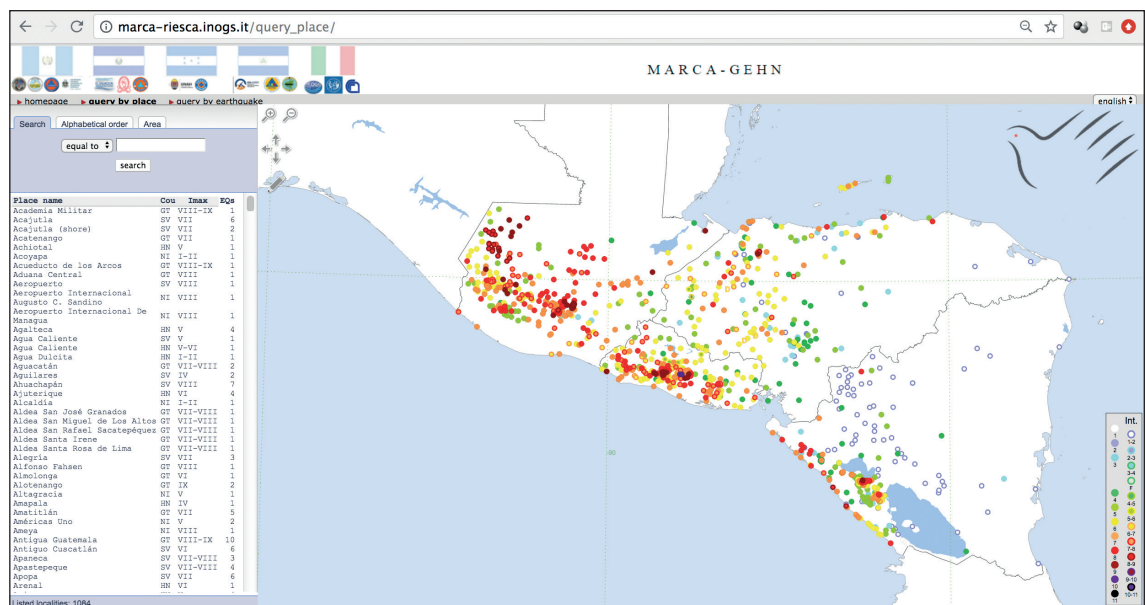
Se construyeron tres tablas; la tabla del catálogo de terremotos, la tabla de IDP y la tabla de referencias. El EVENTID y SITEID existentes fueron verificados y uniformados; adicionalmente se agregaron códigos de identificación (por ejemplo, el MDPid, código unívoco asignado a cada observación macro sísmica) para apoyar la interconexión de tablas requeridas por el software. Gracias a la ayuda del desarrollador del código (M. Locati), se publicó una primera versión Beta0.1 en junio de 2019, que luego se actualizó a mediados de julio (Beta0.2).

MARCA-GEHN (Fig. 3.3) está disponible en línea desde finales de noviembre de 2019 en <http://marca-riesca.inogs.it> y en todo el sitio web de RIESCA en <http://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>. La versión en el momento de la presentación de este documento es la V.1.6, lanzada en septiembre de 2020.

De manera similar a los otros archivos en línea de datos macro sísmicos publicados usando MIDOP (Locati y Cassera, 2010, <https://emidius.eu/MIDOP/examples/>), se puede acceder a los datos por terremotos y por localidades. Con la opción “consulta por terremoto”, aparece una lista de terremotos en el cuadro superior izquierdo, que está vinculada a un mapa global de terremotos (cuadro principal a la derecha) con zoom interactivo y capacidades de ventana de tiempo. Se permiten múltiples períodos de tiempo del catálogo para lograr las diferentes características de los datos paramétricos, como se explicará en el capítulo 4. Cuando se selecciona un terremoto (haciendo clic en la parte superior de la lista o en el símbolo del epicentro), el mapa pasa a representar el evento en específico, con su conjunto de datos macro sísmicos, cuando



a)



b)

Fig. 3.3 - The online archive MARCA-GEHN (V1.0 available since November 2019) at <http://marca-riesca.inogs.it/>; a) entry frame of the earthquake catalogue (query by earthquake); b) entry frame of the site histories (query by place); c) map of a given MDP set (query by earthquake); d) time history at a given locality (query by place).

Fig. 3.3 - El archivo en línea MARCA-GEHN (V1.0 está disponible desde noviembre de 2019) en <http://marca-riesca.inogs.it/>; a) página de entrada del catálogo de terremotos (consulta por terremoto); b) marco de entrada de las historias del sitio (consulta por localidad); c) mapa de un conjunto MDP (consulta por terremoto); d) historia temporal en una localidad determinada (consulta por localidad).

The left bottom frame hosts the detailed parameters of the earthquake, and the list of available localities. Additional interactive capabilities (for printing, downloading, customising the maps) are provided. Each dot representing a macroseismic observation (IDP) can be selected as well, on the list or on the map.

With the “query by place” option, the online platform returns a global maximum intensity map and options for searching the site of interest. Note that the seismic history is given as table and graph, and customisations are available before data export/download. Note also that the software, up to now, can handle non-numerical intensity data like Felt (F), or Heavy Damage (HD); for sake of simplicity, in the graphical representation of intensity versus time (Fig. 3.3d) the y-axis is given in Arabic numbers, and not Roman numbers as stated by most of the intensity scales.

4. Data

The data collected in MARCA-GEHN can be subdivided into:

1. the earthquake catalogue table: it provides the parametric solution for selected earthquakes, given in agreement with the reference source. This list constitutes the univocal identifier of events (EVENTID code, this code number appears in query by earthquake mode, in the lower left panel, at the line “Dataset by MDP set by” EVENTID);
2. the macroseismic data point (MDP) sets, constituted by IDPs: they represent the “image” in terms of macroseismic intensities for a subset of the studied events.

The MDPs will be extensively described in the next chapters, subdivided by countries; the reference earthquake catalogue

éstos están disponibles. El marco inferior izquierdo alberga los parámetros detallados del terremoto y la lista de localidades disponibles. Se proporcionan capacidades interactivas adicionales (para imprimir, descargar, personalizar los mapas). Cada punto que representa una observación macrosísmica (IDP) también se puede seleccionar, en la lista o en el mapa.

Con la opción de “consulta por lugar”, la plataforma en línea devuelve un mapa global de máxima intensidad y opciones para buscar en el sitio de interés. El historial sísmico se proporciona en forma de tabla y gráfico, y la personalización está disponible antes de la exportación/descarga de datos. Téngase en cuenta que el software, en realidad, puede manejar datos de intensidad no numéricos como Felt (F) o Heavy Damage (HD). En aras de la simplicidad, en la representación gráfica de la intensidad en función del tiempo (Fig. 3.3d), el eje y se indica en número arábigo, y no en número romano, como indican la mayoría de las escalas de intensidad.

4. Datos

Los datos recopilados en MARCA-GEHN se pueden subdividir en:

1. La tabla del catálogo de terremotos: proporciona la solución paramétrica para terremotos seleccionados, de acuerdo con la fuente de referencia. Esta lista constituye el identificador unívoco de eventos (código EVENTID, que aparece en la consulta por modo de terremoto, en el cuadro inferior izquierdo, en la línea “Dataset by MDP set by” EVENTID);
2. El conjunto de datos macrosísmicos (conjunto MDP), constituidos por IDP: representan la “imagen” en términos de intensidades macrosísmicas para un subconjunto de los eventos estudiados.

Los MDP se describirán ampliamente en los próximos capítulos, subdivididos por países. El

requires some additional information, hereinafter provided.

Nearly all the earthquakes that are listed in the pre-1904 time window derive from the Global Historical Earthquake Catalogue [GHEC V.1.0: Albin *et al.* (2013, 2014)], released jointly with the Global Historical Earthquake Archive (GHEA), in the framework of the activities sponsored by Global Earthquake Model (GEM) in 2010-2013. From 1526 to 1903, 85 earthquakes fall within the geographical area of interest (epicentral location within a rectangular area of coordinates 95°W , 9°N to 82°W , 18°N). The epicentral solution adopted is the one selected among the different one listed in the GHEA archive (additional information from GHEA for a specific event can be obtained by a search at <https://emidius.eu/GEH/info/?en=EVENTID>, where EVENTID is the univocal earthquake identifier). A magnitude value is always assigned in the catalogue, even if no instrumental data are available for that period. The GHEC catalogue is limited to M 7+ earthquakes, but there are some records below this threshold, probably because of a revision, during the catalogue compilation. Four additional events (in 1774, two in 1830, 1878) have been added to this historical earthquake list.

In the time window 1904-2015, the parametric records for earthquakes basically derive from the ISC catalogue and bulletins. The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue, V.6.0 [International Seismological Centre (2019), hereinafter referred to as ISC019] that became available in March 2019, has been used; it collects continental events with M 5-5.5+, and global events around M 5.5+. Additional information from the ISC archives (data available, and referenced bibliography) can be obtained by a specific event search, again using the EVENTID

catálogo de terremotos “de referencia” requiere información adicional, de aquí en adelante prevista.

Casi todos los terremotos que figuran en la ventana de tiempo anterior a 1904 se derivan del Catálogo Histórico Global de Terremotos (GHEC V.1.0: Albin *et al.*, 2013, 2014), publicado conjuntamente con el Archivo Histórico Global de Terremotos (GHEA), en el marco de las actividades patrocinadas por Global Earthquake Model (GEM) en 2010-2013. En el periodo entre 1526 y 1903, se reportan 85 terremotos cuyos epicentros están ubicados dentro del área geográfica de interés (área rectangular de coordenadas [95°W , 9°N ; 82°W , 18°N]). La solución epicentral adoptada es la seleccionada entre las diferentes enumeradas en el archivo GHEA, donde se puede obtener información adicional para un evento específico mediante una búsqueda en <https://emidius.eu/GEH/info/?en=EVENTID>, siendo EVENTID el identificador unívoco del terremoto. Siempre se asigna un valor de magnitud en el catálogo, incluso si no hay datos instrumentales disponibles para ese período. Es decir, el catálogo GHEC se compone principalmente de terremotos M 7+, pero existen algunos registros por debajo de este umbral, probablemente debido a una revisión, durante la compilación del catálogo. Se han agregado cuatro eventos a esta lista histórica de terremotos: uno ocurrido en 1774, dos en 1830 y otro en 1878.

En la ventana de tiempo 1904-2015, los registros paramétricos de terremotos se derivan básicamente del catálogo y boletines del ISC. El catálogo global de terremotos instrumentales ISC-GEM, V.6.0 (International Seismological Center, 2019, en lo sucesivo denominado ISC019) que estuvo disponible en marzo de 2019, ha sido utilizado. Recopila eventos continentales con M 5-5,5+ y eventos globales alrededor de M 5,5+. Se puede obtener información adicional de los archivos del ISC (datos disponibles y bibliografía referenciada) mediante una búsqueda de eventos específica, nuevamente

identifier (e.g. for the EVENTID=597450, digit for the references http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?event_id=597450; for the comprehensive solutions http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=597450&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE).

The catalogue is complemented by a supplement that lists events with poorly determined parameters (ISCsuppl), most of the records are without a magnitude estimate. We selected the events in the same geographical area as before: 784 earthquakes listed in MARCA-GEHN come from the main ISC-GEM catalogue (ISC019), 199 derive from the supplement (ISCsuppl). There are in addition 8 events with MDP sets, coming from other sources.

The most recent time window 2016-2018 is represented only by three earthquakes for which an MDP set has been uploaded, with macroseismic data exclusively coming from the online questionnaire DidYouFeelIT (DYFI), by USGS. They have been considered for comparison purposes only, the epicentral parameters derived from the quoted agencies.

In conclusion, a catalogue with a total of 1082 parametric records is given in the MARCA-GEHN archive; namely, original magnitude reaches the maximum with the M 8.1 in the 1862 Santa Ana earthquake, and 189 events do not have an assigned magnitude; a customised representation for M =null earthquake has been set up in MIDOP, using a small full grey dot.

In the following, a description of the studied events represented in the MARCA-GEHN archive by MDP sets is given. The earthquakes are referred to the country where the epicentre lies.

Regarding the fault systems, similarly to the earthquake catalogues, we resorted to published databases available online,

utilizando el identificador EVENTID (por ejemplo, para el EVENTID=597450, el dígito para las referencias se encuentra en http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?event_id=597450, mientras que para las soluciones integrales se debe consultar http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=597450&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE).

El catálogo se complementa con un suplemento que enumera eventos con parámetros mal determinados (ISCsuppl), y en este caso la mayoría de los registros no tienen una estimación de magnitud. Los eventos seleccionados en el área geográfica antes mencionada incluidos en MARCA-GEHN provienen de las siguientes fuentes: 784 terremoto del catálogo principal ISC-GEM (ISC019), 199 del suplemento (ISCsuppl) y 8 eventos con conjuntos de MDP, proceden de otras fuentes.

El periodo de tiempo más reciente, 2016-2018, incluye únicamente tres terremotos para los cuales se ha cargado un conjunto de MDP, con datos macrosísmicos provenientes exclusivamente del cuestionario en línea DidYouFeelIT (DYFI), por USGS. Se han considerado sólo con fines de comparación los parámetros epicentrales derivados de las agencias citadas.

En conclusión, se proporciona un catálogo total con 1082 registros paramétricos en el archivo MARCA-GEHN. Específicamente, la magnitud alcanza el valor máximo con el terremoto M 8,1 de Santa Ana de 1862. Para 189 eventos, que no tienen una magnitud asignada, se ha configurado una representación personalizada haciendo M = null en MIDOP y utilizando un pequeño punto gris relleno.

A continuación, se incluye una descripción de los eventos estudiados, que están representados en el archivo MARCA-GEHN por conjuntos MDP. Los terremotos están referidos al país donde se ubica el epicentro.

Sobre los sistemas de fallas, de manera similar a los catálogos de terremotos, recurrimos a bases de datos publicadas disponibles en línea.

namely for the studied area the compilation provided by Styron *et al.* (2020). Some additional comments and references are provided in the description of case study earthquakes.

Note that all the maps in the followings using a Google™ Earth template have been realised by importing in Google™ Earth a .kml file exported from the MARCA-GEHN database: the left bottom legend is the original symbols legend of the database (thus, epicentres represented according to their magnitude, or MDPs in an intensity colour graded scale), additional graphic elements are listed in the top right legend.

This work has attempted to review the quality of the information for selected seismic events, in terms of their geographical location and the reliability of bibliographic sources. Efforts have also been made to check or assign an origin time, when not available, and/or to correct it, and the spelling of some localities associated with the earthquake. As previously stated, this work should be considered a first effort to standardise the information available and their bibliographic references for a limited set of seismic events, and to organise them into a publicly available macroseismic database that can be enriched, maintained, and updated on a regular basis by local and international efforts.

4.1. El Salvador

4.1.1. Introduction

El Salvador is the smallest country in Central America, with a total area of only 21,041 km²: it borders north and east with Honduras, west with Guatemala and south with the Pacific Ocean. Its territory is organised in 14 departments, 39 districts and 262 municipalities.

En particular, para el área estudiada se adopta la compilación proporcionada por Styron *et al.* (2020). Algunos comentarios y referencias adicionales se proporcionan en la descripción de los casos de estudio de los terremotos.

Téngase en cuenta que todos los mapas a continuación que utilizan una plantilla de Google™ Earth se han realizado importando en Google™ Earth un archivo .kml exportado desde la base de datos MARCA-GEHN: la leyenda inferior izquierda es la leyenda de símbolos originales de la base de datos (por lo tanto, los epicentros representados según su magnitud, o MDP en una escala graduada de color de intensidad), los elementos gráficos adicionales se enumeran en la leyenda superior derecha.

Este trabajo ha intentado revisar la calidad de la información para eventos sísmicos seleccionados, en términos de su ubicación geográfica y la confiabilidad de las fuentes bibliográficas. Además, se ha hecho un esfuerzo para verificar o asignar una hora origen cuando este dato no está disponible, y/o corregirla. También se ha corregido la ortografía de algunas localidades asociadas con el terremoto. Como se indicó anteriormente, este trabajo debe considerarse un primer esfuerzo para estandarizar la información disponible y las referencias bibliográficas para un conjunto limitado de eventos sísmicos, y para organizarlos en una base de datos macrosísmica disponible al público que pueda enriquecerse, mantenerse y actualizarse en una base de datos regular, por medio de esfuerzos locales e internacionales.

4.1. El Salvador

4.1.1. Introducción

El Salvador es el país más pequeño de América Central, que limita al norte y al este con Honduras, al oeste con Guatemala y al sur con el Océano Pacífico. Su territorio está organizado en 14 departamentos, 39 distritos y 262 municipios. Una guerra civil de 12 años, cuyo coste humano llegó aproximadamente a 75.000

A 12-year long civil war, with human costs approximately estimated at 75,000 lives, ended on 16 January 1992, when the government and the guerrillas signed a peace agreement that has led to military, social, and political reforms in the country. El Salvador has an estimated population (in 2019) of approximately 6.5 million inhabitants, of which 70.4% is concentrated in urban areas and the rest in rural areas; this results in an average population density of 310 inhabitants per km², making El Salvador the most densely populated country on the American continent, if we exclude some islands in the Caribbean Sea. Concerning the natural risks, El Salvador, for its geological nature and geographical location, is one of the most affected countries in the world by recurrent unfavourable natural phenomena. These facts, added to the high exposure due to the overpopulation, the lack of territorial planning and high physical and social vulnerability, have caused many material and human life losses [Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), 2017].

From a geodynamic point of view, El Salvador is located in the north of Central America, within the area of the Middle America Trench (TMA) referred to as the Chortis Block, specifically in the western active margin of the Caribbean plate. Its seismic activity is mainly due to the accommodation that occurs at the convergence between the Coco and Caribbean plates along the Pacific coast. The convergence is basically expressed by two processes: the subduction towards NE of the Coco plate under the Caribbean plate at an estimated velocity of 70-85 mm/yr (Staller *et al.*, 2016); the movement in NW direction parallel to the trench of the forearc block, at a rate of 10-15 mm/yr (Hernández-Moreno, 2011), as documented by the existence of tear faults in the conti-

vidas perdidas, finalizó el 16 de enero de 1992, cuando el gobierno y la guerrilla firmaron los acuerdos de paz que dieron lugar a reformas militares, sociales y políticas en el país. Con tan solo 21.041 km² de extensión territorial, El Salvador presenta una población en el 2019 de aproximadamente 6,5 millones de habitantes, de los cuales un 70,4% se concentra en área urbana y el resto en áreas rurales. Como consecuencia de lo anterior, resulta una densidad poblacional promedio de 310 habitantes por km², convirtiéndolo en el país más densamente poblado del continente americano, sin incluir algunas islas en el mar Caribe. Junto con esta sobrepoblación territorial, El Salvador es uno de los países del mundo con una recurrencia importante de afectación por procesos naturales, debido a su ubicación geográfica, lo cual, sumado a la falta de planificación territorial y alta vulnerabilidad tanto física como social, ha resultado en numerosas pérdidas materiales y de vidas humanas (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales - MARN, 2017).

Desde el punto de vista geodinámico, El Salvador se ubica al norte de Centroamérica, dentro de la zona de la Trincheras Mesoamericana (TMA) circunscrita en el Bloque de Chortis; específicamente en el margen activo occidental del noroeste de la placa de Caribe. Su actividad sísmica se enmarca principalmente por el acomodo que ocurre en la convergencia entre las placas del Coco y del Caribe a lo largo de la costa Pacífica. Esta actividad se manifiesta básicamente mediante dos procesos: la subducción hacia el noreste de la Placa del Coco bajo la Placa del Caribe a una velocidad estimada de 70-85 mm/año (Staller *et al.*, 2016); el movimiento en dirección noroeste paralelo a la trincheras del bloque antearco con una tasa de 10-15 mm/año (Hernández-Moreno, 2011). Como consecuencia de lo anterior, se evidencia la existencia de fallas de desgarre en el continente, alineadas con la cadena volcánica activa del país. A esta área de fallas activas, se le conoce como Zona

ment, aligned with the active volcanic chain of the country. This active fault system is known as the El Salvador Fault Zone (ZFES) (Martínez Díaz *et al.*, 2004), it has been considered capable of generating shallow earthquakes (<30 km depth), and responsible for major destruction originating nearby the urban areas (Alvarado *et al.*, 2011).

Therefore, most of the earthquakes affecting El Salvador (see Fig. 4.1) occur mainly along the offshore subduction zone, and along the volcanic arc that runs from Guatemala to Nicaragua. Other seismic areas that influence El Salvador are the approximately E-W oriented Motagua and Chixoy-Polochic fault systems in Guatemala, and the approximately N-S elongated Honduran depression, in the western part of Honduras.

A national seismic network, currently

de Falla de El Salvador (ZFES) (Martínez Díaz *et al.*, 2004), la cual tiene potencial de generar sismos superficiales (< 30 km), y ha sido responsable de la mayor destrucción causada por sismos corticales, al originarse cerca de las zonas urbanas (Alvarado *et al.*, 2011).

Por lo tanto, la mayoría de los sismos que afectan a El Salvador (Fig. 4.1) ocurren principalmente a lo largo de la zona de subducción y el arco volcánico, al igual que en la parte occidental de Guatemala y en la parte oriental de Nicaragua. Otras zonas que influyen sísmicamente en El Salvador son el sistema de fallas de Motagua y Chixoy-Polochic en Guatemala, y la depresión de Honduras, situada en la parte central del territorio hondureño.

Para realizar el monitoreo sísmico, se cuenta con la Red Sísmica Nacional, formada en la actualidad por un total de 80 estaciones sismo-

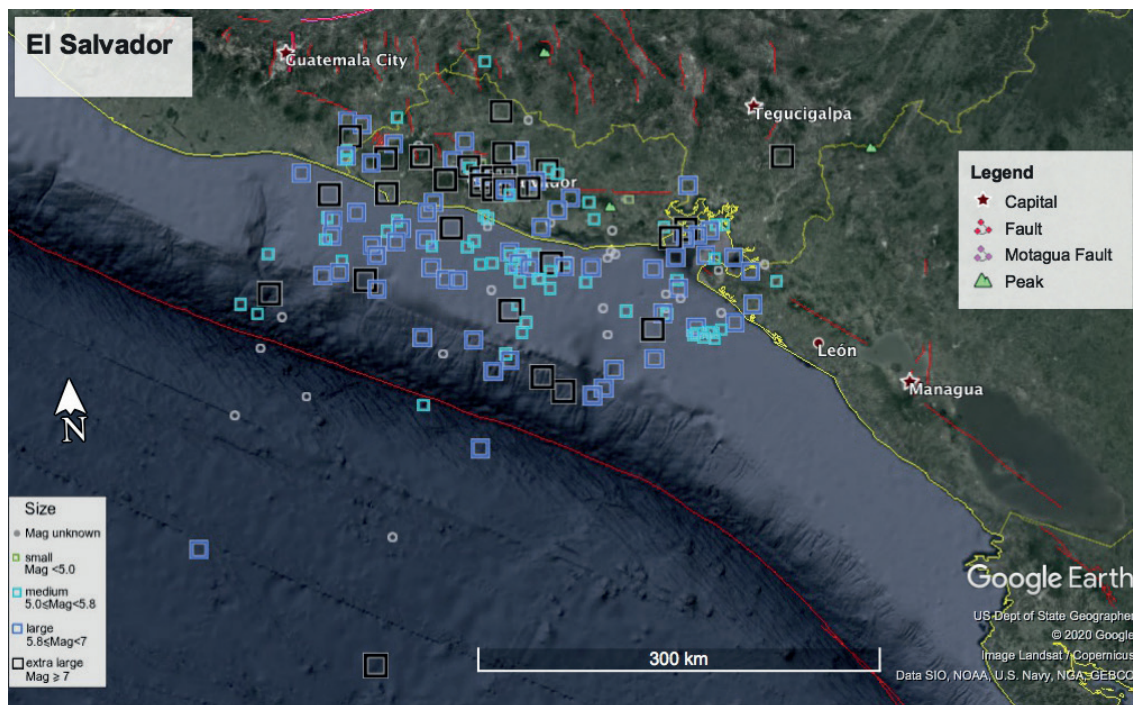


Fig. 4.1 – Epicentral map of the MARCA-GEHN earthquakes falling in an arbitrary polygon that surrounds the territory of El Salvador. The 162 extracted events are represented in Fig. 4.2

Fig. 4.1 - Mapa de epicentros de los terremotos MARCA-GEHN que caen en un polígono arbitrario que envuelve el territorio de El Salvador. La evolución temporal de las magnitudes de los 162 eventos extraídos se representa en la Fig. 4.2.

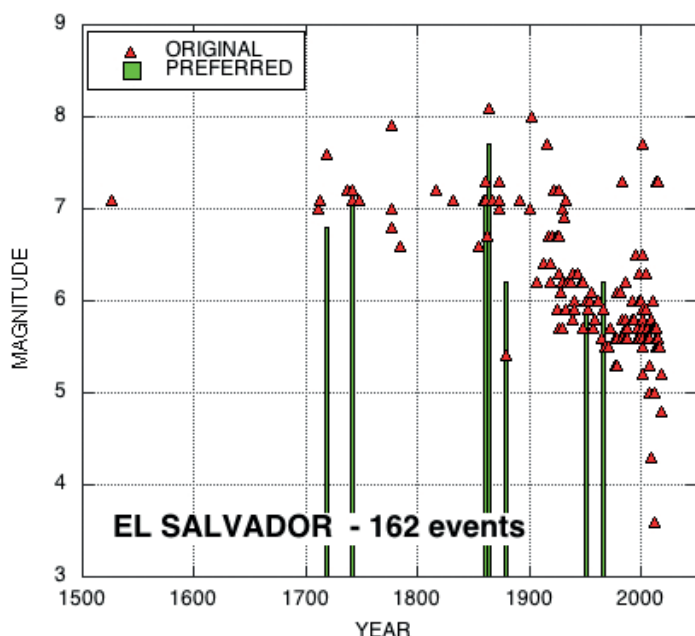


Fig. 4.2 - Graph of the magnitude versus time of the 162 events extracted from the MARCA-GEHN catalogue for the territory of El Salvador (see map in the previous figure). Note the decrease in minimum magnitude versus time, according to the completeness rules in the origin catalogue. Green bars indicate the events for which a different value of magnitude with respect to the origin catalogue is assigned (see Table 4.1).

Fig. 4.2 - Gráfico de la evolución temporal de magnitud de los 162 eventos extraídos del catálogo MARCA-GEHN para el territorio de El Salvador (ver mapa en la figura anterior). Se evidencia la disminución de la magnitud mínima frente al tiempo, de acuerdo con las reglas de completitud del catálogo original. Las barras verdes indican los eventos para los cuales se asigna un valor de magnitud diferente con respecto al catálogo de origen (ver Tab. 4.1).

equipped with 80 seismographic stations, carries out the seismic monitoring; they are about twice the number of stations existing in 2009, thus testifying to the consolidation of instrumental coverage and monitoring quality of the country. The improvements include the installation of 5 broadband seismometers, 10 digital accelerometers and 25 digital seismometers, as well as digital radios for the transmission of data to the seismic processing centre, located in the MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) headquarters. The El Salvador network cooperates with the seismic networks of Central America, and other countries in the world, in data exchange and in the standardisation of criteria for regional seismic hazard evaluation and mapping (<https://www.marn.gob.sv/sismologia/>).

4.1.2. Studied events

For El Salvador, we analysed 20 seismic events using macroseismic information (MDP set with more than 2 IDPs, Table 4.1), uploading about 589 intensity points within

gráficas (duplicada la cantidad de estaciones existentes en el año 2009), lo que significó un fortalecimiento revelador en cobertura y calidad del monitoreo sísmico del país. Dentro de estas mejoras destacan la instalación de 5 sismómetros de banda ancha, 10 acelerógrafos digitales y 25 sismómetros de periodo corto digitales, así como de radios digitales para la transmisión de datos hacia la central de procesamiento sísmico, ubicada en las oficinas centrales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Se coopera con las redes sísmicas de América Central y otros países en el mundo, en el intercambio de información y en la unificación de criterios para el desarrollo de mapas regionales de amenaza sísmica. (<https://www.marn.gob.sv/sismologia/>).

4.1.2. Eventos estudiados

Para El Salvador, analizamos 20 eventos sísmicos utilizando información macrosísmica (MDP configurado con más de 2 IDP, Tab. 4.1), cargando aproximadamente 589 IDP dentro de

Table 4.1 - List of MDPs entered in MARCA-GEHN for El Salvador. The earthquake parameters usually refer to the origin catalogue: if indicated in round brackets, the Date/Origin Time and Epicentral Area of the origin catalogue has been substituted by a new preferred one, based on the information gathered in this study by means of the IDPs, and by controls on existing literature; magnitude in brackets indicates that a new value is entered as an alternative, preferred parameter. Origin time in the catalogue is given in UTC; sometimes it is given in local time, to be more immediately related to the cited sources. The maximum intensity (*I_{max}*) is given in MM if not differently specified.

Tabla 4.1 - Lista de MDP ingresados en MARCA-GEHN para El Salvador. Los parámetros del terremoto generalmente se refieren al catálogo original, pero en algunos eventos la fecha, hora, magnitud y/o área epicentral han sido sustituidas por otras soluciones preferidas, en base a la información recopilada en este estudio por medio de los IDP, y por los controles de la literatura existente. En estos casos los datos del catálogo original se indican entre paréntesis. La hora origen en el catálogo siempre se proporciona en UTC, si bien en algunos eventos se especifica además la hora local, para facilitar la relación con las fuentes citadas. La intensidad máxima (*I_{max}*) se proporciona en MM si no se indica otra escala diferente.

N	EVENTID	Date	Origin Time	Epicentral Area	Mag	IDP Num	<i>I_{max}</i>	Reloc
1	1719.0305	1719-03-05	not given	(Ystepeque) San Vicente	(7.6) 6.8	10	VIII	Y
2	1742	1742	not given	(Tucuilula) Comasagua	(7.1) 7.2	5	VIII	Y
3	1748.0313	1748-03-13	not given	Olocuilta	7.1	6	VIII	N
4	1831.0207	1831-02-07	(not given) 13 local time 19 UTC	Jalpatagua	7.1	6	VII	N
5	1859.1208	(1859-12-08) 1859-12-09	(not given) 20:30 local time 2:30 UTC (+1d)	Ahuachapán and Santa Ana	(7.3) 7.1	41	VIII VII (TSU)	Y
6	1862.1219	(1862-12-19) 1862-12-20	(not given) 19:45 local time 1:45 UTC (+1d)	(Santa Ana) [Pacific Ocean]	(8.1) 7.7	80	VIII	Y
7	1878.1002	(1878-10-02) 1878-10-03	(18) 18:30 local time 0:30 UTC (+1d)	(El Salvador) Jucuapa-Chinameca	(5.4) 6.2	16	VIII	Y
8	913939	1915-09-07	01:20	(Chatalenango) Subducción Interfase	7.7	140	VIII	Y
9	903988	1936-12-20	(2:43:27) 20:41 local (-1d) 2:41 UTC	(Usulután) San Vicente	6.2	24	VIII	Y
10	894318	1951-05-06	23:03:35	(Usulután) Jucuapa-Chinameca	(0.0) 5.9	26	VIII (MCS)	Y
11	856602	1965-05-03	10:01:38	San Salvador	(5.9) 6.2	15	VIII	Y
12	597450	1982-06-19	06:21:58	[Pacific Ocean]	7.3	26	VII	Y
13	483349	1986-10-10	17:49:26	San Salvador	5.7	25	IX	Y
14	1763440	2001-01-13	17:33:32	[Pacific Ocean]	7.7	87	VIII - IX (ESI)	N
15	1780618	2001-02-13	14:22:08	Cuscatlán	6.5	42	VII - X (ESI)	N
16	603180818	2013-07-08	02:52:43	[Pacific Ocean]	5.7	31	VI (DYFI)	N
17	603839241	2013-12-13	04:45:09	[Pacific Ocean]	5.5	27	VI (DYFI)	N
18	610573069	2014-10-14	03:51:34	[Pacific Ocean]	7.3	102	VIII (DYFI)	N
19	610526199	2017-04-10	23:53:58	San Salvador	4.8	15	VII (DYFI)	Y
20	611622634	2018-01-03	13:38:40	[Pacific Ocean]	5.2	22	V (DYFI)	N

its territory, in the MARCA-GEHN archive.

Seven events, dated in the 18th and 19th centuries, are supported only by macroseismic observations derived from chronicles, documentary, and historical sources; the remaining 13 ones, occurred in the 20th and 21st centuries, namely corresponding to the instrumental period, but more or less reliable hypocentral solutions exist only for the most recent earthquakes. It is worth mentioning that since the 20th century local and foreign scientists have started to release detailed descriptions of the damaging events, reports on human losses, analyses of potential causative sources, and evaluations of the quality of the building stocks (usually poor, or very poor) existing at the time of the earthquake.

The collected events sometimes enabled us to track similarities, or to enhance differences among earthquakes. The earthquakes of 1965 and 1986, for example, have many characteristics in common: they likely both occurred at shallow depth, in the San Salvador area, and caused many casualties and heavy damage to the city (mainly houses and not very tall buildings), even if their magnitude was moderate ($M < 6.0$, on the Richter scale).

In the following, a brief description for each studied event (Tab. 4.1) is given.

The 1719 San Vicente earthquake

This earthquake is mentioned because it caused a strong impact on the colonial economy of indigo ink (since pre-Columbian times indigo was mainly used to dye textiles and ceramics; after the Spanish conquest it became an export product to Europe, see <http://repiica.iica.int/DOCS/B0363E/B0363E.PDF>) that was no longer produced, the population for a long time engaged in recovering and reconstruction. Thanks to the occurrence of foreshocks,

su territorio, en el archivo MARCA-GEHN. Siete eventos, fechados en los siglos XVIII y XIX, están respaldados únicamente por observaciones macrosísmicas derivadas de crónicas, documentales y fuentes históricas; los 13 restantes ocurrieron en los siglos XX y XXI, es decir, corresponden al período instrumental; pero solo para los terremotos más recientes, existen soluciones hipocentrales más o menos confiables. Vale la pena mencionar que desde el siglo XX, científicos locales y extranjeros han comenzado a publicar descripciones detalladas de los eventos dañinos, informes sobre pérdidas humanas, análisis de posibles fuentes causales y evaluaciones de la calidad de las edificaciones existentes (generalmente pobres o muy pobres), en el momento del terremoto. Los eventos recopilados a veces nos permitieron rastrear similitudes o resaltar las diferencias entre ellos. Los terremotos de 1965 y 1986, por ejemplo, tienen muchas características en común: ambos ocurrieron probablemente a poca profundidad, en el área de San Salvador, y causaron muchas víctimas y daños graves en la ciudad (principalmente casas y edificios no muy altos), incluso cuando su magnitud fue moderada ($M < 6.0$, en la escala de Richter).

A continuación, se presenta una relación de los eventos estudiados (Tab. 4.1), tras la cual se proporciona una breve descripción de cada uno de esos eventos.

El terremoto de San Vicente en 1719

Este sismo causó un fuerte impacto a la economía colonial, pues se dejó de producir la tinta de añil, debido a que los pobladores se dedicaron a reconstruir sus casas (PEMO999). En la época precolombina el añil era usado principalmente para teñir textiles y cerámica, y posterior a la conquista española se convirtió en un producto de exportación hacia Europa (<http://repiica.iica.int/DOCS/B0363E/B0363E.PDF>). Los mayores daños para este sismo se concentran en San Salvador y San Vicente. El catálogo

the population abandoned their homes before the main tremors, and only seven people died in San Salvador (PEMO999). The major damage refers to San Salvador and San Vicente. The reference catalogue GHEC refers the earthquake to Ystepeque (San Cayetano Istepeque) epicentral area, but this is not the correct toponym for the major effects: we, therefore, refer to it as the San Vicente 1719 earthquake. Three parametric solutions have been quoted in the global historical catalogue for this earthquake [Benito *et al.* (2012) in the followings BEal012; WHal004; Tanner and Shepherd (1997), here after TASH997]; they differ in location (offshore, subduction earthquakes in TASH997 and BEal012, onland for WHal004) and magnitude assigned (7.0-7.6). PEMO999, after a careful rereading of the primary sources [available in Lardé (1960)], are in favour of an offshore location of the epicentre, establishing that a subduction earthquake could be associated with a cortical fault, responsible for the damage distribution. The MDP set is derived from the recent paper from Canora *et al.* (2014) (referred in MARCA-GEHN as MG23) with 10 IDPs (Fig. 4.3). The authors, after an extensive collection of the available sources in literature, by means of paleoseismic trenches and by comparing the damaged areas of different recent events, are in favour for a crustal origin of this earthquake, similar in their opinion to the 13 February 2001 event (reported in this study too). They do not provide parametric values for this event, but suggest the activation of the San Vicente segment, with magnitude about 6.8, or greater. According to the results of the referenced study, the original parametric epicentre is kept as the MARCA-GEHN preferred solution, as it is barycentric to the maximum effects. The

de referencia GHEC se refiere al terremoto en el área epicentral de Ystepeque (San Cayetano Istepeque), pero este no es el topónimo correcto para los efectos principales, por lo que, nos referimos a él como el terremoto de San Vicente 1719. Debido a la ocurrencia de sismos precursores, la población salió de sus casas antes del temblor principal, causando solamente la muerte a siete personas en San Salvador (PEMO999).

Se han citado tres soluciones paramétricas en el catálogo histórico global GHEC para este terremoto (Benito *et al.*, 2012, citado como BEal012 en adelante; White *et al.*, 2004, citado como WHal004; Tanner y Shepherd, 1997, citado como TASH997). Estas soluciones difieren en su localización (costa afuera: terremotos de subducción en TASH997 y BEal012, y en tierra adentro en el caso de WHal004), junto con una magnitud asignada que varía de 7,0 a 7,6.

Por una parte, los autores PEMO999, después de haber hecho una relectura cuidadosa de las fuentes primarias (disponible en Lardé, 1960), están a favor de una ubicación del epicentro costa afuera, estableciendo que un terremoto de subducción podría inducir sísmicamente la activación de una falla cortical, responsable de la distribución del daño.

Por otra parte, el conjunto de MDP se deriva del artículo de Canora *et al.*, 2014 (referido en MARCA-GEHN como MG23) con un total de 10 IDP (Fig. 4.3). Los autores, después de una extensa recopilación de fuentes disponibles en la literatura, de datos obtenidos por medio de trincheras paleosísmicas y comparando las áreas dañadas de diferentes eventos recientes, están a favor de que el origen de este terremoto sea en la corteza; en su opinión, similar a lo que sucedido el 13 de febrero de 2001 (analizado también en este estudio). Los autores no proporcionan valores paramétricos para este evento, pero sugieren la activación del segmento de San Vicente, con una magnitud de aproximadamente 6,8 o mayor. Según los resultados del estudio de referencia, el epicentro paramétrico original



Fig. 4.3 - MDP set for the 5 March 1719 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue, that corresponds to the preferred solution in this study, derived from Canora *et al.* (2014): the magnitude assigned is lower than the origin catalogue, due to hypothesised surficial source. The coloured pins show alternative locations provided by the consulted sources.

Fig. 4.3 - Conjunto MDP para el terremoto del 5 de marzo de 1719. La estrella roja muestra la ubicación dada en el catálogo de origen, que corresponde a la solución preferida en este estudio, derivada de Canora *et al.*, 2014. La magnitud asignada es menor que la del catálogo original, debido a la hipotética fuente superficial. Los pines de colores muestran ubicaciones alternativas proporcionadas por otras fuentes consultadas.

magnitude is lowered from 7.6 to 6.8, considering the surficial hypothesised source and distance of maximum damage.

se mantiene en la solución preferida de MARCA-GEHN, ya que es baricéntrico a los efectos máximos. La magnitud se reduce de 7,6 a 6,8, considerando la fuente hipotética superficial y la distancia del daño máximo.

The 1742 Comasagua earthquake

El terremoto de Comasagua en 1742

According to GHEA, several earthquakes occurred along the subduction margin of the Pacific coast of Central America in the 18th century, and in particular in the period 1730-1760 (use the time slicer for this purpose available in the online database). Three events are referred to the year 1742, two of them without a date (namely the Comasagua event and the Tucuilula event, see <https://emidius.eu/GEH/map>.

Según el catálogo histórico global, varios terremotos ocurrieron a lo largo del margen de subducción de la costa del Pacífico de América Central en el siglo XVIII, y en particular en el período 1730-1760 (puede usar la herramienta de segmentación de tiempo disponible en la base de datos en línea). Se refieren tres eventos al año 1742, dos de ellos sin fecha (los eventos de Comasagua y de Tucuilula en GHEA, ver <https://emidius.eu/GEH/map.php>), y un terce-

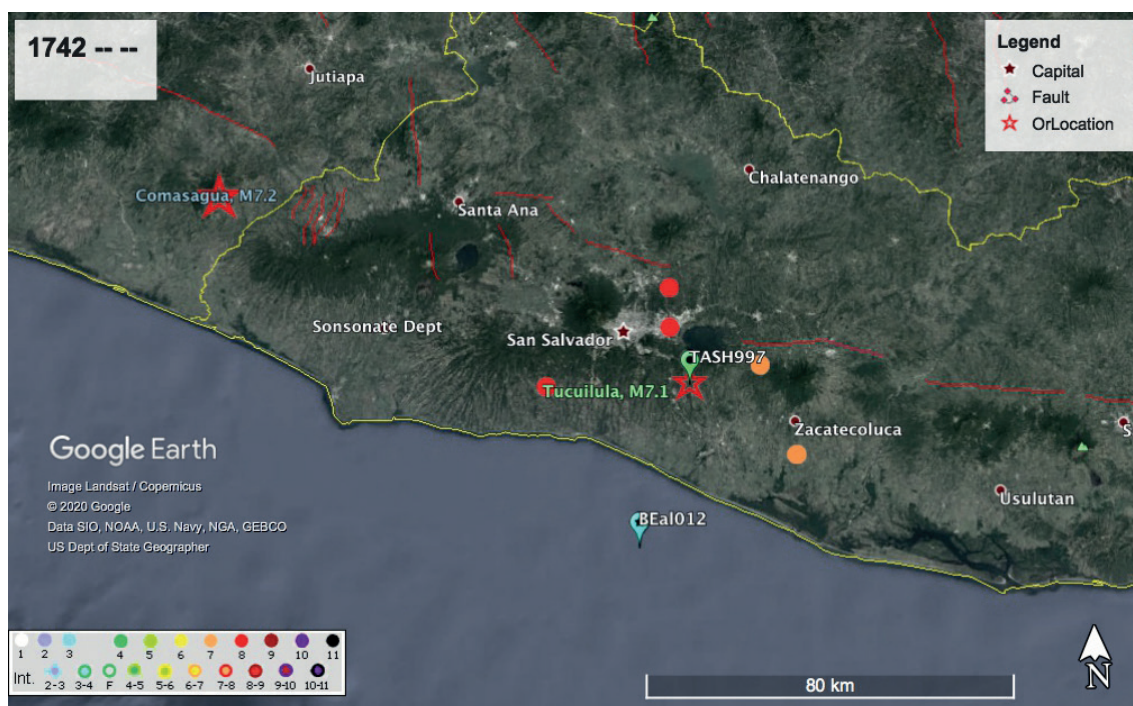


Fig. 4.4 - MDP set for the 1742 (unknown date) earthquake, according to WHal004. The red stars show the locations of two events that in the origin catalogue GHEC are referred to El Salvador; note the inverted names for epicentral localities (Tucuilula is a locality in Guatemala, Comasagua in El Salvador); the coloured pins show alternative locations provided by the sources.

Fig. 4.4 - Conjunto MDP para el terremoto de 1742 (fecha desconocida), de acuerdo con WHal004. Las estrellas rojas muestran las ubicaciones de dos eventos que en el catálogo de origen GHEC se refieren a El Salvador. Téngase en cuenta el error de las fuentes al invertir los nombres de las localidades epicentrales (Tucuilula es una localidad en Guatemala, Comasagua en El Salvador). Los pines de colores muestran otra localizaciones alternativas.

php) and one occurring in Guatemala on 10 August (described later on).

The available IDPs without a reference date, quoted by WHal004 (MG41) are 5 (Fig. 4.4); they are assigned to the epicentral location in El Salvador given by TASH997 for the Comasagua earthquake, and by WHal004 for the Tucuilula earthquake. Note the wrong name assigned to the epicentres, in the GHEC epicentral area, and the off-shore location proposed by BEal012. Given the limits of the available MDP set, we are in favour of a regional earthquake with subduction origin, thus the preferred location is taken as the one proposed by BEal012.

ro en Guatemala el 10 de agosto (descrito más adelante). Los IDP disponibles sin una fecha de referencia, citados por WHal004 (MG41) son 5 (Fig. 4.4) y corresponden a la ubicación epicentral en El Salvador dada por TASH997 para el terremoto de Comasagua y a la asignada por WHal004 para el terremoto de Tucuilula. Debe tenerse en cuenta la asignación incorrecta de localidades, en el área epicentral GHEC, y la ubicación costa afuera propuesta por BEal012.

Dada la limitación del conjunto de MDP disponible, estamos a favor de un terremoto regional con origen de subducción, por lo que la ubicación preferida se toma como la propuesta por Benito *et al.* (2012).

The 1748 Olocuilta earthquake

According to WHal004, this earthquake caused serious damage to most of the houses in the central part of the country, destroying the temples of Cojutepeque, Olocuilta, and the area of present-day Ciudad Delgado. PEMO999 find it strange that no damage is reported in San Salvador, despite being located relatively close to the places affected. The MDP set of this event (see Fig. 4.5) taken from WHal004 that cited it as a $M=7.1$ subduction earthquake, even if they located the epicentre onland (see <https://emidius.eu/GEH/info/?en=1748.0313000>), similarly to what was proposed by TASH997. Differently, the location proposed by BEal012 is offshore, at about 60 km depth, the magnitude value is the one previously assigned. The data set of this event is very

El terremoto de Olocuilta en 1748

De acuerdo a WHal004 este terremoto causó daños y destrucción a iglesias en algunos poblados de la zona central del país. A PEMO999 le parece extraño que no se reporten daños en San Salvador, a pesar de estar ubicado relativamente cerca de lugares que sí fueron afectados. El conjunto de MDP para este sismo (ver Fig. 4.5) corresponde a WHal004, quien considera que fue generado por una fuente de subducción, con una magnitud de 7,1, incluso si ubicaron el epicentro en tierra (ver <https://emidius.eu/GEH/info/?en=1748.0313000>), de manera similar a lo propuesto por Tanner y Shepherd, 1997. A diferencia de lo anterior, la ubicación propuesta por BEal012 es costa afuera, aproximadamente a 60 km de profundidad, con el mismo valor de magnitud asignado previamente. El conjunto de datos de este evento es muy limitado (6 IDP) y

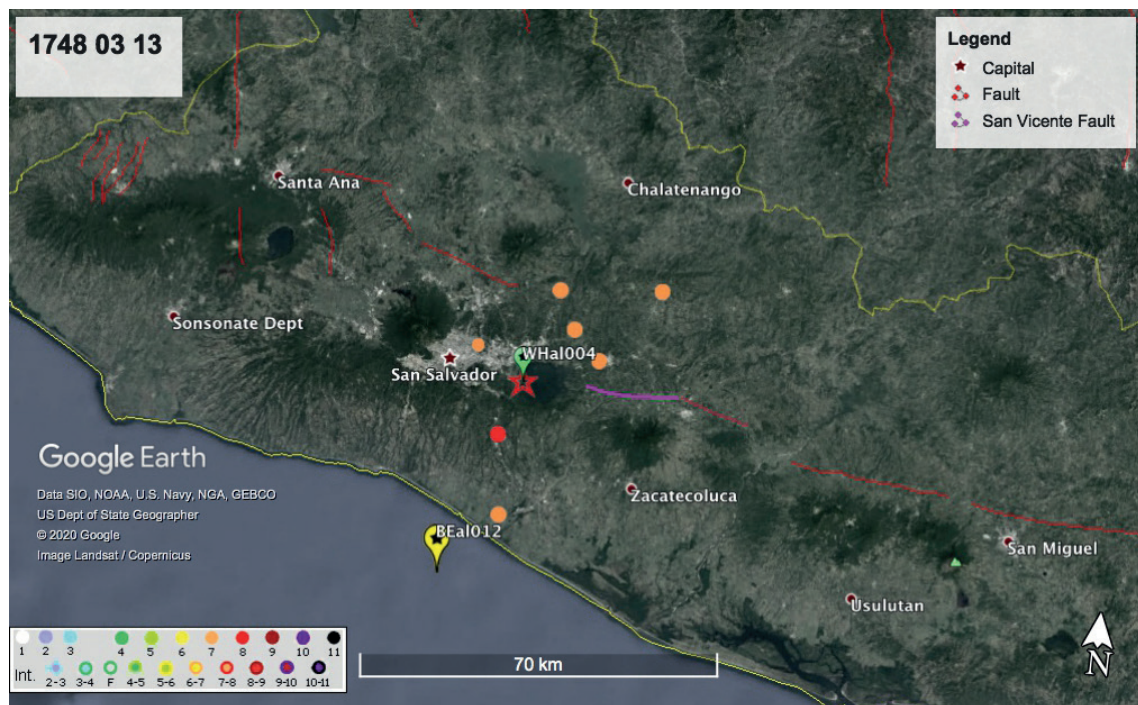


Fig. 4.5 - MDP set for the 1748 earthquake, according to WHal004. The red star shows the location according to the origin catalogue GHEC, the coloured pins show alternative locations provided by other sources.

Fig. 4.5 - Conjunto MDP para el terremoto de 1748, de acuerdo con WHal004. La estrella roja muestra la ubicación en el catálogo de origen GHEC, referida a El Salvador, los pines de colores muestran ubicaciones alternativas proporcionadas por otras fuentes.

limited (6 IDPs), and requires additional studies: we therefore keep the parameters originally assigned by GHEC.

The 1831 Jalpatagua earthquake

According to PEMO999, this earthquake occurred after the seismic events associated with the Jalpatagua fault in Guatemala, in May 1830, thus inheriting its epicentral area name; they lower from VII to VI the intensity values assigned to Jalpatagua and San Salvador, with respect to the previous studies (e.g. White and Cifuentes, 1988), considering the increase of buildings vulnerability due to the 1830 seismic sequence. Given the geographical distribution of damages, spread over quite a large area, the authors propose the source of this earthquake within the subduction zone: the same location offshore

requiere estudios adicionales. Por lo tanto, mantenemos los parámetros asignados originalmente por GHEC.

El terremoto de Jalpatagua en 1831

De acuerdo a PEMO999, este terremoto se dispara después de los eventos sísmicos asociados a la falla de Jalpatagua en Guatemala, en mayo de 1830. Los autores bajan los valores de intensidad asignados a Jalpatagua y San Salvador por White y Cifuentes (1988), de VII a VI considerando el aumento de la vulnerabilidad de los edificios debido a la secuencia sísmica de 1830. Dada la distribución geográfica de los daños, en un área bastante grande, los autores proponen la zona de subducción como fuente de este sismo. La localización costa afuera también es presentada por BEal012. Por el contrario, WHal004 registra el evento tierra adentro,



Fig. 4.6 - MDP set for the 7 February 1831 earthquake according to WHal004. The red star shows the location of the origin catalogue, the coloured pins show alternative locations provided by the consulted sources.

Fig. 4.6 - Conjunto MDP para el terremoto del 7 febrero de 1831, de acuerdo con WHal004. La estrella roja muestra la ubicación en el catálogo de origen, los pines de colores muestran ubicaciones alternativas proporcionadas por otras fuentes.

has been taken by BEal012. Conversely, WHal004 assign the event inland, using macroseismic data, however they consider it as a subduction earthquake. In bibliographic sources cited in PEMO999, they report that at one o'clock in the afternoon there was a strong earthquake in El Salvador, which caused notable damage in the capital and many towns on the southern coast. We adopted the most recent study (WHal004) to compile an MDP set and retain the parametric solution provided in the origin catalogue (see Fig. 4.6), modifying only the origin time. Similar to the previous event, additional search is needed to support the alternative hypothesis of an offshore source.

The 1859 and 1862 earthquakes

Several strong earthquakes struck the Pacific coast of Central America in the mid-19th century (use the time slicer or the tool for drawing a selection area available in the online database). We added two earthquakes of this sequence to the case studies during the very final preparation of this work, considering their relevance in terms of magnitude assigned for offshore events. They allow us to compare the damage distribution of historical events with probable subduction origin with the ones that have been recorded recently, and that are provided by fairly well constrained locations. For these reasons, additional comments will be given in the special cases chapter 4.1.3.2 dedicated to tsunamigenic events.

According to WHal004, the 9 December 1859 earthquake caused destruction in western El Salvador and eastern Guatemala. The shaking was estimated longer than a minute, and aftershocks lasted for one week: this is the very first earthquake associated with a tsunami report. WHal004 correlates this earthquake to the subduction thrust-rupture-zone, but provides some intensi-

utilizando los datos macrosísmicos, sin embargo lo considera como un sismo de subducción. En fuentes bibliográficas citadas en PEMO999, reportan que a la una de la tarde hubo un gran terremoto en El Salvador, que causó notables estragos en la capital y muchas poblaciones de la costa sur.

Adoptamos el estudio más reciente (WHal004) para compilar un conjunto de datos macrosísmicos y retener la solución paramétrica proporcionada en el catálogo original (ver Fig. 4.6) modificando solo la hora origen. De manera similar al evento anterior, se necesita una búsqueda adicional para respaldar la hipótesis alternativa de una fuente costa afuera.

Los sismos de 1859 y 1862

Varios terremotos fuertes azotaron la costa del Pacífico de América Central a mediados del siglo XIX (disponible en la base de datos en línea la herramienta de segmentación de tiempo para dibujar un área de selección). Agregamos dos terremotos de esta secuencia a los estudios de caso durante la preparación final de este trabajo, considerando su relevancia en términos de magnitud y asignación de ubicación para eventos costa afuera. Nos permiten comparar la distribución de daños de eventos históricos con probable origen de subducción con los que se han registrado recientemente y que se proporcionan en ubicaciones bastante bien restringidas. Por estas razones, comentarios adicionales se darán en el capítulo 4.1.3.2 de casos especiales, junto con eventos más recientes.

Según WHal004, el terremoto del 9 de diciembre de 1859 causó destrucción en el oeste de El Salvador y en el este de Guatemala. La sacudida se estimó por más de un minuto, y las réplicas duraron una semana, siendo este el primer terremoto asociado con un informe de tsunami. WHal004 correlaciona este terremoto con un mecanismo de empuje o compresión en subducción, pero proporciona algunos datos de

ty data on large administrative areas only (Departamentos); for these reasons, we discarded the reference study selected by GHEC catalogue, and we did a search for more detailed descriptions.

Primary administrative sources (San Salvador Official Gazette 1859-1860) have been used to reconstruct the damage distribution by Lardé (1953) (quoted with reference code MG61 in the online archive) and Lardé (1960). 40 IDPs with intensity ranging from VIII to II-III MM have been identified (Fig. 4.7a). The geographical IDPs distribution highlights a large area of damage of about 6,400 km² (PEMO999), located mainly in the Salvadoran territory, in the Sonsonate department; the most damaged localities were Izalco, Sonsonate, Nahuizalco, and Juayúa.

For this earthquake, many interpretations about epicentral location and magnitude have been proposed. Lardé (1953) hypothesises an epicentre in the Apaneca-Lamatepeque Cordillera, north of the Department of Sonsonate; Leeds (1974) assigns a magnitude value between 7.0-7.7, with the epicentre located offshore, at intermediate depth; Sutch (1981) relates the earthquake with the most superficial part of the Benioff's zone; WHal004 propose a subduction earthquake with $M7.2$. Finally, PEMO999, according to the previously cited studies, and with White and Cifuentes (1988), localise the epicentre between the Middle America Trench and the continent, deriving a magnitude M_s 7.0-7.2, from the maximum intensities VII of the earthquake. We adopted their solution offshore, waiting for a more formal uniform recomputation based on the newly gathered IDPs.

Three years later, in December 1862, another strong earthquake occurred in a similar area. According to the reference historical catalogue GHEC, the earthquake of

intensidad solo para extensas áreas de acuerdo a la division politica (Departamentos); por estas razones, descartamos el estudio de referencia seleccionado por el catálogo GHEC e hicimos una búsqueda de descripciones más detalladas.

Las fuentes administrativas primarias (Gaceta Oficial de San Salvador 1859-1860) se han utilizado para reconstruir la distribución de daños por Lardé, 1953 (citado con el código de referencia MG61 en el archivo en línea) y Lardé, 1960. Se han identificado 40 IDP con una intensidad que va desde VIII a II-III MM (Fig. 4.7a). La distribución geográfica de los IDP destaca una gran área de daños de aproximadamente 6.400 km² (PEMO999), ubicada principalmente en el territorio salvadoreño, en el departamento de Sonsonate, siendo las localidades más dañadas Izalco, Sonsonate, Nahuizalco y Juayúa.

Para este terremoto, se han propuesto muchas interpretaciones sobre la ubicación y magnitud epicentral. Lardé (1953) plantea la hipótesis de un epicentro en la Cordillera Apaneca-Lamatepeque, al norte del Departamento de Sonsonate; Leeds (1974) asigna un valor de magnitud entre 7,0 y 7,7, con el epicentro ubicado costa afuera, a una profundidad intermedia; Sutch (1981) relaciona el terremoto con la parte más superficial de la zona de Benioff; WHal004 propone un terremoto de subducción con $M7.2$. Finalmente, PEMO999, según los estudios citados anteriormente, y con White y Cifuentes (1988), localizan el epicentro entre la Trinchera Mesoamericana y el continente, derivando una magnitud M_s 7,0-7,2, a partir de las intensidades máximas VII del terremoto. Adoptamos su solución costa afuera, esperando una recalificación uniforme más formal basada en los datos puntuales de intensidad recién reunidos.

Tres años después, en diciembre de 1862, se produjo otro fuerte terremoto en un área similar. Según el catálogo histórico de referencia GHEC, el terremoto del 19 de diciembre de 1862 es el evento más fuerte del área de estudio des-

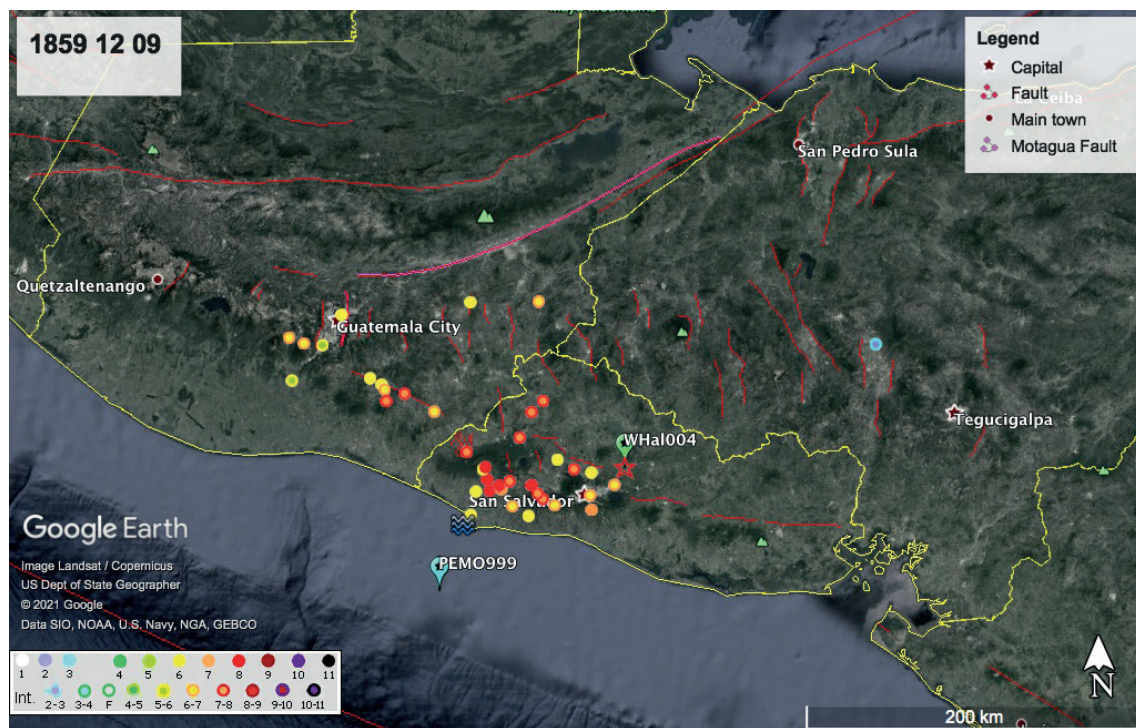
19 December 1862 is the strongest event of the study area since 1690; it caused serious damage in large areas of El Salvador and Guatemala. No origin time is available in GHEC, while Montessus de Ballore (1888) and lately Lardé (1953) report this quake at 7:45 p.m. local time, thus shifting the date to the following day, using UTC time. We adopt this new origin time, even if in the text the earthquake will be referred to the most commonly known date of 19 December. The shaking lasted about two minutes, while the aftershock sequence lasted until 24 January 1863. The quake occurred after an unusually high level of seismicity lasting about ten years, which affected both the subduction zone and the upper crust seismogenic areas (WHal004). PEMO999 in agreement with White and Cifuentes (1988) associate the event of 1862 with a subduction earthquake, and assign a magnitude of 8.0, based on the large VII degree isoseismal area. The seismic event affected the western part of El Salvador, with a concentration of damage in the Departments of Santa Ana, Ahuachapan, Sonsonate, La Libertad, and San Salvador. No information on the number of deaths was found.

The Guatemalan territory was also devastated by this earthquake. The Chimaltenango and Sololà Departments were the most heavily damaged, with maximum intensity of MM VIII assigned to Tecpan and Santa Catarina. In general, the Guatemalan damaged area results larger than the one referred to El Salvador. PEMO999 attribute the level of damage to an aftershock recorded on 20 December 1862, that according to these authors significantly increased the damage caused by the main event: they claim that there is a large uncertainty about this second earthquake, since the reference bibliography is not very precise in determining the essential parameters of this earthquake.

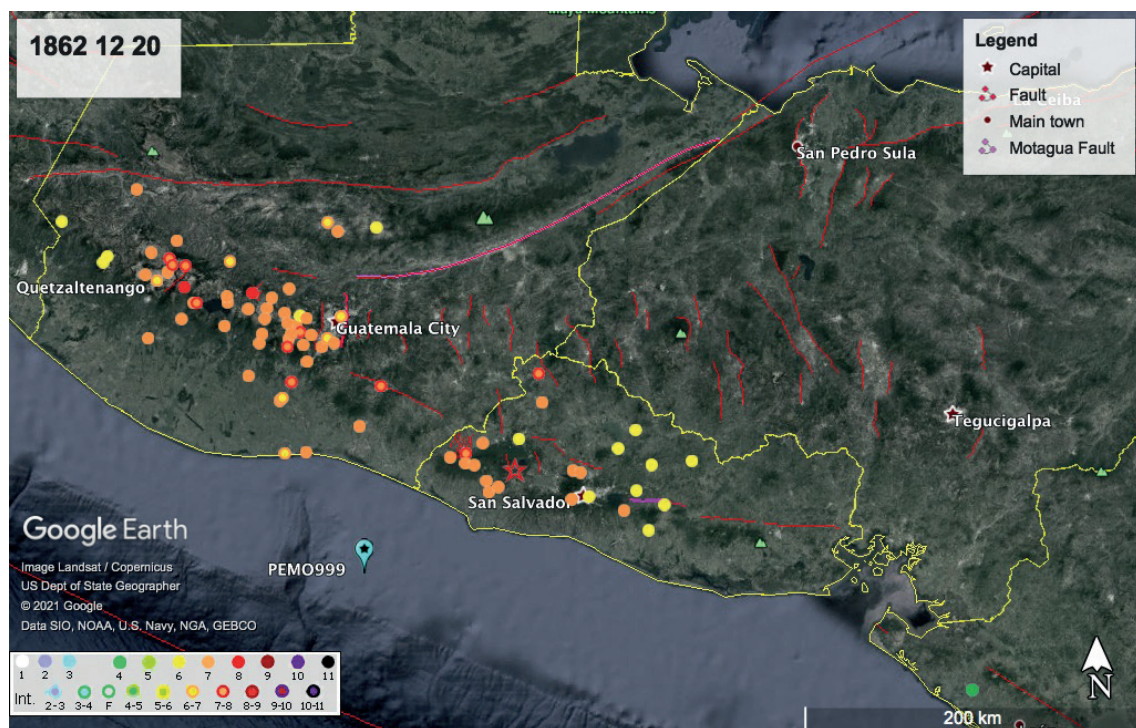
de 1690. Causó graves daños en grandes áreas de El Salvador y Guatemala. No se dispone de hora origen en GHEC, mientras que Montessus de Ballore (1888) y últimamente Lardé (1953) refieren este sismo a las 19:45 hora local, desplazando así la fecha al día siguiente, utilizando la hora UTC. Adoptamos este nuevo tiempo origen, incluso cuando en el texto el terremoto se refiera a la fecha más conocida, el 19 de diciembre. El temblor duró aproximadamente dos minutos, mientras que la secuencia de réplicas se prolongó hasta el 24 de enero de 1863. El terremoto ocurrió después de un nivel inusualmente alto de sismicidad que duró aproximadamente diez años, y que afectó tanto a la zona de subducción como a las áreas seismogénicas de la corteza superior (WHal004). PEMO999, de acuerdo con White y Cifuentes (1988), asocian el evento de 1862 con un terremoto de subducción, y asignan una magnitud de 8,0, en función del área delimitada por la isosista de intensidad VII. El evento sísmico afectó la parte occidental de El Salvador, con una concentración de daños en los departamentos de Santa Ana, Ahuachapán, Sonsonate, La Libertad y San Salvador. No se encontró información sobre el número de muertes.

El territorio guatemalteco también fue devastado por este terremoto. Los departamentos de Chimaltenango y Sololà fueron los más dañados, con una intensidad máxima de MM VIII asignada a Tecpan y Santa Catarina. En general, el área dañada de Guatemala resulta más grande que la referida a El Salvador. PEMO999 atribuyen el nivel de daño a una “réplica” registrada el 20 de diciembre de 1862, que según estos autores, aumentó significativamente el daño causado por el evento “principal”, afirmando que existe una gran incertidumbre sobre este segundo terremoto, ya que la bibliografía de referencia no es muy precisa para determinar los parámetros esenciales de este terremoto.

Por lo tanto, el conjunto de MDP podría ser, especialmente para Guatemala, la solución re-



a)



b)

Fig. 4.7 - MDP sets for the a) 1859 and b) 1962 earthquakes: the preferred epicentral location is taken from PEMO99 in both cases.

Fig. 4.7 - Conjunto MDP para los terremotos de a) 1859 y b) 1862: la ubicación epicentral preferida se toma como PEMO99 en ambos casos.

Therefore, the MDP set, especially for Guatemala, could be the result of at least the two major seismic events, with intensities that thus represent the cumulative damage, not infrequent in the historical reports. Based mainly on PEMO999 data (the map on their page 260, not the coordinates provided in the text), checked and integrated with other sources (MG61), a total of 80 IDPs have been geo-referenced and uploaded to the archive (Fig. 4.7b). The preferred epicentral solution is moved offshore, the assigned magnitude decreased to 7.7, considering the cumulative effects previously mentioned.

Other details about these earthquakes will be given in chapter 4.1.3.2.

The 1878 Jucuapa-Chinameca earthquake

This event is not reported in the global GHEC historical catalogue, as it is below its magnitude threshold; it has been chosen as it is the first well documented event in the south-eastern part of the country. The original parameters of the catalogue have been taken from PEMO999, fixing a probable mistype in the coordinates of this source (on page 278, the annotation degree.decimal is meant to be degree.minute).

According to Lardé (1960), lately emphasised in PEMO999, this event occurred on 2 October, at 6:30 p.m. local time (note the change of date with respect to PEMO999, due to the conversion to UTC, in Tab. 4.1). The shakings lasted more than 30 s, in the town of Jucuapa there was major damage and more than 30 deaths, and in Chinameca countless damages and victims. The IDPs derive from Lardé (1952) (quoted as MG24 in the online catalogue) and Meyer-Abich (1952) (quoted as MG13); intensity values have been re-evaluated according to the descriptions. Given the geographical distribution of the IDPs (16), it is probable that this earthquake occurred on

sultante al menos para los dos eventos principales, con intensidades que representan la acumulación de daños, lo que es frecuente en los informes históricos. Basándonos principalmente en datos de PEMO999 (en el mapa de ubicación de la página 260), verificados e integrados con otras fuentes (MG61), se han georreferenciado un total de 80 datos puntuales de intensidad, que han sido cargados en el archivo (Fig. 4.7b). La solución epicentral preferida se traslada a la costa y la magnitud asignada disminuyó a 7,7, considerando los efectos acumulativos mencionados anteriormente. Otros detalles sobre estos terremotos se darán en el Capítulo 4.1.3.2.

El terremoto de Jucuapa-Chinameca en 1878

Este evento no se reporta en el catálogo histórico global GHEC, ya que está por debajo de su umbral de magnitud, pero se ha estudiado por ser el primer evento bien documentado en la parte sureste del país. Las coordenadas “originales” y la magnitud del catálogo han sido tomadas de PEMO999, corrigiendo un probable error de escritura de esta fuente (en la página 278, la anotación grado.decimal debe ser grado.minuto). De acuerdo a Lardé, 1960 y corroborado en PEMO999, este evento ocurrió el día 2 de octubre, a las 18:30 hora local (téngase en cuenta el cambio de fecha respecto a PEMO999, debido a la conversión a UTC en la Tab. 4.1). La sacudida duró más de 30 s, produciendo grandes daños y más de 30 muertes en la localidad de Jucuapa, y daños incontables y víctimas en Chinameca. Los IDP se derivan de Lardé, 1952 (dado como MG24 en el catálogo en línea) y Meyer-Abich, 1952 (MG13). Los valores de intensidad se han reevaluado de acuerdo con las descripciones. Dada la distribución geográfica de los IDP (16) resulta probable que este sismo se produjera a raíz de un movimiento de falla geológica superficial, atribuyéndose una atenuación sísmica con la distancia más rápida res-

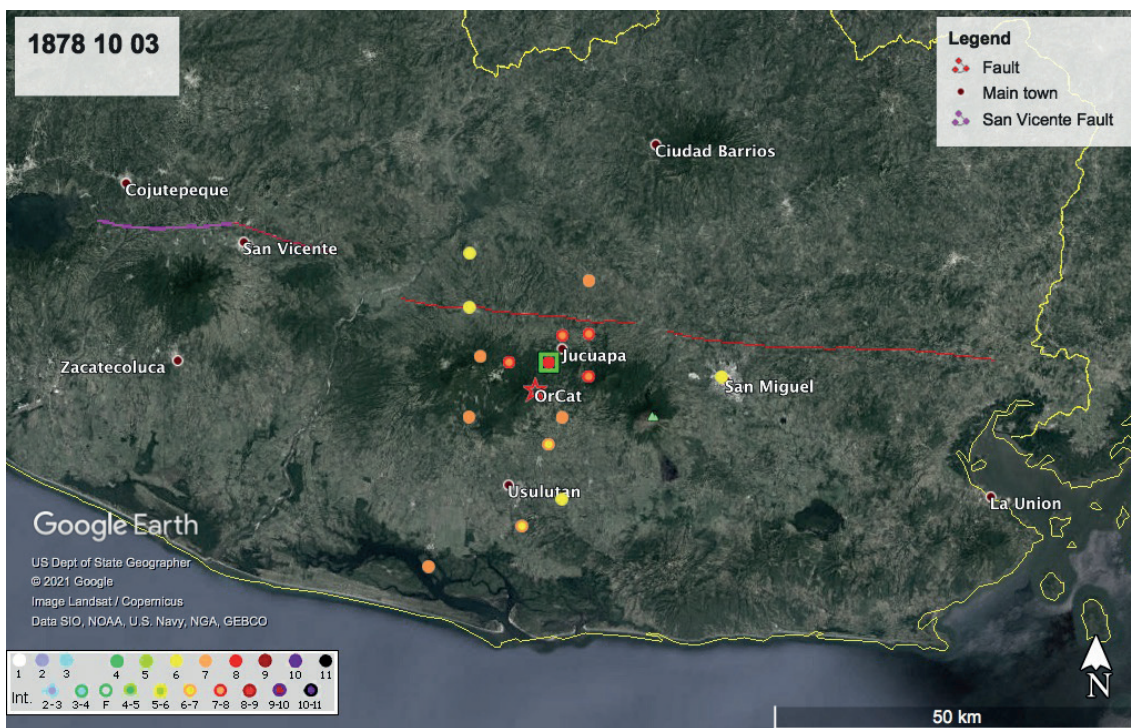


Fig. 4.8 - MDP set for the 3 October 1878 earthquake. The date has been modified to account for UTC timing. The red star shows the location of the origin catalogue, taken from PEMO999. The green square shows the preferred epicentre.

Fig. 4.8 - Conjunto MDP para el terremoto del 3 de octubre de 1878. La fecha se ha modificado para tener en cuenta el tiempo UTC. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen, tomado de PEMO999. El cuadrado verde muestra el epicentro preferido.

a shallow geological fault, thus explaining the faster seismic attenuation with distance than the one observed for subduction earthquakes. It could be assumed that this event has the same source as the earthquakes of May 1951 (described later on), as Mayer-Abich (1952) indicates in its report. He assumes that in this area there are dislocations in the NNW direction, namely to the west of Jucuapa. Also, the authors report that at the time of this earthquake, most homes in Jucuapa, and probably in the other villages, were buildings made from palm leaves. Similarly, it is reported that the earthquake did not cause any damage at all in San Miguel, somewhat justifying the movement of the N-S component of these faults. The preferred epicentre has been moved slightly

pecto a sismos de subducción, lo que se refleja en la afectación precisamente en zonas aledañas al epicentro. También se podría asumir que este evento presenta la misma fuente que los sismos de mayo de 1951 (los cuales se detallarán más adelante), tal como Mayer-Abich (1952) lo indica en su informe. El asume que en esta zona existen dislocaciones en dirección NNW, es decir, al poniente de Jucuapa. También, los autores informan que en el momento de este terremoto, la mayoría de las viviendas en Jucuapa, y probablemente en las otras aldeas, las edificaciones eran ranchos hechos de hojas de palmera. De igual manera, se informa que el terremoto no causó ningún daño en absoluto en San Miguel, justificando en cierta manera el movimiento de componente norte-sur de estas fallas. El epicentro preferido se ha movido ligeramente hacia la

toward the most damaged locality (see Fig. 4.8), the magnitude increased, considering the heaviest damage scenario with respect to the 1951 earthquake, described later on.

The 1915 Ahuachapan earthquake

According to contemporary sources, this earthquake caused destruction in western El Salvador and damage from central Guatemala to central El Salvador. According to Lardé (1916) (here after LARD916, given as MG38 in the online database) this earthquake occurred on 6 September 1915 at 7:20 p.m. local time. Concerning other sources, Ambraseys and Adams (1996) report the date of the seismic event to 7 September (thus correctly referring to the origin time in UTC system), and provide a fairly large macroseismic field, but focusing the description of the effects only in some locations. The authors mention a total number of 9 victims. Similarly, WHal004 reports areas with different intensity values distributed in El Salvador (VIII northern Sonsonate - probably mistyped in Soconusco by WHal004 -, VII western La Paz and San Vicente provinces) and Guatemala (VII eastern Escuintla). They mention that with the seismic event, an intense eruptive period of the Izalco volcano started, ending on 26 January 1916. According to LARD916, this event caused destruction in the town of Juayúa, Salcoatitán and southern Apaneca (west of El Salvador), however, it was also felt with less intensity in other places east of El Salvador.

The IDPs uploaded to MARCA-GEHN (140 localities) have been taken from the exhaustive and detailed work LARD916, who resorted to contemporary press sources too (e.g. La Prensa Gráfica). Intensities have been re-assigned by the authors of MARCA-GEHN, as the original intensity values were given in a modified version of the Mercalli

localidad más dañada (ver Fig. 4.8). Además, se ha aumentado la magnitud, teniendo en cuenta el escenario de daños más graves con respecto al terremoto de 1951.

El terremoto de Ahuachapán en 1915

Según fuentes contemporáneas, este terremoto causó destrucción en gran parte del oeste de El Salvador, y daños desde el centro de Guatemala hasta el centro de El Salvador. De acuerdo a Lardé, 1916 (LARD916, dado como MG38) este terremoto ocurrió el día 6 de septiembre de 1915 a las 19:20 hora local. Con respecto a otras fuentes, Ambraseys y Adams (1996) reportan la fecha del evento sísmico al 7 de septiembre (por lo tanto, se refieren a la hora origen en el sistema UTC), y proporcionan un campo macrosísmico bastante grande, pero centran la descripción de los efectos sólo en algunos lugares. Los autores mencionan un total de víctimas igual a 9. WHal004 reporta áreas con diferentes valores de intensidad distribuidos en El Salvador (VIII norte de Sonsonate - probablemente mal escrito en Soconusco por WHal004, VII oeste de las provincias de La Paz y San Vicente) y Guatemala (VII este de Escuintla). Mencionan que con el evento sísmico, comenzó un intenso período eruptivo del volcán Izalco, que terminó el 26 de enero de 1916. Según LARD916, este evento causó destrozos en la localidad de Juayúa, Salcoatitán y el Sur de Apaneca (al occidente de El Salvador). Sin embargo, también fue sentido con menor intensidad en otros lugares al oriente de El Salvador.

Los IDP cargados en MARCA-GEHN (140 localidades) han sido tomados del trabajo exhaustivo y detallado LARD916, que incluyó también datos desde periódicos locales (por ejemplo La Prensa Gráfica 1915). Los autores de MARCA-GEHN han reasignado las intensidades, ya que los valores de intensidad originales se dieron en la escala Modificada de Mercalli versión 1902 (articulada en 10 grados), las intensidades re-asignadas en la escala MM son

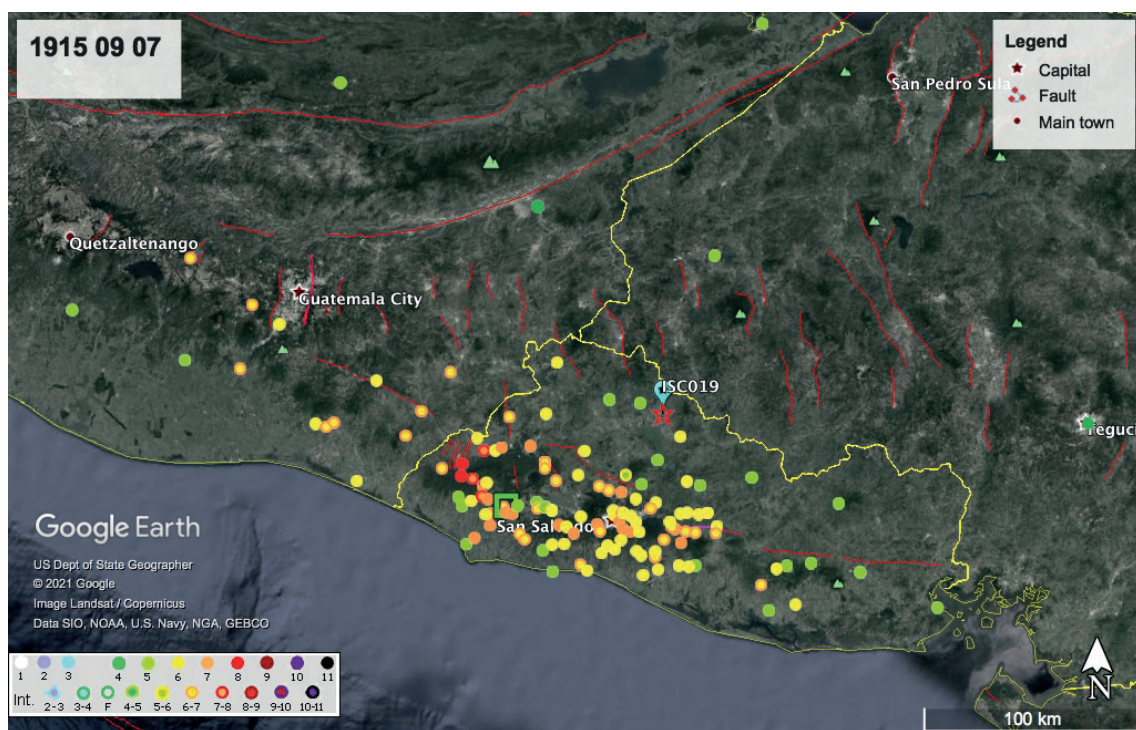


Fig. 4.9 - MDP set for the 7 September 1915 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue, taken from ISC019. The green square shows the preferred location, taken from WHal004.

Fig. 4.9 - Conjunto MDP para el terremoto del 7 de septiembre de 1915. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen, tomado de ISC019. El cuadrado verde muestra la ubicación preferida, tomada de WHal004.

1902 scale, that is articulated in 10 degrees; even if counterintuitive, the re-assigned intensities in MM scale are usually lower than the ones given by the previous scale, and simple conversion rules are not applicable [see on this topic Ferrari and Guidoboni (2000) and Musson *et al.* (2010)].

The instrumental location provided by the ISC019 catalogue (OrCat, given as a red star in Fig. 4.9) is very poor, and refer to a locality outside the most damaged area: it has been considered inadequate, given the local and regional tectonic configuration, and the distribution of macroseismic intensities. Ambraseys and Adams (1996) in their re-evaluation of a large-scale Central American earthquake, assigned the 1915 earthquake a depth of 60 km, a magnitude of 7.7 and an epicentre more in line with the

más bajas que las dadas por la escala anterior, donde las reglas de conversión simples no son aplicables (para más información consultar Ferrari y Guidoboni, 2000; Musson *et al.*, 2010).

La ubicación instrumental proporcionada por el catálogo ISC019 (OrCat, dada como una estrella roja en la Fig. 4.9) es muy pobre, y se refiere a una localidad fuera del área más afectada y se ha considerado inadecuada, dada la configuración tectónica local y regional, y la distribución de las intensidades macrosísmicas. Ambraseys y Adams (1996) en su trabajo de re-evaluación de sismos centroamericanos de gran magnitud, asignan al sismo de 1915 una profundidad de 60 km, una magnitud de 7,7 y un epicentro más acorde a la zona de daños. WHal004, adopta los resultados de AMAD996 para dicho sismo y considera que podría tratarse de un sismo de subducción ocurrido en la zona de inter-

damage area. For WHal004, according to AMAD996, the earthquake could be considered a subduction earthquake that occurred in the interface zone (similarly, they argue, to what occurred in 1862, at the border of El Salvador and Guatemala). They computed the focal mechanism for this event using the data of some pioneer teleseismic stations, finding that the most coherent solution suggests a thrust or interface mechanism dipping 55° NE, with a main plane parallel to the trench. The onshore epicentre they proposed is in agreement with the fact that no tsunami has been reported, despite the large coseismic displacement expected by a $M 7.7$.

We therefore adopt the location proposed by WHal004 as the preferred solution (green square, in Fig. 4.9). Further analyses are needed for this case.

The 1936 San Vicente earthquake

The San Vicente earthquake of 19 December 1936 (local time), was preceded by numerous foreshocks begun a month before, that presumably originated in the seismogenic zone located near Chichontepeque (Levin, 1940; Dewey *et al.*, 2004). Since 17 December, a series of strong and weak events were recorded by the San Salvador Seismological Observatory as well as by the Central-North America seismographic stations (Levin, 1940; Ambraseys and Adams, 2001). According to the press (Diario Latino), in the night between 18 and 19 December, more than 70 shocks were felt in San Vicente. Some of these were recorded with alarming intensity (San Juan Nonualco, Santo Domingo, Santa Clara) and/or with damage (Tecoluca, Apastepeque, Verapaz). On 19 December, at 2:43 p.m. local time, a shock occurred in the San Vicente area producing some damage to buildings. But

face (al igual que el ocurrido en el año de 1862, siempre en la zona fronteriza de El Salvador y Guatemala). Aunado a esto, WHal004 determinó el mecanismo focal de este evento utilizando estaciones telesísmicas y encontró que la solución más coherente era de un mecanismo de empuje (compresión) o inverso, buzando a 55° hacia el noreste, con un plano principal paralelo a la Trinchera Mesoamericana. El epicentro que propusieron está de acuerdo con el hecho de que no hay información de tsunamis, a pesar del gran desplazamiento coseísmico esperado por un sismo de $M 7.7$.

MARCA-GEHN considera la localización propuesta en WHal004 como la solución preferida (cuadrado verde, en Fig. 4.9). Sin embargo, también se podría considerar el escenario de un sismo intraplaca con una profundidad aproximada de 70 km (costa afuera) que no generase un tsunami. Se necesitan más análisis para este caso.

El terremoto de San Vicente en 1936

El terremoto de San Vicente del 19 de diciembre de 1936 (hora local), fue precedido por numerosos terremotos iniciados un mes antes, que se originaron presumiblemente en la zona sismogénica ubicada cerca de Chichontepeque (Levin, 1940; Dewey *et al.*, 2004). Desde el 17 de diciembre, una serie de eventos fuertes y débiles fueron registrados por el Observatorio Sismológico de San Salvador, así como por las estaciones sismográficas de América Central y del Norte (Levin, 1940; Ambraseys y Adams, 2001). Según el Diario Latino, en la noche del 18 al 19 de diciembre, se sintieron más de 70 sismos en San Vicente. Algunos de estos se sintieron con intensidad alarmante en algunas localidades (San Juan Nonualco, Santo Domingo, Santa Clara) y/o con daños graves en otras (Tecoluca, Apastepeque, Verapaz). El 19 de diciembre, a las 14:43 hora local, se produjo un sismo en el área de San Vicente que causó varios daños en los edificios. Pero el sismo principal ocurrió el

the main shock occurred on 19 December at 8:41 p.m. local time: it was felt throughout El Salvador, causing extensive damage at San Vicente, San Esteban, and Tecoluca. About 200 people were killed and 300 seriously injured. The MDP set uploaded in MARCA-GEHN lists the 24 locations around the city of San Vicente, as given by Levin (1940) (quoted as MG56). The damage distribution, in this case, can also be ascribed to the previous seismic activity that had weakened the buildings' resistance. Geological phenomena occurred abundantly throughout the epicentral area, especially cracks and landslides.

It is worth mentioning that there are some inconsistencies in UTC timing among sources that all refer to the original study by

19 de diciembre a las 20:41 hora local y se sintió en todo El Salvador, causando daños extensos, en San Vicente, San Esteban y Tecoluca. Cerca de 200 personas murieron y 300 resultaron heridas de gravedad. El conjunto de MDP cargado en MARCA-GEHN enumera las 24 ubicaciones alrededor de la ciudad de San Vicente, según lo descrito por Levin, 1940 (MG56). La distribución del daño, en este caso, puede atribuirse también a la actividad sísmica previa que debilitó las estructuras de los edificios. Los procesos geológicos ocurrieron abundantemente en toda el área epicentral, especialmente grietas y deslizamientos de tierra.

Vale la pena mencionar que algunas inconsistencias en el tiempo UTC persisten entre las fuentes que se refieren al estudio original de Levin, 1940, que establece que el 19 de diciem-



Fig. 4.10 - MDP set for the 20 December 1936 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019), the pale blue pins show alternative locations provided by other international agencies: the green square is the preferred epicentral location provided by Levin (1940).

Fig. 4.10 - Conjunto MDP para el terremoto del 20 de diciembre de 1936. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), los pines azul pálido muestran ubicaciones alternativas proporcionadas por otras agencias internacionales, el cuadrado verde es la ubicación epicentral preferuda, proporcionada por Levin (1940).

Levin (1940): it states that on 19 December, a foreshock at 2:43 p.m. followed by the main event at 8:41 p.m. are given according to local time, as recorded by the San Salvador Seismological Observatory, whose original data have been lost; the date of 20 December given by Ambraseys and Adams (2001) is correct for the main event when the time is referred to UTC, but the ISC019 catalogue assigns the phase readings to an origin time at 2:43:27 UTC, not 2:41 a.m. as it would have been by converting the 8:41 p.m. local time. The epicentral solution given by the origin catalogue (red star in Fig. 4.10) is about 20 km away from the most damaged area. A preferred epicentre is given in agreement with Levin's pioneering observations on directivity of the source. Bommer *et al.* (2002) underline the similarities of this event with the one occurring in February 2001. We hypothesise the Apastepeque fault (eastern segment aligned with the San Vicente fault, see 1719 event) is the source of this event.

The 1951 Jucuapa-Chinameca earthquake

Between 6 and 7 May 1951, three strong seismic events occurred near the towns of Jucuapa and Chinameca, about 95 km SE of the city of San Salvador; they roughly affected the same area hit by the 1878 event, described above. According to Meyer-Abich (1952) (the source used for the MDP set compilation, with reference code MG13), the earthquakes caused serious damage in the area around Jucuapa with more than 400 deaths, 1,100 injuries, and 25,000 left homeless (Fig. 4.11a).

The 1951 earthquakes had similar magnitude [M_s 5.9, 6.0 and 5.5: Ambraseys *et al.* (2001)]; two events occurred five minutes apart, and the third one 21 hours later: in the ISC supplementary material to ISC019 catalogue, taken as the original reference source,

se da un premonitor a las 14:43 seguido del evento principal a las 20:41 hora local, según lo registrado por el Observatorio Sismológico de San Salvador, cuyos datos originales se han perdido. La fecha del 20 de diciembre dada por Ambraseys y Adams (2001) es correcta para el evento principal cuando el tiempo se refiere a UTC, pero el catálogo ISC019 asigna las lecturas de fase a un tiempo origen a las 2:43:27 UTC, en lugar de 2:41 cómo habría sido al convertir la hora local 20:41. La solución epicentral dada por el catálogo original (estrella roja en la Fig. 4.10) está a unos 20 km del área más dañada. Se da un epicentro preferido de acuerdo con las observaciones pioneras de Levin sobre la directividad de la fuente. Bommer *et al.*, 2002 subrayan las similitudes de este evento con el ocurrido en febrero de 2001. Presumiblemente consideramos que la falla de Apastepeque (segmento oriental alineado con la falla de San Vicente, ver evento de 1719) es la fuente de este evento.

El terremoto de Jucuapa-Chinameca en 1951

Entre el 6 y el 7 de mayo de 1951 ocurrieron tres eventos sísmicos cerca de las localidades de Jucuapa y Chinameca, a unos 95 km al sureste de la ciudad de San Salvador y afectaron aproximadamente la misma zona que fue afectada por el terremoto de 1878, descrito anteriormente. Según Meyer-Abich, 1952 (la fuente utilizada para la compilación del conjunto MDP, con el código de referencia MG13), los terremotos causaron graves daños en Jucuapa y alrededores, con más de 400 muertos, 1.100 heridos y 25.000 sin hogar (Fig. 4.11a).

Los terremotos tuvieron una magnitud similar ($M_s=5,9, 6,0$ y $5,5$; Ambraseys *et al.*, 2001); dos eventos ocurrieron con cinco minutos de diferencia, y el tercero 21 horas después. En el material suplementario del ISC para el catálogo ISC019, tomado como fuente de referencia



a)



b)

Fig. 4.11 - Earthquakes in El Salvador of May 1951: a) selection of news from a local newspaper; b) MDP set for the 6 May 1951 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019), the green square is the location provided by Ambraseys *et al.* (2001). Note that several earthquakes occurred in two days: the MDP set has been assigned to the first major event located in El Salvador.

Fig. 4.11 - Terremotos en El Salvador de mayo de 1951. a) Selección de prensa de un diario local. b) Conjunto MDP para el terremoto del 6 de mayo de 1951. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), el cuadrado verde es la ubicación proporcionada por Ambraseys *et al.*, 2001. Téngase en cuenta que ocurrieron varios terremotos en dos días. El conjunto MDP se ha asignado al primer evento importante localizado en El Salvador.

these events are listed without a magnitude value: we arbitrarily assign the macroseismic data collected to the first event, geo-referenced to Usulután and occurring at 11:03 p.m. UTC, even if the effects are probably due to the cumulative occurrence of the sequence.

The depths, initially determined by ISC at 90-100 km, have been recalculated by Ambraseys *et al.* (2001): they obtained shallow foci (about at 7 km depth) that justify the small extension of the most damaged area, as observed by Mayer-Abich (1952). The areal distribution of the IDPs (26) is elongated in a predominantly N-S direction, similarly to what was observed for the event of October 1878: we can argue that the geological fault, or system of faults, involved so far could be the same as the past. In the survey of the area done after the 1951 earthquakes, Mayer-Abich (1952) refers to a dislocation to the NNW in the subsoil to the west of Jucuapa (observing a local sinking east of the fault plane, precisely where Chinameca is). This is compatible with the transcurrent mechanism obtained using the first polarity method by Bufo *et al.* (1997), and by Ambraseys *et al.* (2001) (although the ambiguity of the fault versus auxiliary plane does exist, the azimuth of 155° is similar to the NNW direction evidenced by Mayer-Abich).

The identified IDPs, the original and preferred epicentre of the 1951 earthquake, are shown in Fig. 4.11b. The higher intensities assigned during the “twin” 1878 event would urge the search for new documented sources, for an overall re-evaluation of the magnitude of past events.

The 3 May 1965 San Salvador earthquake

The main seismic event of 3 May 1965 was preceded by a seismic swarm that lasted 3 months. According to Rosenblueth and

“original”, estos eventos se enumeran sin un valor de magnitud, arbitrariamente asignamos los datos macrosísmicos recopilados al primero evento, georreferenciado a Usulután y ocurrió a las 23:03 UTC, incluso si los efectos probablemente se deban a la ocurrencia acumulativa de la secuencia.

Las profundidades, inicialmente determinadas por ISC a 90-100 km, han sido recalculadas por Ambraseys *et al.*, 2001, quienes obtuvieron focos someros (aproximadamente a 7 km de profundidad) que justifican la pequeña extensión del área más dañada, como lo observó Mayer-Abich (1952). La distribución por áreas de los IDP (26) se alarga en una dirección predominantemente NS, de manera similar a lo observado para el evento de octubre de 1878. Podemos argumentar que la falla geológica, o sistema de fallas, involucrado hasta ahora podría ser el mismo. En el estudio de reconocimiento realizado después de los terremotos de 1951, Meyer-Abich se refiere a una dislocación hacia el NNW en el subsuelo al oeste de Jucuapa (observando un hundimiento local al este del plano de falla, donde precisamente está Chinameca). Esto es compatible con el mecanismo transcurrente obtenido por Bufo *et al.*, 1997, y por Ambraseys *et al.*, 2001 (aunque existe la ambigüedad del plano de falla versus el plano auxiliar, el acimut de 155° es similar a la dirección NNW evidenciada por MG13).

Los IDP identificados, el epicentro original y preferido del terremoto de 1951 se muestran en la Fig. 4.11b. Las intensidades más altas observadas durante el evento “gemelo” de 1878 recomiendan la búsqueda de nuevas fuentes documentales, para la reevaluación de la magnitud asignada al evento pasado.

El terremoto del 3 de Mayo de 1965 en San Salvador

El terremoto del 3 de mayo de 1965 fue precedido por un enjambre sísmico que tuvo una duración de 3 meses. Según Rosenblueth y Prin-

Prince (1965), the main earthquake occurred at 4:01 a.m. local time, causing serious damage and the death of 127 people. The epicentre was located near the city of San Salvador at a distance of 10 km and the focus was shallow, approximately 8 km depth. The shallow depth can explain the severe ground motion in a small area (about 15 km radius) that includes the entire city of San Salvador and its surroundings. According to Lomnitz and Schulz (1966), there were at least six well located foreshocks aligned on a WNW direction; they provide an indication on the direction of the rupture mechanism. According to White *et al.* (1987), the roughly 8,000 unlocated foreshocks released more energy than the entire sequence of aftershocks.

Intensity data were provided from primary sources (MG4=Lomnitz and Schulz, 1966; MG14=Rosenblueth and Prince, 1965; MG15=Dengo *et al.*, 1965; MG16=Salazar *et al.*, 1998), consisting of scientific papers and technical reports with the highest quality scores. Macroseismic fields with isoseismals drawings are also available: these maps were also used to infer localities and to assign intensity values.

According to Rosenblueth and Prince (1965), the magnitude of the earthquake was 6.25 ($6^{1/4}$, as was common in the annotations of those years): in the MARCA-GEHN catalogue, the location given by ISC019 (red star in Fig. 4.12) puts the epicentre within Lake Ilopango; this location may not be very precise, and we acknowledge the poor quality of instrumental locations of that period. Other authors provided alternative locations that more closely match the distribution of IDPs, and the E-W strike of the geological faults located in the volcanic arc. The work of Buform *et al.* (1997), for example, provides the epicentre adopted from White and Harlow (1993), and presents a focal mech-

ce (1965), el sismo principal ocurrió a las 4:01 de la mañana (hora local), causando graves daños y la muerte de 127 personas. El epicentro se situó cerca de la ciudad de San Salvador a una distancia de 10 km y el foco a poca profundidad, aproximadamente de 8 km. La escasa profundidad del hipocentro se tradujo en un movimiento severo del suelo en un área reducida (15 km de radio), pero que incluyó toda la ciudad de San Salvador y sus alrededores. De acuerdo a Lomnitz y Schulz (1966), existieron al menos seis sismos premonitores que fueron bien localizados y que se encuentran alineados en la dirección WNW, lo cual ya proporciona un indicio de la dirección del mecanismo de ruptura del evento. De acuerdo a White *et al.* (1987), más de 8.000 premonitores no localizados liberaron más energía que toda la secuencia de réplicas.

Los datos de intensidad se proporcionaron a partir de fuentes primarias (MG4=Lomnitz y Schulz, 1966; MG14=Rosenblueth y Prince, 1965; MG15=Dengo *et al.*, 1965; MG16=Salazar *et al.*, 1998), que consisten en documentos científicos e informes técnicos con las puntuaciones de calidad más altas. También están disponibles los campos macrosísmicos con trazos de isosísmicos: estos mapas también se usaron para inferir las localidades y los valores de intensidad asignados. Según Rosenblueth y Prince (1965), la magnitud del sismo fue de 6.25 ($6^{1/4}$, como era común en las anotaciones de aquellos años). En el catálogo de MARCA-GEHN, la posición dada por el ISC019 (estrella roja en la Fig. 4.12) ubica el epicentro dentro de la caldera de Ilopango; esta ubicación puede no ser muy precisa, y reconocemos la mala calidad de las ubicaciones instrumentales de ese período. Otros autores proporcionaron ubicaciones alternativas que coinciden más estrechamente con la distribución de los IDP y las fallas geológicas con orientación E-W ubicadas en el arco volcánico. El trabajo de Buform *et al.* (1997), por ejemplo, proporciona el epicentro adoptado de White y Harlow (1993) y presenta un mecanis-

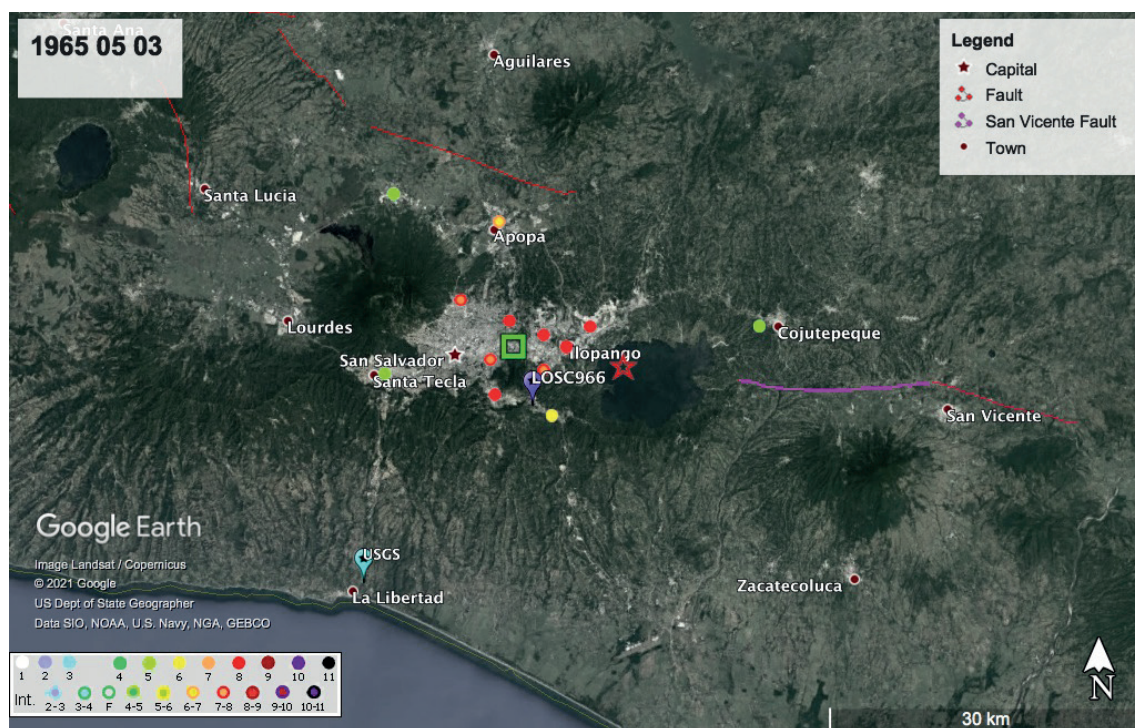


Fig. 4.12 - MDP set for the 3 May 1965 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019), the coloured pins show alternative locations provided by other sources, the preferred location is taken from Buforn *et al.* (1997).

Fig. 4.12 - Conjunto MDP para el terremoto del 3 de mayo de 1965. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), los pines de colores muestran ubicaciones alternativas proporcionadas por otras fuentes, la ubicación preferida se toma de Buforn *et al.*, 1997.

anism obtained from first arrival polarities, with strike-slip solution on almost vertical planes, with the orientation of the assumed main plane in the E-W direction (N195°). Also, the epicentre proposed by Lomnitz and Schulz (1966) should not be ruled out: it derives from the S-P arrival times of the aftershocks obtained from only two seismic stations; it is located SE of the San Jacinto hill, close to the towns of San Marcos and Santo Tomás; a lower value of intensity is assigned to the latter town, with respect to the other ones located northwards.

The preferred epicentre and magnitude in the online database are taken from Buforn *et al.* (1997).

mo focal tipo falla de desgarre obtenido de las polaridades de la onda P, con planos casi verticales, con orientación del plano principal asumido en dirección EW (195° de acimut). Por otra parte, el epicentro propuesto por Lomnitz y Schulz, 1966, no debe descartarse. Se deriva de los tiempos de llegada S-P de las réplicas obtenidas de solo dos estaciones sísmicas y se localiza al sureste del cerro San Jacinto, cerca de los pueblos de San Marcos y Santo Tomás; sin embargo se ha asignado un menor valor de intensidad a esta última ciudad, con respecto a las otras ubicadas hacia el norte.

El epicentro y magnitud preferidas se toman de Buforn *et al.* (1997).

The 19 June 1982 earthquake

On Saturday 19 June 1982, at 00:22 (local time), a strong earthquake was widely felt in Central America, and particularly in the national territory of El Salvador, abruptly awakening the vast majority of the population, causing general panic and alarm. According to international rescue organisations (<https://reliefweb.int/report/el-salvador/el-salvador-earthquake-jun-1982-undro-situation-reports-1-4>), 40 people died. There were an average of 5,000 people affected by this event [Ministerio de Obras Públicas (MOP), 1982]. According to MOP, 1982, the epicentre was located about 70 km SW of San Salvador, in the Pacific Ocean (Fig. 4.13). The focal depth was initially estimated at about 80 km depth, the magnitude given as high as M_s 7.0. Therefore, the event

El sismo del 19 de junio de 1982

El sábado 19 de junio de 1982, a las 00:22 (hora local), se sintió un fuerte terremoto en América Central, y particularmente en el territorio salvadoreño, que despertó abruptamente a la gran mayoría de la población, causando pánico y alarma. Según las organizaciones internacionales de rescate (<https://reliefweb.int/report/el-salvador/el-salvador-earthquake-jun-1982-undro-situation-reports-1-4>), 40 personas murieron. Hubo un promedio de 5.000 personas damnificadas por este evento (Ministerio de Obras Públicas MOP, 1982). Según MOP, 1982, el epicentro se localizó a unos 70 km al suroeste de San Salvador, en el Océano Pacífico (Fig. 4.13). La profundidad focal se estimó preliminarmente en aproximadamente 80 km y una magnitud M_s 7.0. Por lo tanto, el evento se clasificó como un terremoto de subducción intraplaca, interpreta-



Fig. 4.13 - MDP set for the 19 June 1982 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019), the preferred location is taken from MOP, 1982.

Fig. 4.13 - Conjunto MDP para el terremoto del 19 de junio de 1982. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), la ubicación preferida se toma de MOP, 1982.

was classified as an intraplate subduction earthquake, an interpretation supported by the normal type focal mechanism provided by USGS and other international agencies. According to AMAD996, the epicentre was near to the actual position given by ISC019, and M_s is set to 7.3.

The macroseismic data set is compiled mainly using a local source [MOP (1982 quoted as MG2)], integrated with scientific literature (AMAD996, quoted as MG17); other compilations have been confronted too (e.g. Salazar *et al.*, 1998). The maximum intensities of VII, on the MM scale, are spread over a large area in the south-western part of the Salvadoran territory.

As a preferred location, the one proposed by MOP, is retained.

The 10 October 1986 earthquake

The M_w 5.7 earthquake of 10 October 1986 occurred at 11:49 local time, within the San Salvador Metropolitan Area (AMSS), similarly to the earthquakes of May 1965 and April 2017. According to White *et al.* (1987), the epicentre was located in the southern part of the capital, at a focal depth of 7.3 km; more recently, Harlow *et al.* (1993) changed the location, moving it further southwards (see Fig. 4.14), with a depth of 10.9 km. Both locations are considered acceptable, according to the distribution of aftershocks and intensity data provided by local primary sources [e.g. MOP (1987); quoted as MG1], scientific work and technical reports with high-quality scores. Nonetheless, the instrumental location provided by ISC019 is considered unreliable, due to the station-to-target distribution, and, therefore, Orlat location given in the MARCA-GEHN archive must be discarded.

The event was well recorded by international networks and by instruments operated by the Centre for Geotechnical Research

ción respaldada por el mecanismo focal de tipo normal provisto por el USGS y otras agencias internacionales. Según AMAD996 el epicentro y la magnitud ($M_s=7,3$) son datos bastante similares a los de ISC019.

El conjunto de datos macrosísmicos se compila principalmente utilizando una fuente local (MG2=MOP, 1982), respaldada por literatura científica (MG17 = AMAD996). También se han llevado a cabo otras compilaciones (por ejemplo, Salazar *et al.*, 1998). Las intensidades máximas de VII, en la escala de Mercalli modificada, se extienden en área grande en la parte suroeste del territorio salvadoreño.

Como ubicación preferida, también se considera la propuesta por MOP, 1982.

El sismo del 10 de octubre de 1986

El terremoto de M_w 5,7, del 10 de octubre de 1986 ocurrió a las 11:49 hora local, dentro del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), al igual que el sismo de mayo de 1965 y de abril de 2017. De acuerdo a White *et al.*, 1987, el epicentro se ubica en la parte sur de la capital, y a una profundidad focal de 7,3 km. Más tarde Harlow *et al.* (1993) cambian la localización más al sur (ver Fig. 4.14), con una profundidad de 10.9 km. Ambas localizaciones se consideran aceptables, de acuerdo a la distribución de réplicas y a los datos de intensidad proporcionados por fuentes primarias (Ministerio de Obras Públicas MOP, 1987) que consisten en trabajos científicos e informes técnicos con puntajes de alta calidad. Sin embargo, la localización proporcionada por el ISC019 es considerada incongruente y por lo tanto debe ser descartada, la respectiva localización (Orlat) en el archivo de MARCA-GEHN.

El evento fue bien registrado por las redes internacionales y por los instrumentos operados por el Centro de Investigaciones Geotécnicas en San Salvador (Bommer y Ledbetter,

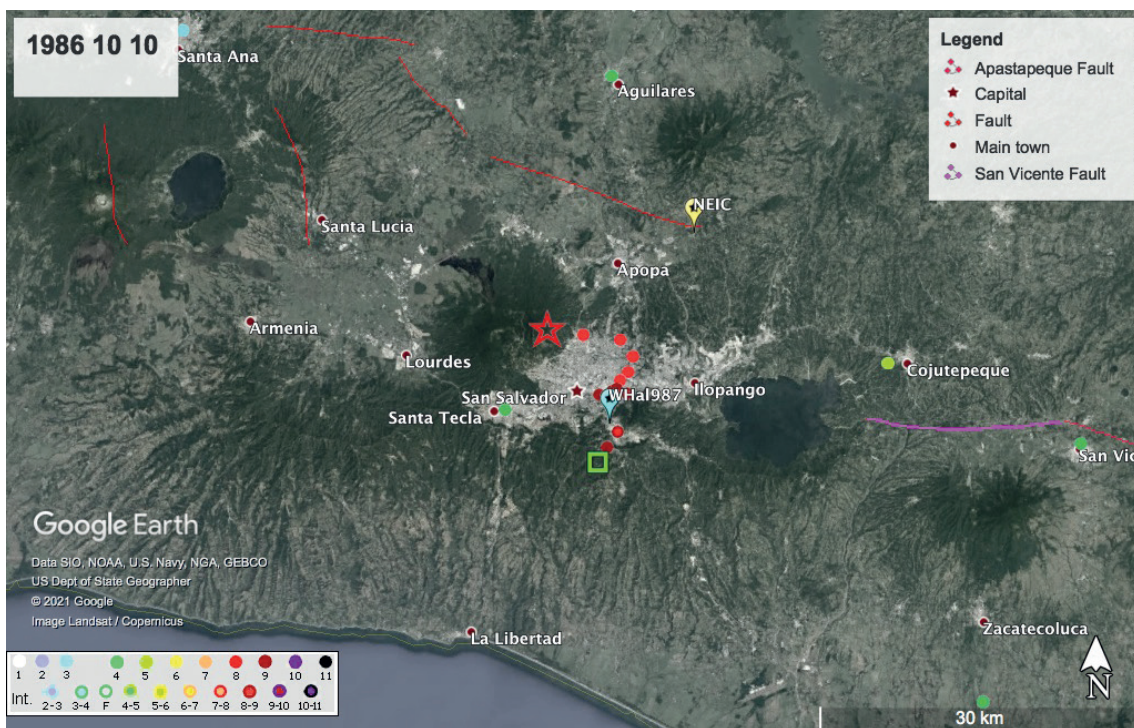


Fig. 4.14 - Detail of the MDP set for the 10 October 1986 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue ISC019, the green square the preferred solutions, taken from Harlow *et al.* (1993). The pale blue pin shows an alternative location provided by a previous study by White *et al.* (1987).

Fig. 4.14 - Detalle del Conjunto MDP para el terremoto del 10 de octubre de 1986. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen ISC019, el cuadrado verde las soluciones preferidas, tomadas de Harlow *et al.*, 1993. El pin azul pálido muestra una ubicación alternativa proporcionada por un estudio previo de White *et al.*, 1987.

in San Salvador [Bommer and Ledbetter (1987); given as MG19 in the database], but it occurred during the civil war. In addition, it was followed by many aftershocks, according to White *et al.* (1987), a strong one occurred 14 minutes after the main event. The depths of the aftershocks vary from 3 to 11 km. As mentioned before, the rupture mechanism of this event (similarly to the “twin” ones in 1878, 1951, and 2017) is related to the high coupling between the forearc block and the Caribbean plate. The geological fault tentatively assigned to this event is a left lateral, nearly vertical strike-slip fault, NNE-SSW oriented (Harlow *et al.*, 1993). According to White *et al.* (1987), this fault plane is chosen because of the distribution of the well locat-

1987 dado como MG19 en la base de datos), y se produjo durante la guerra civil. Además, tuvo muchas réplicas. Según White *et al.* (1987), ocurrió una primera réplica fuerte 14 minutos después del evento principal. Las profundidades de las réplicas varían de 3 a 11 km. Tal como se ha mencionado antes, el mecanismo de ruptura de este evento (similar a los de 1878, 1951 y 2017) obedece al alto acoplamiento existente entre el bloque de antearco y la placa del Caribe. La falla geológica asignada a este evento tentativamente es una falla de deslizamiento de desgarre lateral casi vertical, en dirección NNE-SSW (Harlow *et al.*, 1993). Según White *et al.* (1987), este plano de falla se elige debido a la distribución de las réplicas bien ubicadas ocurridas durante las

ed aftershocks that occurred during the first 24 hours (they are supposed to occur on the rupture plane of the main event), and considering the alignment of the highest damage in San Salvador. No direct evidence of surface rupture has been mapped.

According to MOP (1987), a total of 1,500 dead, 10,000 wounded, up to 200,000 affected people, some 60,000 houses destroyed or seriously damaged, and the almost total destruction of San Salvador, were

primeras 24 horas (se supone que ocurren en el plano de ruptura), y considerando la alineación de los daños más severos en San Salvador. No se observó evidencia directa de la falla en la superficie.

Según MOP, 1987, se contabilizaron un total de 1.500 muertos, 10.000 heridos, unos 200.000 damnificados, unas 60.000 viviendas destruidas o seriamente dañadas, y una destrucción casi total de San Salvador. Entre otras estadísticas, el 90% de la red de salud de la capital quedó



a)



b)



c)



d)

Fig. 4.15 - Damages owing to the 10 October 1986 earthquake in San Salvador [pictures taken from Decanini *et al.* (1988)]: a) Ruben Dario building, collapse detail; b) complete destruction of *façade* walls built with *bahareque* technique; c) Gran Hotel San Salvador, collapse detail; d) apartment building S. Francisco, collapse in lower stories.

Fig. 4.15 - Daños por el terremoto del 10 de octubre de 1986 en San Salvador (fotografías tomadas de Decanini *et al.*, 1988). a) Edificio Ruben Dario, detalle de colapso; b) destrucción completa de muros de *fachada* construidos con técnica de “bahareque”; c) Gran Hotel San Salvador, detalle de colapso; d) edificio de departamentos S. Francisco, derrumbe en pisos inferiores.

recorded. Among other statistics, 90% of the capital's health network was seriously damaged.

This event was the deadliest in El Salvador in the last centuries. Many buildings collapsed, (see Fig. 4.15) as they had not been repaired after the previous earthquakes (e.g. the 1965 one); many of the destroyed houses in the centre of San Salvador were made in adobe or poor materials (e.g. *bahareque*). The Rubén Darío building was an emblematic case: located in the historic centre of San Salvador, about 500 people died due its collapse; in this case, a well-known structural deficiency, called soft store, can be invoked, i.e. the lack of beams capable of diffusing and resisting the seismic loads. Despite the war conditions, some international teams (Anderson, 1987; Ledbetter and Bommer, 1987; Decanini *et al.*, 1988) conducted post-earthquake surveys on the structural collapses of the capital.

The 13 January
and 13 February 2001 earthquakes

Two devastating earthquakes struck El Salvador at the beginning of 2001, causing widespread damage and fatalities. According to Bommer *et al.* (2002), the 13 January 2001 event was the first devastating earthquake of the millennium for the small Central American country, and the fifth in 50 years: it occurred 40 km off the coast of El Salvador, in the seismically active area of subduction between the Coco and Caribbean plates, with a magnitude of M_w 7.7 and a focal depth of 60 km beneath the Pacific Ocean (Benito *et al.*, 2004). The seismic event was followed by numerous aftershocks, with the same tectonic origin (see the earthquakes with $M > 5$ reported in MARCA-GEHN catalogue, after the main event). One month later, on 13 February 2001, an M_w 6.6 earthquake occurred 30 km ESE of San Salvador,

seriamente dañada.

Este evento ha sido el más mortal en El Salvador en los últimos siglos. Adicionalmente, muchos edificios colapsaron (ver Fig. 4.15), ya que no fueron reparados por daños de sismos anteriores (p.e. sismo de 1965); además, muchas de las casas caídas en el centro de San Salvador eran de adobe y bahareque. Un caso emblemático, fue el edificio Rubén Darío (ubicado en el centro histórico de San Salvador) donde 500 personas fallecieron producto de su colapso; en este se pudo apreciar el defecto estructural llamado losa plana, es decir, ausencia de vigas para transmitir las cargas sísmicas. A pesar de las condiciones de la guerra civil, algunos equipos internacionales (Anderson, 1987; EEFIT, 1987; Decanini *et al.*, 1988) realizaron encuestas posteriores al terremoto en algunos colapsos estructurales.

Los sismos del 13 de enero
y 13 de febrero de 2001

Dos terremotos devastadores azotaron El Salvador a principios de 2001, causando daños generalizados y numerosas muertes. De acuerdo con Bommer *et al.* (2002), el 13 de enero de 2001 fue el primer terremoto devastador del milenio para el pequeño país centroamericano, y el quinto en 50 años. Ocurrió a 40 km de la costa oriental de El Salvador, en el área sísmicamente activa de subducción entre las placas del Coco y Caribe, con una magnitud de M_w 7.7 y una profundidad focal de 60 km debajo del Océano Pacífico (Benito *et al.*, 2004). El evento sísmico fue seguido por numerosas réplicas, con el mismo origen tectónico (ver los terremotos con $M > 5$ reportados en el catálogo MARCA-GEHN, después del evento principal). Un mes después, el 13 de febrero de 2001, un terremoto de M_w 6.6 ocurrió a 30 km al ESE de San Salvador, a una profundidad de entre 9 y 15 km, en el Arco

at a depth between 9-15 km, in the Central American volcanic arc, followed by numerous crustal aftershocks too (Bommer *et al.*, 2002; Benito *et al.*, 2004). Some authors hypothesised a static stress transfer activation mechanism, driven by the interaction of normal faults in the subduction zone of Central America towards the strike-slip faults in the volcanic arc of El Salvador (see Martínez-Díaz *et al.*, 2004 and references therein).

The earthquake of 13 January 2001 caused major damage in the departments of San Miguel, Santa Ana, La Libertad, La Paz, and San Salvador. The most heavily affected area was “Las Colinas” in the suburbs of Santa Tecla (Nueva San Salvador), where the earthquake triggered a landslide that covered an estimated 400 houses entirely in mud: more details on these phenomena will be given in chapter 4.1.3.1. The earthquake affected more than 1,3 million people, with 844 deaths (the majority of the casualties due to landslides), and 4,723 injuries.

While the first earthquake involved the whole national territory, the effects of the 13 February event were localised in a smaller area. The severe shaking and consequently very high damage were concentrated in the departments of La Paz, San Vicente, San Salvador, and Cuscatlán, causing 315 deaths and 3,400 injuries. The Department of Cuscatlán, which was moderately affected by the main event, experienced major destruction on 13 February. According to a report from the Centre for Geotechnical Research (CIG), the intensity for the city of San Salvador was VI (https://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/isosista_2001.htm), and the preliminary estimate for an area between Lake Ilopango and San Vicente gave a maximum intensity of VII-VIII. Based on field observations, Bommer *et al.* (2002), suggest that the intensity values were overestimated by the CIG and that

Volcánico Centroamericano, seguido de numerosas réplicas de origen cortical (Bommer *et al.*, 2002; Benito *et al.*, 2004). Algunos autores plantearon la hipótesis de un mecanismo de activación de transferencia de esfuerzos estático, impulsado por la interacción de fallas normales en la zona de subducción de América Central hacia las fallas de deslizamiento de desgarre en el arco volcánico de El Salvador (ver Martínez-Díaz *et al.*, 2004 y referencias al respecto).

El terremoto del 13 de enero de 2001 causó daños importantes en los departamentos de San Miguel, Santa Ana, La Libertad, La Paz y San Salvador. El área más afectada fue “Las Colinas” en los suburbios de Santa Tecla (Nueva San Salvador), donde el terremoto provocó un deslizamiento de ladera que cubrió aproximadamente 400 casas, completamente de lodo. Se darán más detalles sobre estos procesos en el capítulo 4.1.3.1. El terremoto afectó a más de 1.3 millones de personas, con 844 muertes (con la mayoría de las víctimas debido a deslizamientos de ladera) y 4.723 heridos.

Mientras que el primer terremoto involucró todo el territorio nacional, los efectos del 13 de febrero se localizaron en un área más pequeña. La sacudida severa y en consecuencia los daños muy altos se concentraron en los departamentos de La Paz, San Vicente, San Salvador y Cuscatlán, causando 315 muertes y 3.400 heridos. El Departamento de Cuscatlán que se vio afectado moderadamente por el evento principal experimentó una gran destrucción el 13 de febrero. Según reporte del Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG) la intensidad para la ciudad de San Salvador fue de VI (https://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/isosista_2001.htm), y preliminarmente para un área comprendida entre el lago de Ilopango y San Vicente la máxima intensidad fue de VII-VIII. Por su parte Bommer *et al.* (2002) sugiere con base en observaciones de campo, que los valores de intensidad fueron sobreestimados por el CIG y que la máxima intensidad para este terremoto no excede el grado VII.

the maximum intensity for this earthquake does not exceed VII.

The effects of this second earthquake were added to those already quantified for the 13 January earthquake, aggravating both the conditions of the people's life as well as the economic development of the country. In this regard, a critical aspect of the macroseismic intensity assessment is represented by the cumulative effects that occur when repeating earthquakes are close in time and space, leading to significant damage due to the decay of resistance properties of the building stock [on these topics, see for example Grimaz and Malisan (2017)]. In these cases, it is almost impossible to distinguish the effects of each individual shock on the territory within an overall picture. The final

Los efectos de este segundo terremoto se unen a los ya cuantificados por el terremoto del 13 de enero, agravando tanto las condiciones de vida de las personas como el desarrollo económico del país. En este sentido, un aspecto crítico de la evaluación de la intensidad macrosísmica está representado por la acumulación de los efectos que ocurren cuando los terremotos repetitivos suceden cercanos en el tiempo y el espacio, lo que lleva a daños significativos debido al deterioro de las propiedades de resistencia del material de construcción (ver por ejemplo sobre estos temas Grimaz y Malisan, 2017). En estos casos, es casi imposible distinguir los efectos de cada sacudida individual en el territorio dentro del panorama general. El escenario macrosísmico final se caracteriza por las llamadas intensidades acumulativas, que tienen en cuenta el



Fig. 4.16 - MDP set for the 13 January 2001 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue ISC019. Landslide symbols indicate the localities where intensities have been assigned using the ESI scale (further details in chapter 4.1.3.).

Fig. 4.16 - Conjunto MDP para el terremoto del 13 de enero de 2001. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen ISC019. Los símbolos de deslizamiento de ladera indican las localidades donde se han asignado intensidades utilizando la escala ESI (más detalles en el capítulo 4.1.3.).

macroseismic scenario is then characterised by the so-called cumulative intensities, which take into account the overall impact of the entire aftershocks sequence. In the case of the 2001 earthquakes, part of the epicentral area of the second main event is located in the VII degree area of the first one: we, therefore, acknowledge that some localities are characterised by cumulative damage effects that can lead to an overestimation of intensity data of at least one degree for some places.

In the aftermath of the 13 January earthquake, several teams of different institutions and universities, coming from many parts of the world, conducted a field investigation of the earthquake effects during the period of the two major events of the seismic se-

impact general de toda la secuencia de réplicas. En el caso de los terremotos de 2001, parte del área epicentral del segundo evento principal se encuentra en la isosista de grado VII del primero. Por lo tanto, reconocemos que algunas localidades se caracterizan por efectos de daño acumulativo que pueden conducir a una sobreestimación de los datos de intensidad de al menos un grado para algunos lugares. Después del terremoto del 13 de enero, varios equipos de diferentes instituciones y universidades, procedentes de muchas partes del mundo, proceden a una investigación de campo de los efectos del terremoto durante el período de los dos eventos principales de la secuencia sísmica. Se produjeron varios informes administrativos y técnicos, así como artículos científicos (Bommer *et al.*, 2001; Yoshimura y Kuroki, 2001; Rose *et al.*,

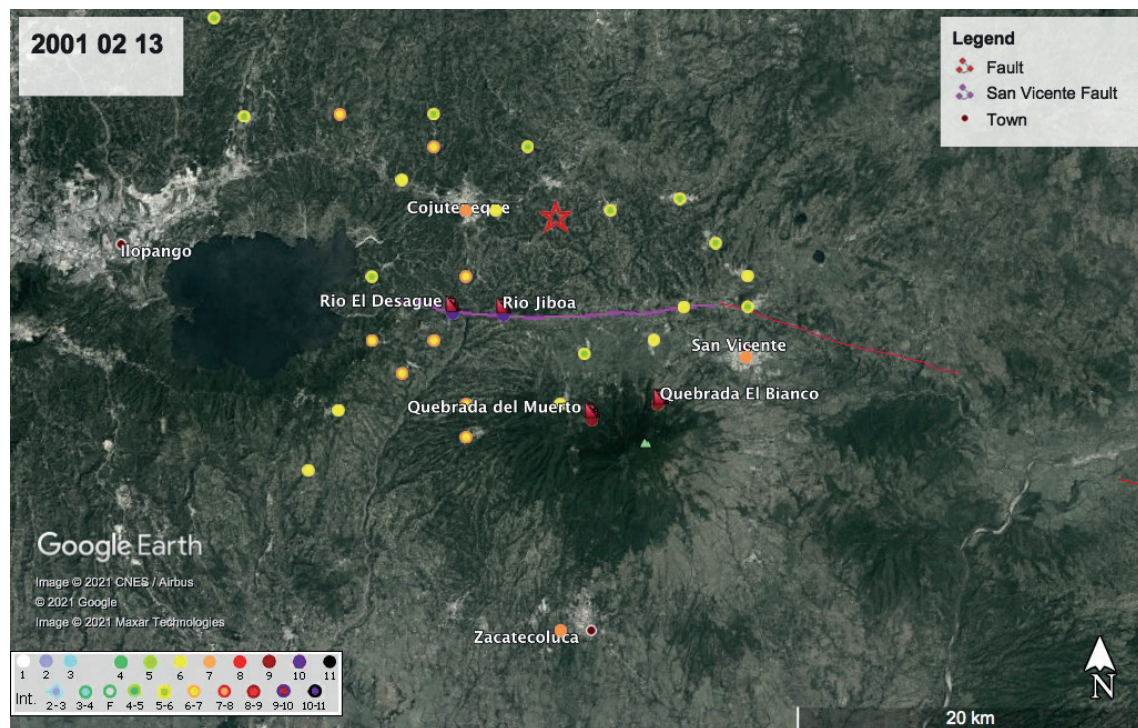


Fig. 4.17 - Detail of the MDP set for the 13 February 2001 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue ISC019. Landslide symbols indicate the localities where intensities have been assigned using the ESI scale (further details in chapter 4.1.3.).

Fig. 4.17 - Detalle del Conjunto MDP para el terremoto del 13 de febrero de 2001. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen ISC019. Los símbolos de deslizamiento de ladera indican las localidades donde se han asignado intensidades utilizando la escala ESI (más detalles en el capítulo 4.1.3.).

quence. A number of administrative and technical reports as well as scientific papers were produced (Bommer *et al.*, 2001; Yoshimura and Kuroki, 2001; Rose *et al.*, 2004 and their bibliography). The macroseismic data sets presented in Figs. 4.16 and 4.17 are derived entirely from two sources: MG53 = Japan Society of Civil Engineers, (2001) and MG54 = Quintero and Perez, (2001).

Given the limits already mentioned, the two earthquakes show significantly different damage patterns. Regarding the locations, the solutions listed by the origin catalogue (ISC019) are consistent with the distribution of IDP for each event.

Similarly to the 1719 event (Canora *et al.*, 2010, 2014), the earthquake of 13 February 2001 has been assigned to the San Vicente fault, with the displacement occurring at shallow depth. According to Cepeda *et al.* (2004) and Canora *et al.* (2010), the surficial rupture length of at least 21 km is in agreement with an M_w 6.5, as reported in the MARCA-GEHN catalogue.

The 14 October 2014 offshore earthquake

This earthquake occurred on 13 October 2014, at 9:51 p.m., the local date and time in El Salvador. Its epicentre was located in the Pacific Ocean, off the coast of the department of La Unión and the Gulf of Fonseca. According to both MARN and USGS seismic information, the $M_w=7.3$ event occurred approximately at a focal depth of 40 km. Likewise, the USGS determined the focal parameters of the event, resulting in a normal type mechanism. Focal mechanism solutions indicate that rupture occurred on either a steeply NE-dipping fault or on a fault dipping shallowly to the SW. The location, depth (40 km), and faulting mechanism of the earthquake are consistent with its occurrence either within the subducting oceanic Coco plate, rather than on the main

2004; y en la bibliografía de estos). Los conjuntos de datos macrosísmicos presentados en las Figs. 4.16 y 4.17 se derivan completamente de MG53 = Japan Society of Civil Engineers, 2001 y MG54 = Quintero y Perez, 2001. A pesar de las limitaciones ya mencionadas, los dos terremotos muestran patrones de daño significativamente diferentes. En cuanto a las ubicaciones, las soluciones enumeradas por el catálogo original (ISC019) son consistentes con la distribución de IDP para cada evento. De manera similar al evento de 1719 (Canora *et al.*, 2010, 2014), el terremoto del 13 de febrero de 2001 fue asignado a la falla de San Vicente, con la ruptura ocurrida a poca profundidad. De acuerdo con Cepeda *et al.* (2004) y Canora *et al.* (2010), la longitud de ruptura de al menos 21 km es congruente con un sismo de M_w 6,5, como se informa en el catálogo MARCA-GEHN.

El sismo del 14 de octubre de 2014

Este sismo ocurrió el día 13 de octubre de 2014, a las 21:51, fecha y hora local de El Salvador. Su epicentro fue localizado en el océano Pacífico, frente a la costa del departamento de La Unión y el golfo de Fonseca. De acuerdo, tanto a la información sísmica del MARN como del USGS, se determinó una magnitud de M_w 7,3 y una profundidad focal de 40 km. Asimismo, el USGS determinó los parámetros focales del evento, resultando en un mecanismo de tipo normal. Las soluciones del mecanismo focal indican que se produjo una ruptura en una falla abruptamente empinada hacia el noreste o en una falla que buzó poco a poco hacia el suroeste. La ubicación, la profundidad (40 km) y el mecanismo de falla del terremoto son consistentes con su ocurrencia dentro de la zona de subducción de la placa oceánica del Coco, en

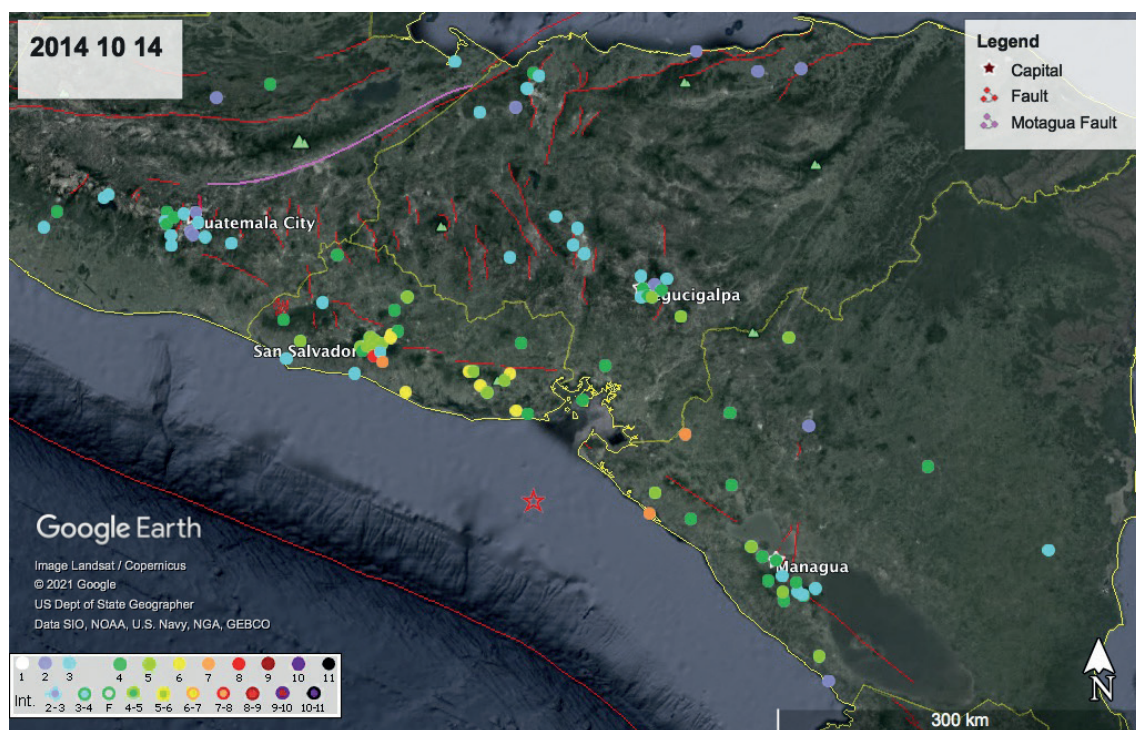


Fig. 4.18 - MDP set for the 14 October 2014 earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.18 - Conjunto MDP para el terremoto del 14 de octubre de 2014. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019).

subduction zone thrust (Hayes *et al.*, 2016).

According to the DYFI survey (MG28), and testimonies of the population in the media (MG20), this event was felt throughout Central America and parts of southern Mexico. In total, 33 IDPs were collected for El Salvador (102 in total, see Fig. 4.18), with diffuse first damage conditions (VI) in the San Miguel area. Two westernmost localities (Olocuilta and Panchimalco) are given intensities of VII and VIII, respectively, but they are not very consistent with the level of damage reported. Two people died in San Miguel, as reported by the national media, one by the collapse of a power line and the second due to a heart attack. Additionally, minor structural damage was reported in some buildings in the San Miguel sector. It is worth mentioning that during this event, the

lugar de en el empuje de la zona de subducción principal (Hayes *et al.*, 2016).

Según la encuesta DYFI (MG28), y los testimonios de la población en los medios (MG20), este evento fue percibido en toda Centroamérica y partes del Sur de México. Para El Salvador se recopilaron 33 IDP (102 en total, ver Fig. 4.18), con condiciones difusas de daño (VI) en el área de San Miguel. Dos localidades más occidentales (Olocuilta y Panchimalco) reciben intensidades de VII y VIII respectivamente, pero no son muy consistentes con el nivel de daños reportados. Dos personas murieron en San Miguel, según lo informado por los medios nacionales, una a consecuencia del colapso de un poste del tendido eléctrico y la segunda por un paro cardíaco. Adicionalmente, se reportaron daños estructurales menores en algunas edificaciones del sector de San Miguel. Cabe mencionar que

MARN authorities issued a tsunami warning for the coasts, and the population near the country's coasts was evacuated; the alert condition lasted till the morning of the following day. According to the Tsunami Monitoring System (SINAMOT) of Costa Rica, in the Coco island of Costa Rica a tsunami wave of maximum 10 cm height was reported.

The other most recent events of Table 4.1 refer to moderate, instrumentally well recorded earthquakes: they will be presented in the next chapter as comparative cases of offshore-inland earthquakes.

4.1.3. Special cases

In this chapter, we present some additional material for the 2001 seismic sequence, as well as tsunamis data, and give the details on two moderate recent earthquakes. These examples show the capacities (and sometimes limits) of the collected MDP sets to answer specific questions about the source of past events.

4.1.3.1. The 2001 sequence: cascade events and earthquake-triggered landslides

It is well known that the recognition of geologically documented effects of past earthquakes is crucial for the implementation of the existing seismic catalogues, and finally for the improvement of the seismic hazard assessment. The knowledge about ground effects triggered by earthquakes allows building an improved picture of seismic events, with respect to that usually given by solely damage-based macroseismic scales: it is with this purpose that a geological-effect targeted macroseismic scale has recently been proposed and implemented (ESI 2007, Michetti *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2015).

Earthquakes in Central America are

durante este evento, las autoridades del MARN emitieron una alerta por tsunami para la costa, donde fueron evacuadas personas cercanas a las costas del país; la condición de alerta duró hasta la mañana del día siguiente. De acuerdo al Sistema de Monitoreo de Tsunamis (SINAMOT) de Costa Rica, la isla del Coco reportó un impacto no mayor a 10 centímetros de altura.

Los otros eventos más recientes de Tab. 4.1 se refieren a terremotos moderados, bien documentados. Se presentarán en el próximo capítulo como casos comparativos de terremotos costa afuera.

4.1.3. Casos especiales

En este capítulo presentamos material adicional para la secuencia sísmica de 2001, sobre datos de tsunamis, y presentamos los detalles de dos terremotos moderados recientes. Estos ejemplos muestran las capacidades (y a veces las limitaciones) de los conjuntos de MDP recopilados para responder preguntas específicas sobre la fuente de eventos pasados.

4.1.3.1. Secuencia sísmica de 2001: eventos en cascada y deslizamientos de ladera activados por terremotos

Es bien sabido que el reconocimiento de los efectos geológicamente documentados de los terremotos pasados es crucial para la implementación de los catálogos sísmicos existentes y, finalmente, para la mejora de la evaluación de la amenaza sísmica. El conocimiento sobre los efectos del suelo provocados por los terremotos permite construir una imagen mejorada de los eventos sísmicos, con respecto a la que generalmente proporcionan las escalas macrosísmicas basadas únicamente en daños. Es con este propósito que recientemente se ha propuesto e implementado una escala macrosísmica dirigida a efectos geológicos (ESI 2007, Michetti *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2015).

Los terremotos en América Central con fre-

frequently accompanied by severe ground failures, among which numerous landslides have caused damage and disruption and, in some cases, increased the number of victims. The number of landslides triggered by the 4 February 1976 Guatemala earthquake, for example, is at least an order bigger than the landslides associated with earthquakes of similar size in other parts of the world (Bommer and Rodriguez, 2002).

The 2001 sequence has revealed the extreme levels of vulnerability to natural hazards that exist in El Salvador. In the aftermath of the 13 January earthquake, the Salvadoran government requested technical assistance from the Agency for International Development (USAID) and UNESCO, not only for the consequences on the population and the building stock, but also for the severe damage to the natural environment, given the extraordinary number of landslides triggered by the earthquake.

As previously mentioned, the 2001 earthquakes provided macroseismic intensity scenarios related to strong subduction earthquakes (January, magnitude up to 7.7, Fig. 4.16), associated with offshore submarine structures, and to moderate events (February, magnitude up to 6.5, Fig. 4.17) associated with inland, shallow seismogenic structures of the volcanic arc.

Both quakes generated severe damage due to significant landslides phenomena too. Coseismic landslides were spread over a broad region of the country. The most affected area was located in a sparsely inhabited volcanic environment. Preliminary reconnaissance reports and hazard assessment by the USGS teams were published soon after the earthquakes (Baum *et al.*, 2001; Harp *et al.*, 2001; Jibson and Crone, 2001). Landslide phenomena were systematically surveyed and documented shortly after the two main shocks, and a landslides

cuencia van acompañados de graves fallas de terreno, entre ellos, un gran número de deslizamientos de ladera causaron daños e interrupciones y, en algunos casos, aumentaron el número de víctimas. El número de deslizamientos de ladera provocados por el terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976, por ejemplo, es al menos un orden mayor que los deslizamientos de ladera asociados con terremotos de tamaño similar en otras partes del mundo (Bommer y Rodríguez, 2002).

La secuencia sísmica de 2001 ha revelado los niveles extremos de vulnerabilidad a los peligros naturales que existen en El Salvador. A raíz del terremoto del 13 de enero, el Gobierno salvadoreño solicitó asistencia técnica a la Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID) y a la UNESCO, no solo por las consecuencias para la población y las construcciones existentes, sino también por los graves daños sufridos por el entorno natural, dada la extraordinaria cantidad de deslizamientos de ladera provocados por el terremoto. Como se mencionó anteriormente, los terremotos de 2001 proporcionaron escenarios de intensidad macrosísmica relacionados con fuertes terremotos de subducción (enero, magnitud hasta 7,7, Fig. 4.16), asociados con estructuras submarinas costa afuera, y eventos moderados (febrero, magnitud hasta 6,5, Fig. 4.17) asociados con estructuras sismogénicas interiores y poco profundas del arco volcánico. Ambos terremotos generaron deslizamientos de ladera cósmicos que se extendieron por una amplia región del país y provocaron la mayor parte de los daños, muertos y desaparecidos. El área más afectada se localizó en un entorno volcánico escasamente habitado. Informes preliminares de reconocimiento y evaluación de amenaza por parte de los equipos del USGS se publicaron poco después de los terremotos (Baum *et al.*, 2001; Harp *et al.*, 2001; Jibson y Crone, 2001). Los procesos de deslizamientos de ladera se estudiaron y documentaron sistemáticamente poco después de los dos sismos principales,




		MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES DIRECCIÓN GENERAL DEL OBSERVATORIO AMBIENTAL		Fuente: Mision Japonesa - JICA																											
INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS																															
Fechas		Localización		Geometría general del Talud																											
Fecha evento:	13-feb-01	Departamento:	Cuscatlán	Municipio:	Santa Cruz																										
Fecha inspec:	15-feb-01	Coordenadas:	13°39'40.30" N	88°56'15.04" W	Analquito																										
		Altura (m):		Pendiente:																											
		Longitud (m):																													
Esquema de Ubicación		FOTOGRAFÍAS DEL DESLIZAMIENTO																													
		<table border="1"> <tr><td colspan="2" style="text-align: center;">Geometría de la superficie de Ruptura</td></tr> <tr><td>Ancho A:</td><td>-- m</td></tr> <tr><td>Largo L:</td><td>-- m</td></tr> <tr><td>Profundidad P:</td><td>-- m</td></tr> <tr><td>Volumen (AxLxP):</td><td>2,000,000 m³</td></tr> <tr><td>Descripción general:</td><td>Deslizamiento importante ubicado 6.5 km al oriente del Lago de Ilopango, en el costado sur del río Jiboa. Los materiales deslizados están constituidos principalmente por fragmentos rocosos con cenizas endurecidas, lo cual formó un dique que obstaculizó el paso del agua e inmediatamente comenzó a formarse el embalse.</td></tr> <tr><td>Entidad que solicitó inspección:</td><td></td></tr> <tr><td>Tipo de deslizamiento:</td><td>Rotacional</td></tr> <tr><td>Tipo de material deslizado:</td><td>Suelos de origen volcánico poco consolidado.</td></tr> <tr><td>Factores generadores:</td><td>Terremoto del 13 de Febrero de 2001</td></tr> <tr><td>Daños ocasionados:</td><td></td></tr> <tr><td>Recomendaciones:</td><td>Se construyó un canal o aliviadero para evitar que el embalse continuara creciendo.</td></tr> <tr><td>Antecedentes:</td><td></td></tr> </table>				Geometría de la superficie de Ruptura		Ancho A:	-- m	Largo L:	-- m	Profundidad P:	-- m	Volumen (AxLxP):	2,000,000 m ³	Descripción general:	Deslizamiento importante ubicado 6.5 km al oriente del Lago de Ilopango, en el costado sur del río Jiboa. Los materiales deslizados están constituidos principalmente por fragmentos rocosos con cenizas endurecidas, lo cual formó un dique que obstaculizó el paso del agua e inmediatamente comenzó a formarse el embalse.	Entidad que solicitó inspección:		Tipo de deslizamiento:	Rotacional	Tipo de material deslizado:	Suelos de origen volcánico poco consolidado.	Factores generadores:	Terremoto del 13 de Febrero de 2001	Daños ocasionados:		Recomendaciones:	Se construyó un canal o aliviadero para evitar que el embalse continuara creciendo.	Antecedentes:	
Geometría de la superficie de Ruptura																															
Ancho A:	-- m																														
Largo L:	-- m																														
Profundidad P:	-- m																														
Volumen (AxLxP):	2,000,000 m ³																														
Descripción general:	Deslizamiento importante ubicado 6.5 km al oriente del Lago de Ilopango, en el costado sur del río Jiboa. Los materiales deslizados están constituidos principalmente por fragmentos rocosos con cenizas endurecidas, lo cual formó un dique que obstaculizó el paso del agua e inmediatamente comenzó a formarse el embalse.																														
Entidad que solicitó inspección:																															
Tipo de deslizamiento:	Rotacional																														
Tipo de material deslizado:	Suelos de origen volcánico poco consolidado.																														
Factores generadores:	Terremoto del 13 de Febrero de 2001																														
Daños ocasionados:																															
Recomendaciones:	Se construyó un canal o aliviadero para evitar que el embalse continuara creciendo.																														
Antecedentes:																															
																															

Fig. 4.19 - Landslides inventory of the 2001 earthquakes (available at MARN, Dirección del Observatorio Ambiental).
 Fig. 4.19 - Inventario de deslizamientos de ladera de los terremotos de 2001 (disponible en MARN, Dirección del Observatorio Ambiental).

inventory has recently been compiled by the DOA-MARN (Dirección del Observatorio Ambiental of MARN) of El Salvador (Fig. 4.19).

Some information on the 2001 earthquake-induced landslides have been revised in order to apply the ESI 2007 scale. After a review of scientific papers, landslides have been identified and characterised in terms of type, location, dimension, and damage, according to the ESI 2007 scale. A total of 144 landslides were retained for macroseismic and environmental analysis. An intensity degree was attributed to each site according to the scale (Table 4.2).

The types of landslides triggered by both the earthquakes were primarily controlled by the stratigraphy and by the tectonic setting of the struck areas. The active tectonic environment, the relatively young, weak volcanic rocks, the frequency of moderate

y la Dirección del Observatorio Ambiental del MARN (DOA-MARN) de El Salvador ha proporcionado recientemente un inventario (Fig. 4.19).

Parte de la información sobre los deslizamientos de ladera inducidos por los terremotos de 2001 se ha revisado para aplicar la escala ESI 2007. Después de una revisión de artículos científicos, los deslizamientos de ladera han sido identificados y caracterizados en términos de tipo, ubicación, dimensión y daño, de acuerdo con la escala ESI 2007. Se documentó un total de 144 deslizamientos de ladera para el análisis macrosísmico y ambiental. Se atribuyó un grado de intensidad a cada sitio de acuerdo con la escala (Tabla 4.2).

Los tipos de deslizamientos de ladera provocados por los terremotos fueron controlados principalmente por la estratigrafía y la configuración tectónica de las áreas afectadas. El ambiente tectónico activo, las rocas volcánicas

Table 4.2 - Distribution of landslides according to their size and type.

Tabla 4.2 - Distribución de deslizamientos de ladera según su tamaño y tipo.

Rock and debris fall	Estimated volume (m ³)	Number	ESI2007 intensity degree	Slide and debris flows	Estimated volume (m ³)	Number
small	10 ² -10 ³	73	VI	small	10 ² -10 ³	14
moderate	10 ³ -10 ⁴	38	VII	moderate	10 ³ -10 ⁴	4
medium	10 ⁴ -10 ⁵	3	VIII	medium	10 ⁴ -10 ⁵	3
large	10 ⁵ -10 ⁶	1	IX	large	10 ⁵ -10 ⁶	5
very large	>10 ⁶		X	very large	>10 ⁶	3
		115 total				29 total

and large earthquakes as well as the subtropical climate, contribute to an environment prone to landsliding. Major concentrations of landslides were correlated with volcanic tuff distribution and loose quaternary deposits that are present throughout the country (Rodríguez *et al.*, 2006).

The 13 January earthquake induced at least 16,000 landslides (Lund and Sepponen, 2002), over an area of 25,000 km², including parts of west-central Guatemala, about 350 km away from the epicentre (Bommer *et al.*, 2002). The geographical distribution of triggered landslides covers most of the southern half of El Salvador, with the most significant concentrations of landslides occurring in an area of 5,000 km², including the Cordillera Balsamo, west and south of San Salvador, the areas around Lake Ilopango and Lake Coatepeque, as well as the Usulután volcano (Jibson and Crone, 2001). In this area, most of the triggered landslides were relatively small (tens to hundreds of cubic metres), within young volcanic pyroclastic deposits (Bommer and Rodríguez, 2002).

The January earthquake also induced large landslides that were responsible for the majority of the deaths and injuries, as well as the collapse of poorly constructed houses. The most damaging one occurred west of San Salvador, behind the Las Colinas area

relativamente jóvenes y débiles, la frecuencia de terremotos moderados y grandes, así como el clima subtropical, contribuyen a un ambiente propenso a deslizamientos de ladera. Las principales concentraciones de deslizamientos de ladera se correlacionaron con la distribución de toba volcánica y los depósitos cuaternarios sueltos que están presentes en todo el país (Rodríguez *et al.*, 2006).

El terremoto del 13 de enero provocó más de 16.000 deslizamientos de ladera (Lund y Sepponen, 2002), en un área de 25.000 km², incluyendo partes del centro-oeste de Guatemala, a unos 350 km del epicentro (Bommer *et al.*, 2002). La distribución geográfica de los deslizamientos de ladera activados cubre la mayor parte de la mitad sur de El Salvador, con una concentración más significativa de deslizamientos de ladera ocurridos en un área de 5.000 km², incluidas la Cordillera Bálsamo, oeste y sur de San Salvador, las áreas alrededor del lago Ilopango y el lago Coatepeque, así como el volcán Usulután (Jibson y Crone, 2001). La mayoría de los deslizamientos de ladera provocados fueron relativamente pequeños (decenas a cientos de metros cúbicos), dentro de depósitos piroclásticos volcánicos jóvenes (Bommer y Rodríguez, 2002).

El terremoto de enero también provocó grandes deslizamientos de ladera, responsables de la mayoría de las muertes, lesiones y el colapso de casas mal construidas. El más dañino ocurrió al

of Santa Tecla suburb (known as Nueva San Salvador too). The Las Colinas debris flow had an estimated volume of about 200,000 m³ (Bommer *et al.*, 2002; Konagai *et al.*, 2002), destroying everything along its path and causing 585 fatalities. To the SW of Nueva San Salvador was located the Las Barrioleras landslide that caused 105 deaths [Earthquake Engineering Research Institute (2001), in the following indicated as EERI]. The ESI2007 assessed local intensities IX, compared to the level of damage VIII on the MM scale, are much greater, and highlight the state of fragility of the environment on which the newly expanded area of the city of San Salvador is built. Not far from San Vicente, at Las Leonas, a second large landslide with a volume between 500,000-700,000 m³ occurred, causing 12 deaths (Bommer *et al.*, 2002). Other landslides took place along the Pan-American Highway, such as in Los Chorros (60,000 m³) and around Lake Ilopango (Bommer *et al.*, 2002). The January earthquake also triggered liquefaction and associated lateral spreading along coastal areas from La Libertad eastwards to the mouth of the Lempa River and along the riverbanks eastwards of Usulután (Guevara, 2002a, 2002b).

The 13 February earthquake, located in the central part of El Salvador, also induced thousands of small landslides that were concentrated in a 2,500 km² area. Most of the shallow failures (<1,000 m³) were so highly concentrated and locally abundant that they coalesced into nearly continuous landslides along many canyon walls (Baum *et al.*, 2001).

The February landslides reactivated phenomena that occurred on 13 January, and caused new landslides along the Lake Ilopango shore. Two very large ones occurred at the Rio El Desague and the Rio Jiboa river basins, creating land-

oeste de San Salvador, detrás del área de Las Colinas del suburbio de Santa Tecla (Nueva San Salvador). El flujo de escombros de Las Colinas tenía un volumen estimado de aproximadamente 200.000 m³ (Bommer *et al.*, 2002; Konagai *et al.*, 2002) que destruyeron todo a su paso y causó 585 muertes. Al suroeste de Nueva San Salvador se localizó el deslizamiento de ladera de Las Barrioleras que causó 105 muertes (EERI, 2001). Se evaluó las intensidades locales en la ESI2007 como IX, que, en comparación con el nivel de daño VIII en la escala MM, es mucho mayor y destaca el estado de fragilidad del entorno en el que se construye el área recientemente expandida de la ciudad de San Salvador. No lejos de San Vicente, en la ubicación de Las Leonas, ocurrió un segundo gran deslizamiento de ladera con un volumen entre 500.000-700.000 m³, causando 12 muertos (Bommer *et al.*, 2002). Otros deslizamientos de ladera ocurrieron a lo largo de la carretera Panamericana, como en Los Chorros (60.000 m³) y alrededor del lago de Ilopango (Bommer *et al.*, 2002). El terremoto de enero también provocó la licuefacción y la extensión lateral asociada a lo largo de las áreas costeras desde La Libertad hacia el este hasta la desembocadura del río Lempa y a lo largo de las riberas al este de Usulután (Guevara, 2002a, 2002b).

El terremoto del 13 de febrero ubicado en la parte central de El Salvador, también provocó miles de pequeños deslizamientos de ladera que se concentraron en un área de 2.500 km². La mayoría de fallamientos superficiales (<1.000 m³) fueron tan altamente concentrados y abundantes localmente que se unieron en deslizamientos de ladera casi continuos a lo largo de muchas paredes del cañón (Baum *et al.*, 2001). Los deslizamientos de ladera activados el 13 de febrero consistieron en deslizamientos del terremoto del 13 de enero reactivados y nuevos deslizamientos a lo largo de la orilla del lago de Ilopango. Ocurrieron dos deslizamientos de ladera muy grandes en correspondencia con los desagües

slide-dammed lakes. The Rio El Desague landslide had an estimated volume of 1.5 million m³, the Rio Jiboa of 12 million m³. According to the ESI2007 local intensity assessment, such volumes as well as morphological characteristics have been evaluated between X and XI. In this case, a normal assessment in terms of MM scale could not be carried out, given the absence of the building structures. In this way, important information on environmental vulnerability is lost, with negative consequences on the planning of this area.

The earthquake also triggered several significant landslides on the northern flank of the volcano San Vicente, including a large rock slide of an estimated volume of about 200,000 m³ in the area of Quebrada del Muerto (east of the Guadalupe village) and a coalescing debris slide with a cumulative volume of about 250,000 m³ in deeply incised gullies of the Quebrada El Blanco drainage basin (Baum *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2006). Lateral spreading was also observed on the shores of Lake Ilopango. The most serious effects of lateral spreading occurred on the banks of Lempa River at San Nicolas Lempa (Rodríguez *et al.*, 2006).

A general picture of the distribution of landslides in relation to their volume is provided by Garcia-Florez and Tsige (2013); the 13 January intense shakings triggered landslides covering areas that are larger compared to the 13 February crustal earthquake, in which landslides are concentrated around the epicentral area.

We assigned an intensity value to the major geological effects previously mentioned, using the ESI scale, and projected their location with a special symbol, on the other IDPs collected for both the 2001 earthquakes, in Fig. 4.20: in the online database these points are plotted according to the common colour

del río El Desagüe y el río Jiboa, creando lagos represados por deslizamientos. El deslizamiento de ladera del río El Desagüe tenía un volumen estimado de 1,5 millones de m³ y el deslizamiento de ladera del río Jiboa un volumen estimado de 12 millones de m³. De acuerdo con la evaluación de intensidad local de ESI2007, tales volúmenes y características morfológicas se han evaluado entre X y XI. En este caso, no se pudo llevar a cabo una evaluación normal en términos de escala MM, dada la ausencia de la construcción de edificaciones. De esta forma, se pierde información importante sobre la vulnerabilidad ambiental, con consecuencias negativas en la planificación de esta área.

El terremoto también provocó varios deslizamientos de ladera significativos en el flanco norte del Volcán San Vicente, incluido un gran deslizamiento de rocas de un volumen estimado de aproximadamente 200.000 m³ en el área de Quebrada del Muerto (al este de la aldea de Guadalupe) y un deslizamiento de escombros con un volumen acumulado de aproximadamente 250.000 m³ en quebradas profundamente de la cuenca de drenaje Quebrada El Blanco (Baum *et al.*, 2001; Rodríguez *et al.*, 2006). La expansión lateral también se observó en las orillas del lago Ilopango. Los efectos más graves de la expansión lateral se produjeron en las orillas del río Lempa en San Nicolás Lempa (Rodríguez *et al.*, 2006).

Garcia-Florez y Tsige (2013) proporcionan una imagen general de la distribución de los deslizamientos de ladera en relación con su volumen. Los movimientos intensos del 13 de enero han provocado deslizamientos de ladera que cubren áreas que son más grandes en comparación con el terremoto cortical del 13 de febrero, en el que los deslizamientos de ladera se concentran alrededor del área epicentral.

Asignamos un valor de intensidad a los principales efectos geológicos mencionados anteriormente, utilizando la escala ESI, y proyectamos su ubicación con un símbolo especial, con

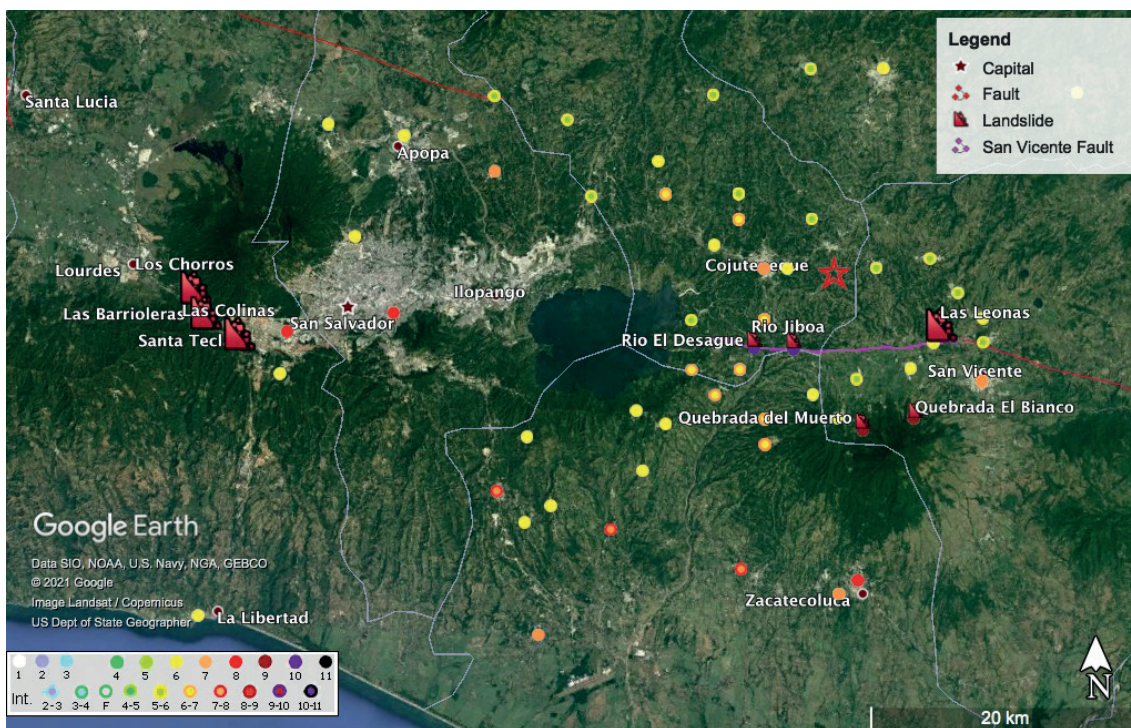


Fig. 4.20 - Map of geologically based effects due to the 2001 earthquakes. The red “landslide” symbols are plotted on top of IDPs of both the events. The red star shows the location of the 13 February earthquake, the administrative limits of departments are given in grey.

Fig. 4.20 - Mapa de efectos geológicos debido a los terremotos de 2001. Los símbolos rojos de “deslizamiento de ladera” se trazan encima de los IDP de ambos eventos. La estrella roja muestra la ubicación del terremoto del 13 de febrero, los límites administrativos de los departamentos se dan en gris.

scale, but they can easily be discerned for their different intensity scale code (Isca column). Note the distance with respect to the epicentres, and the alignment of several phenomena in the proximity of the San Vicente Fault (within the El Salvador Fault Zone). According to Canora *et al.* (2010), this is the shallow fault responsible for the 13 February earthquake: they estimate a 21-km long surface fault rupture, with coseismic right-lateral strike-slip movement, and a maximum surface displacement of 0.60 m, no vertical component.

Even if far from complete, this kind of analysis demonstrates the utility of the collection of macroseismic data, including the geologically based ones, for a comprehen-

los otros IDP recolectados para los terremotos de 2001, en la Fig. 4.20: en la base de datos en línea estos puntos se dan de acuerdo con la escala de color común, pero se pueden contar fácilmente por su código de escala de intensidad diferente (columna Isca). Se debe tomar en cuenta la distancia con respecto a los epicentros y la alineación de varios procesos en la proximidad de la falla de San Vicente (dentro de la zona de falla de El Salvador). De acuerdo con Canora *et al.* (2010), esta es la falla superficial responsable del terremoto del 13 de febrero; calculan una ruptura de falla en la superficie de 21 km de largo, con movimiento cosísmico de deslizamiento lateral derecho y un desplazamiento máximo de la superficie de 0,60 m, sin componente vertical.

Incluso si está lejos de estar completo, este

sive study of recent earthquakes. We believe this information can also guide in the interpretation of the events of the past.

The destructive seismic events of 13 January and 13 February 2001, with origin respectively in the subduction zone and in the volcanic chain, have confirmed that El Salvador, a region of very high seismic hazard, is exposed to “domino-like”, multi-geological risks. The number of landslides triggered by these earthquakes, their size and geographical distribution, require additional modelling of this important component of the seismic risk, to reduce the exposure of the population and the economy of this region.

On the basis of the examples reported, it is evident that Earthquake Environmental Effects (EEE) can significantly improve the evaluation of seismic intensity, for a realistic seismic hazard assessment. Their consideration in the earthquake risk scenario is crucial for all stakeholders, especially urban planners, geotechnical and structural engineers, hazard analysts, civil protection agencies and insurance companies.

4.1.3.2. Tsunamis along the Pacific subduction zone of Central America

The Pacific coast between Mexico and Panama is a highly tsunamigenic area in Central America. Local tsunamis there originate from subduction earthquakes due to the interaction between the Coco and Caribbean plates. The highest probability of the occurrence of major tsunamis is located in the coastal segment between Guatemala and Nicaragua, where large events of $M7+$ occur offshore (Fernández and Ortiz, 2012); sometimes also $M6+$ events, which are very frequent, can generate tsunamis too. The

tipo de análisis demuestra la utilidad de la recopilación de datos macrosísmicos, incluidos los de base geológica, para un estudio exhaustivo de los terremotos recientes. Creemos que esta información también puede guiarnos en la interpretación de los eventos del pasado.

Los eventos sísmicos destructivos del 13 de enero y el 13 de febrero de 2001, con origen respectivamente en la zona de subducción y en la cadena volcánica, han confirmado que El Salvador, una región de amenaza sísmica muy alta, está expuesto a múltiples riesgos geológicos “como dominó”. La cantidad de deslizamientos de ladera provocados por estos terremotos, su tamaño y distribución geográfica, requieren un modelado adicional de este componente importante del riesgo sísmico, para reducir la exposición de la población y la economía de esta región.

Sobre la base de los ejemplos reportados, es evidente que los efectos ambientales del terremoto (EEE) pueden mejorar significativamente la evaluación de la intensidad sísmica, para una evaluación realista de la amenaza sísmica. Su consideración en el escenario de riesgo de terremoto es crucial para todos los interesados, especialmente los planificadores urbanos, ingenieros geotécnicos y estructurales, analistas de riesgos, agencias de protección civil y compañías de seguros.

4.1.3.2. Tsunamis a lo largo de la zona de subducción del Pacífico de América Central

La costa del Pacífico entre México y Panamá es un área altamente tsunamigénica en América Central. Allí, los tsunamis locales se originan a partir de terremotos de subducción debido a la interacción entre las placas del Coco y Caribe. La mayor probabilidad de ocurrencia de grandes tsunamis se encuentra en el segmento costero entre Guatemala y Nicaragua, donde ocurren grandes eventos de $M7+$ costa afuera (Fernández y Ortiz, 2012); en ocasiones, también los eventos $M6+$, que son muy frecuentes, pueden generar tsunamis. Los tsunamis más destructi-

most destructive tsunamis have been associated with local events, or to $M \sim 8$ distant earthquakes (for example in the Alaska earthquake, in 10 March 1957, caused loss of lives and severe damage to the port of Acajutla). According to Molina (1997), 37 tsunamis have hit the Pacific coast of Central America, 23 of them with local sources. In El Salvador, 15 tsunamis have been recognised between 1859 and 2012 (Lindholm *et al.*, 2017), three of them causing significant damage and resulting in hundreds of victims.

From the Official Gazette of San Salvador of 1859, a strong earthquake was felt in San Salvador on 8 December, at 8:30 p.m. local time, affecting the El Salvador and Guatemala populations. The earthquake was distinctly felt in Honduras and Nicaragua as well. The earthquake generated a sea wave (tsunami) that hit the port of Acajutla. The 1859 event is the first to be reported for this area in the Tsunami Catalogue for Central America (Molina, 1997); in this catalogue, the tsunami origin time is correctly referred to as 9 December, 2:30 a.m. as given in UTC time. It differs from the date of the GHEC catalogue, where the origin time is unknown, and it has been corrected in the MARCA-GEHN earthquake list. WHal004 reported a very long shaking that lasted over one minute, and aftershocks for about a week, causing destruction in western El Salvador and eastern Guatemala. Soloviet and Go (1984), in agreement with contemporary, or nearly contemporary, sources (Montessus de Ballore, 1888), described the tsunami and its effect on the Salvadoran coast. The main observed effects were related to the sea water that was very agitated in Acajutla, high waves and recessions of the water far from the shoreline, live fish on the beaches, destruction of the warehouse and flooding of the breakwater and customhouse; caves and grottos collapsed. Fernández *et al.* (2000)

vos se han asociado con eventos locales o con terremotos distantes $M \sim 8$ (por ejemplo, en el terremoto de Alaska, en 1957, el 10 de marzo, causó la pérdida de vidas y daños graves en el puerto de Acajutla). Según Molina (1997), 37 tsunamis han golpeado la costa del Pacífico de América Central, 23 de ellos con fuentes locales. En El Salvador, se reconocieron 15 tsunamis entre 1859 y 2012 (Lindholm *et al.*, 2017), tres de ellos causaron daños y resultaron en cientos de víctimas.

Según la Gaceta Oficial de San Salvador de 1859, se sintió un fuerte terremoto en San Salvador el 8 de diciembre a las 20:30, hora local, que afectó a las poblaciones de El Salvador y Guatemala. El terremoto se sintió claramente en Honduras y Nicaragua también. El terremoto generó una ola marina (tsunami) que golpeó el puerto de Acajutla. Este es el primer evento reportado para esta área en el Catálogo de Tsunamis para América Central (Molina, 1997); en este catálogo, el sismo se reporta para el 9 de diciembre (fecha modificada, 2:30 en hora UTC). Difiere de la fecha del catálogo GHEC, donde se desconoce la hora origen, y se ha corregido en la lista de terremotos de MARCA-GEHN. WHal004 reportó un temblor muy largo que duró más de un minuto, y réplicas durante aproximadamente una semana, causando destrucción en el oeste de El Salvador y el este de Guatemala. Soloviet y Go (1984), de acuerdo con fuentes contemporáneas o casi contemporáneas (Montessus de Ballore, 1888), describen el tsunami y su efecto en la costa salvadoreña. Los principales efectos observados están relacionados con el agua de mar que estaba muy agitada en Acajutla, las altas olas y la retirada del agua lejos de la costa, los peces vivos en las playas, la destrucción del almacén y la inundación de rompeolas y casas de huéspedes; las cuevas y grutas se derrumbaron. Fernández *et al.* (2000) evaluaron un valor de 1,5, en la escala de Magnitud de Tsunami de Imamura-Iida; reevaluamos en un grado VII en la nueva escala

assessed a value of 1.5, on the Imamura-Iida Tsunami Magnitude scale; we re-evaluated to a degree VII on the 12-degrees New Tsunami Intensity scale (Papadopoulos and Imamura, 2001).

An intense tsunamigenic activity is reported for the year 1902 along the coast between Guatemala and El Salvador (Fernández, 2002). On 18 January, effects were observed on the ground along the coast, consisting of ripples of 25-30 m long and 25-30 cm high. Sand accumulation of about 2 km was also observed at Ocos, San Marcos, department of Guatemala.

On 26 February 1902, the most dangerous tsunami occurred, probably generated offshore from the Guatemala and El Salvador coasts (note the location and magnitude taken in MARCA-GEHN that derive from the reference catalogue, GHEC). WHal004 associate the tsunami with an underwater landslide, claiming the absence of seismic events throughout the circumpacific region for that date. This event generated three tsunami waves with a maximum height of 20 m; they penetrated (run-up) 100 m inland near La Libertad and Acajutla. It was reported that the sea retreated for several tens of metres and subsequently three huge waves devastated the coast between Garita Palmera and Barra de la Paz, in the Ahuachapan department. The first wave struck the coast causing damage to property and washing away homes and trees. There was extensive flooding of the coastal cities, on a coastal strip about 120 km long, between Ahuachapán and La Paz, causing great damage and almost two hundred deaths (Fernández *et al.*, 2004; Fernández and Ortiz, 2012).

Then, another seismic event on 19 April 1902, offshore of Guatemala (additional description of this earthquake is given in chapter 4.2.2), produced a subsidence phenomenon of about 1 metre along the coast

de Intensidad de Tsunami de 12 grados (Papadopoulos e Imamura, 2001).

Se informa una intensa actividad tsunamigénica para el año 1902 a lo largo de la costa entre Guatemala y El Salvador (Fernández, 2002). Para el terremoto del 18 de enero, se observaron efectos en el suelo a lo largo de la costa, que consisten en ondas de 25-30 metros de largo y 25-30 cm de alto. También se observó una acumulación de arena de aproximadamente 2 km en Ocos, San Marcos, departamento de Guatemala.

El 26 de febrero de 1902, ocurrió el tsunami más peligroso, probablemente generado en las costas de Guatemala y El Salvador (téngase en cuenta la ubicación y la magnitud tomadas en MARCA-GEHN que se derivan del catálogo de referencia, GHEC). WHal004 asocia el tsunami con un deslizamiento de ladera bajo el agua, alegando la ausencia de eventos sísmicos en toda la región circumpacífica para esa fecha. Este evento generó tres olas de tsunami con una altura máxima de 20 m, inundando 100 m tierra adentro cerca de La Libertad y Acajutla. Se informó que el mar se retiró por varias decenas de metros y posteriormente tres grandes olas devastaron la costa entre Garita Palmera y Barra de la Paz, en el departamento de Ahuachapán. La primera ola golpeó la costa causando daños a la propiedad y llevándose casas y árboles. Hubo grandes inundaciones en las ciudades costeras, en una franja costera de unos 120 km de largo, entre Ahuachapán y La Paz, causando grandes daños y casi doscientas muertes (Fernández *et al.*, 2004; Fernández y Ortiz, 2012).

Luego, otro evento sísmico el 19 de abril de 1902, en la costa de Guatemala (se da una descripción adicional de este terremoto en el capítulo 4.2.2), produjo un proceso de hundimiento de aproximadamente 1 metro a lo largo de la costa cerca de Ocos (Fernández, 2002). Ambraseys y Adams (1996) informan sobre el daño sufrido en el Puerto de Ocos, debido a los



Fig. 4.21 - Map of tsunami effects along the El Salvador coast, as reported in MARCA-GEHN: the intensity scale used is the one proposed by Papadopoulos and Imamura (2001). The incomplete sample is chosen to illustrate the capacity of the macroseismic archive to reconstruct a more complete picture of past earthquakes.

Fig. 4.21 - Mapa de los efectos del tsunami a lo largo de la costa de El Salvador, como se informa en MARCA-GEHN: la escala de intensidad utilizada es la propuesta por Papadopoulos y Imamura, 2001. La muestra incompleta se elige para ilustrar las capacidades del archivo macrosísmico para reconstruir una imagen más completa de los terremotos pasados.

near Ocos (Fernández, 2002). Ambraseys and Adams (1996) report information on damage in the Port of Ocos, due to large liquefaction phenomena that affected the entire port area as well as the harbour facilities that were totally destroyed. The authors point out that there was no evidence that the earthquake was associated with a seismic sea wave. Some USGS sources argue possible mistypes, in dating the events too.

Acknowledging that a more cautious search of contemporary documentary sources is needed, and in the hope of supporting the research on these subjects, we decided to upload in MARCA-GEHN three intensity points for the 26 February, and one additional intensity point for the 19 April 1902

grandes procesos de licuefacción que afectaron toda el área del puerto, así como las instalaciones del puerto que fueron totalmente destruidas. Los autores señalan que no había evidencia de que el terremoto estuviera asociado con una ola sísmica del mar. Algunas fuentes de USGS argumentan posibles errores, al fechar los eventos también.

Reconociendo que se necesita una búsqueda más cautelosa de fuentes documentales contemporáneas, y con la esperanza de favorecer la investigación sobre estos temas, decidimos subir a MARCA-GEHN tres puntos de intensidad para el 26 de febrero y un punto de intensidad adicional para el terremoto del 19 de abril 1902, asignando un grado de efectos en la escala de intensidad de tsunami (TSU).

earthquake, assigning a degree of effects in the Tsunami Intensity scale (TSU).

Another devastating tsunami occurred in 1992 offshore of Nicaragua, from which we derive 23 IDPs in the TSU scale: it will be described later in the chapter 4.3.3.

Finally, for El Salvador, on 27 August 2012 a small tsunami affected the area of San Juan del Gozo (Jiquilisco Bay), causing damage to infrastructure and injuries to several people (MARN, 2017, p. 49). Another single IDP, based on the TSU scale has been added in the online catalogue.

In Fig. 4.21 we gathered all the IDPs for which an intensity value in the tsunami intensity scale has been assigned to the Salvadoran coast. Even if their number is minimal, with respect to the potentialities of the documentary sources, these data are important to reconstruct both the overall picture of the effects and the true origin of ancient earthquakes and tsunamis. We reckon that sometimes the earthquake image reported by the seismic and tsunami catalogues is not uniform and rational: for this reason, in MARCA-GEHN we have included, albeit in a very limited way, intensity information in the tsunami measurement scale, an absolute novelty in this kind of database. We hope that the next release will make some improvement in data visualisation too.

4.1.3.3. The DYFI picture of moderate recent earthquakes

In this section, we briefly describe earthquakes that have been considered proxies of intensity data, as they derive from the answers to online macroseismic questionnaires (in particular the DidYouFeelIt - DYFI - survey, operated by USGS): two of them occurred during the lifetime of the RIESCA project. The examples of intensity distribution can help distinguish between shallow or deep earthquakes, anomalies in the rupture

Otro tsunami devastador ocurrió en 1992 frente a las costas de Nicaragua, del cual derivamos 23 IDP en la escala TSU: se describe últimamente en el capítulo 4.3.3.

Finalmente, para El Salvador, el 27 de agosto de 2012, un pequeño tsunami afectó el área de San Juan del Gozo (Bahía de Jiquilisco), causando daños a la infraestructura y heridas a varias personas (MARN, 2017, pag. 49). Se agregó otro IDP único, basado en la escala TSU en el catálogo en línea.

En la Fig. 4.21 reunimos todos los IDP para los cuales se ha asignado un valor de intensidad en la escala de intensidad del tsunami, para El Salvador. Incluso si su número es mínimo, con respecto a las potencialidades de las fuentes documentales, estos datos son importantes para reconstruir tanto la imagen de los efectos como el verdadero origen de los terremotos y tsunamis antiguos. Consideramos que a veces la imagen del terremoto reportada por los catálogos sísmicos y de tsunamis no es uniforme y racional: por esta razón, en MARCA-GEHN hemos incluido, aunque de manera muy limitada, información de intensidad en la escala de medición de tsunamis, una novedad absoluta en este tipo de base de datos. Esperamos que la próxima versión incluya también algunas mejoras en la visualización de datos.

4.1.3.3. La imagen DYFI de terremotos moderados recientes

En esta sección mostramos terremotos que han sido considerados como indicadores de datos de intensidad, ya que se derivan de las respuestas a los cuestionarios macrosísmicos en línea (en particular, la encuesta DidYouFeelIt - DYFI - operada por USGS): dos ocurrieron durante la vida útil del proyecto RIESCA. Los ejemplos de distribución de intensidad pueden ayudar a discriminar entre terremotos poco profundos o profundos, anomalías en las propiedades de

and propagation properties, and so on. The debate if these data are comparable to a traditional macroseismic survey is heated, and still on-going after some decades of practice of online surveys all over the world. With our collection, we do not wish to enter into these issues, but only to show the potential of collecting all the available information to better constrain poorly instrumented areas, or deficiencies in post-earthquake recognition of the effects.

The 10 April 2017 earthquake occurred within a seismic swarm that, according to the MARN analyses (the national authoritative agency that has a dense local network in that area), is located between the municipalities of Antiguo Cuscatlán and San Salvador, specifically in the western sector of the San Salvador Metropolitan Area (AMSS). The location provided by the available international source (NEIC) needs correcting in favour of a preferred location given by MARN (see epicentre “preferred” in the online database, with a focal depth of 5.6 km and a local magnitude of 5.1; subsequently, the magnitude in terms of the seismic moment was recalculated to 4.8), despite being eccentric with respect to the major DYFI intensities (Fig. 4.22). The activity was characterised by three non-consecutive periods, spanning from April to May 2017, with 622 events recorded. Given the proximity of the main event to the San Salvador volcano, the question arises whether the event was of volcanic origin or strictly tectonic; however, the San Salvador volcano showed no sign of activity after this earthquake.

According to the technical report prepared by MARN seismologists, the main event occurred as a result of the movement of one of the local geological faults located within the AMSS, the focal mechanism (obtained by P-wave first polarity method) suggests that it was a tear with left lateral

ruptura y propagación, entre otros parámetros. El debate sobre si estos datos son comparables a un estudio macrosísmico tradicional es duro, y aún continúa después de algunas décadas de práctica de encuestas en línea en todo el mundo. Con nuestra colección, no queremos entrar en estos temas, sino sólo mostrar las potencialidades de recopilar toda la información disponible para restringir mejor las áreas mal instrumentadas o las deficiencias en el reconocimiento de los efectos posterior al terremoto.

El sismo del 10 de abril de 2017 ocurre en el marco de un enjambre sísmico que, según los análisis del MARN (la agencia nacional que tiene una red sísmica local muy bien densificada en esa área) se localiza entre los municipios de Antiguo Cuscatlán y San Salvador, específicamente en el sector Oeste del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). La localización proporcionada por la agencia internacional (NEIC) debe corregirse en favor de una ubicación preferida dada por el MARN (ver epicentro “preferred” in la base de datos en línea, con profundidad focal de 5,6 km y magnitud local de 5,1; posteriormente, fue recalculada la magnitud en términos del momento sísmico y esta resultó de 4,8), a pesar de que es excéntrico con respecto a las principales intensidades DYFI (Fig. 4.22). Esta actividad se caracterizó por presentarse en períodos no consecutivos, destacándose tres episodios sísmicos, que abarcan desde el mes de abril hasta mayo del 2017. En total se registraron 622 eventos durante esta actividad sísmica. Dada la cercanía del evento principal al volcán de San Salvador, surge la pregunta si el evento fue de origen volcánico o estrictamente tectónico; sin embargo, el volcán de San Salvador no mostró ninguna señal de actividad después de este sismo.

Según el informe técnico elaborado por sismólogos del MARN, este evento ocurrió como resultado del movimiento de una de las fallas geológicas locales ubicadas dentro del AMSS, y dado el mecanismo focal (también determinado



Fig. 4.22 - Onshore shallow event of *M* 4.8 on 10 April 2017.

Fig. 4.22 - Evento superficial en tierra de *M* 4.8 el 10 de abril de 2017.

movement, that is, considering a main fault plane in the NNE direction (similar to the events of 1878, 1951, and 1986). The 15 IDPs derive from USGS data (MG26). It is worth mentioning that in the perpendicular direction of the fault plane considered as the main one, a rock fall was reported, resulting in the death of one person. In this area, better known as the Los Chorros highway, it is common for rock sections to yield to minimal movements given their considerable instability.

On 7 July 2013, at 20:52 local time, an *M* 5.7 event was located off the coast of the department of La Libertad. The locations reported by ISC019, USGS, and MARN, do not significantly differ. Similarly, the focal depths range between 50 and 65 km, thus associating it with an intraplate subduction seismic source. The focal mechanism de-

por ellos, con el método de las polaridades del primer impulso de la onda P) sugieren que fue de desgarre con movimiento lateral izquierdo, es decir, considerando un plano de falla principal en dirección NNE (similar a los eventos de 1878, 1951 y 1986). Los 15 IDP se derivan de los datos del USGS (MG26). Cabe mencionar, que en la dirección perpendicular del plano de falla considerado como principal, se reportó una caída de rocas, lo cual trajo como consecuencia el fallecimiento de una persona. En dicha zona, mejor conocida como la carretera Los Chorros, es habitual que secciones de roca cedan a mínimos movimientos dada su considerable inestabilidad.

El 7 de julio de 2013, a las 20:52 hora local, ocurrió un sismo *M* 5,7 frente a la costa del departamento de La Libertad. Las ubicaciones reportadas por ISC019, USGS y MARN no difieren demasiado en su determinación. Del

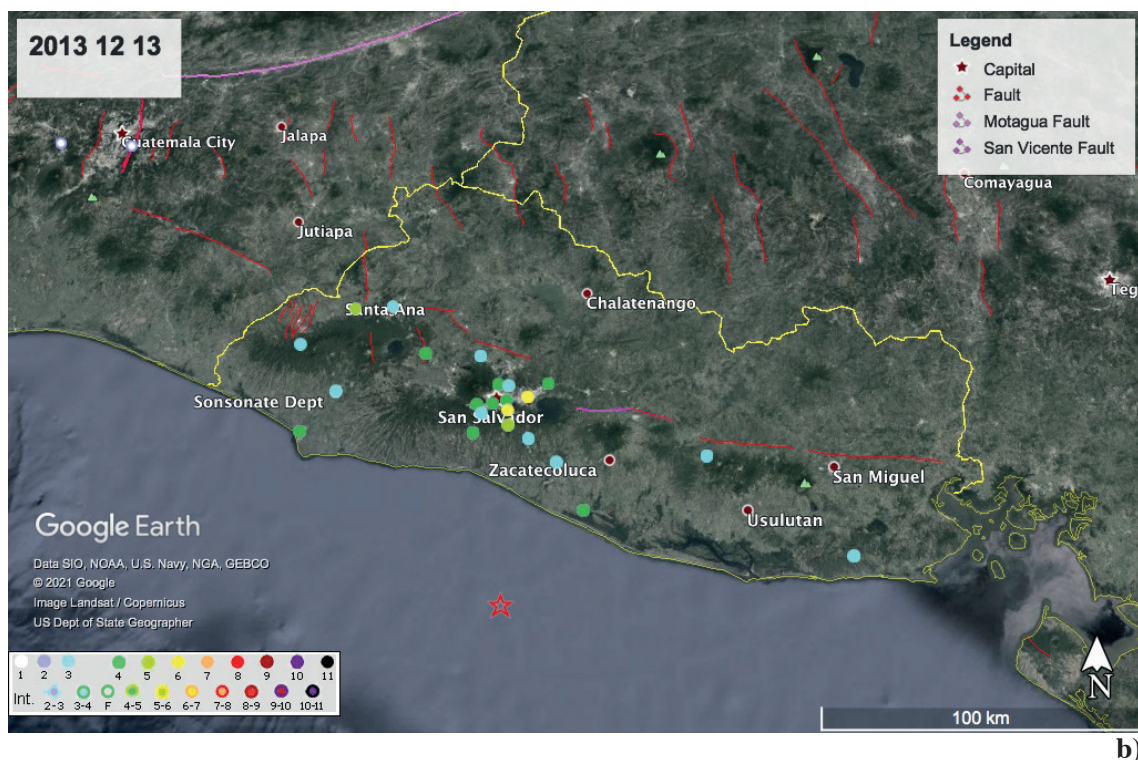


Fig. 4.23 - Offshore events of: a) 8 July 2013 (M 5.7); b) 13 December 2013 (M 5.5); and c) 3 January 2018 (M 5.2). The red star shows the location of the origin catalogue (ISC19).

Fig. 4.23 - Eventos costa afuera de a) 8 de julio de 2013 (M 5.7), b) 13 de diciembre de 2013 (M 5.5) y c) 3 de enero de 2018 (M 5.2). La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC19).



Fig. 4.23 - continued.
 Fig. 4.23 - continuada.

termined by USGS identifies a normal type rupture.

The earthquake caused alarm among the population of various areas of the capital, San Salvador, and in other western departments, such as Santa Ana, Sonsonate, and Ahuachapán. There were no reports of people affected or material damage. According to international media, the tremor was also felt in some areas of Guatemala and Honduras (<https://www.emol.com/noticias/internacional/2013/07/08/607866/un-sismo-de-58-grados-richter-sacude-territorio-salvadoreno.html>).

The IDPs (31) associated with this event come from the online questionnaire (DYFI) of the USGS (MG25): it is consistent with the areal distribution with respect to the subduction location (Fig. 4.23a). Note that an intensity of VI is assigned to the city of

mismo modo, las profundidades focales oscilan entre 50 y 65 km, lo que lo asocia con una fuente sísmica de subducción intraplaca. El mecanismo focal determinado por USGS identifica una ruptura de tipo normal. El terremoto causó alarma entre la población de varias áreas de la capital, San Salvador, y en otros departamentos occidentales, como Santa Ana, Sonsonate y Ahuachapán. No hubo informes de personas afectadas o daños materiales. Según medios internacionales, el temblor también fue perceptible en algunas áreas de Guatemala y Honduras (<https://www.emol.com/noticias/internacional/2013/07/08/607866/un-sismo-de-58-grados-richter-sacude-territorio-salvadoreno.html>).

Los IDP (31) asociados con este evento provienen del cuestionario en línea (DYFI) del USGS (MG25): es consistente con la distribución de área con respecto a la ubicación de sub-

Santo Tomas, but no damage was reported by local sources (<https://es.earthquake-report.com/2013/07/08/strong-earthquake-offshore-el-salvador-on-july-8-2013/>). We, therefore, contend that the DYFI data can overestimate the intensities with respect to a traditional survey, especially in metropolitan areas. As a general rule, the DYFI data have to be treated *per se*, to investigate the distribution of perceptibility and damage area.

On 12-13 December 2013, some moderate earthquakes shook the Salvadoran territory, alarming the population. The strongest one (M_L 5.5) occurred on 12 December, 10:45 p.m. local time, when most of the population were inside their homes. According to MARN, the earthquake occurred off the coast of the department of La Libertad at a depth of 34.2 km, and it ruled out a tsunami alert. Five minutes before the main event, a foreshock occurred in the same area (M_L 3.9), scarcely perceptible by the citizens.

No damage was reported for the main event by the press (<https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Alerta-por-fuerte-sismo-20131213-0054.html>), while according to the DYFI survey this event was felt in the departments of La Libertad, La Paz and San Salvador, and reached first damage conditions (VI) in the San Marco municipality. In total, 27 IDPs were collected (Fig. 4.23b).

Another offshore earthquake occurred on 3 January 2018, at 7:38 a.m. local time, located in the Pacific Ocean off the coast of the La Libertad department. The locations reported by both USGS and the local MARN institution do not differ much in their solutions. The focal depths range between 55 and 65 km, the rupture mechanism is of pure normal type and M_w is given as 5.2 (USGS data, from the centroid of the seismic moment tensor), thus corresponding to a type

ducción (Fig. 4.23a). Se debe tomar en cuenta que se asigna una intensidad de VI a la ciudad de Santo Tomás, pero las fuentes locales no han informado de daños (<https://es.earthquake-report.com/2013/07/08/strong-earthquake-offshore-el-salvador-en-julio-8-2013/>). Luego, argumentamos que los datos DYFI pueden sobreestimar las intensidades con respecto a una encuesta tradicional, especialmente en las áreas metropolitanas. Como regla general, los datos DYFI deben tratarse *per se*, para investigar la distribución de la perceptibilidad y el área de daños.

Los días 12 y 13 de diciembre de 2013, algunos terremotos moderados sacudieron el territorio salvadoreño, alarmando a la población. El más fuerte (M_L 5,5) ocurrió el 12 de diciembre a las 22:45 hora local, cuando la mayoría de la población se encontraba dentro de sus casas. Según el MARN, el sismo ocurrió frente a las costas del departamento de La Libertad a una profundidad de 34,2 kilómetros, y descartó una alerta de tsunami. Cinco minutos antes del evento principal ocurrió un evento premonitor en la misma zona (M_L 3,9), apenas perceptible por la ciudadanía. La prensa no reportó daños para el evento principal (<https://www.laprensagrafica.com/elsalvador/Alerta-por-fuerte-sismo-20131213-0054.html>), mientras que según la encuesta DYFI este evento se sintió en los departamentos de La Libertad, La Paz y San Salvador, y alcanzó las primeras condiciones de daño (VI) en el municipio de San Marco. En total, se recogieron 27 IDP (Fig. 4.23b).

Otro terremoto costa afuera ocurrió el 3 de enero de 2018, a las 7:38 hora local, y se localizó en el océano Pacífico frente a la costa del departamento de La Libertad. Las localizaciones reportadas tanto por el USGS y el MARN, no difieren mucho en su determinación. Asimismo, las profundidades focales oscilan entre los 55 y 65 km, el mecanismo de ruptura es de tipo normal puro y M_w se da como 5,2 (datos del USGS, del centroide del tensor de momento sísmico), lo que corresponde a un tipo de fuente sísmica

of seismic source of intraplate subduction. The IDPs (22, Fig. 4.23c) derive from the DYFI survey (MG27), and are consistent with the areal distribution with respect to a subduction event.

These examples show the importance of field data surveys, done by experienced personnel, in order to collect a statistical representation of effect/damages, both for onland and offshore earthquakes. The DYFI proxy to intensity values must be used after careful checks regarding the local site conditions of observers.

4.2. Guatemala

4.2.1. Introduction

Guatemala is a Central American country bordering to the east with Belize, Honduras, and the Caribbean Sea, SE with El Salvador, to the south with the Pacific Ocean and NW with Mexico. It has a total area of 108,889 km², divided into 22 departments, further subdivided into 340 municipalities: Guatemala City (with 3,015,081 inhabitants at 2018, <https://www.ine.gob.gt/ine/>) is the capital. Guatemala is characterised by being a multi-ethnic society, with 23 Mayan, Xinca, and Garifuna languages. Throughout its history, the country has been led by democratic governments, has suffered periods of civil wars and military dictatorships; the most recent civil war lasted 36 years, and it ended with the peace agreements in 1996 (<https://onu.org.gt/acerca-de-guatemala/>).

From the seismotectonic point of view, Guatemala is a country crossed by a major fault zone that represents the tectonic boundary between the Caribbean plate and North America plate, namely the Chixoy-Polochic and Motagua fault zone. In addition, along the southern coast of the country, the Coco plate subducting under the Caribbean plate,

de subducción intraplaca.

Los IDP (22, Fig. 4.23c) derivan de la encuesta DYFI (MG27) y son consistentes con la distribución por área con respecto a un evento de subducción.

Estos ejemplos muestran la importancia de las encuestas de datos de campo, realizadas por personal experimentado, con el fin de recopilar una representación estadística de los efectos / daños, tanto para terremotos en tierra como costa afuera. El proxy DYFI para los valores de intensidad debe usarse después de verificaciones cuidadosas, con respecto a las condiciones del sitio local de los “observadores”.

4.2. Guatemala

4.2.1. Introducción

Guatemala es un país centroamericano, el cual está limitado al este por Belice, Honduras y Mar Caribe, al sureste por El Salvador, al sur por el Océano Pacífico y al noroeste por México. Cuenta con una extensión total de 108.889 km², el cual se divide en 22 departamentos que se dividen en 340 municipios, siendo su capital la Ciudad de Guatemala (con 3.015.081 habitantes en el 2018, <https://www.ine.gob.gt/ine/>). Guatemala se caracteriza por ser un país multiétnico con 23 idiomas Mayas, Xinca y Garífuna. A lo largo de su historia ha sido dirigida por gobiernos democráticos, ha sufrido periodos de guerra civil y juntas militares, siendo el conflicto armado interno más reciente el que duró 36 años, proceso que finalizó con la firma de la paz en 1996 (<https://onu.org.gt/acerca-de-guatemala/>).

Guatemala se encuentra en una zona de fallas que atraviesan el país y forman el límite tectónico entre las placas Caribe y Norteamérica por su movimiento de transcurrancia, conformando las fallas Chixoy-Polochic y Motagua. Además, en la costa sur del país se encuentra la Placa del Coco que con un movimiento de subducción en relación a la Placa del Caribe ha generado la for-

is responsible for the formation of a volcanic arc that runs throughout all Central America. These movements have produced secondary failures such as those of Mixco, Santa Catarina Pinula, Jalpatagua, and Jocotán-Chamelcón (see Styron *et al.*, 2020).

The seismogenic processes have produced seismic events reported since the Spanish invasion; many of them have been catastrophic, such as the 1976 earthquake, which caused losses amounting to 1.1 billion dollars, more than 22,700 deaths, and 76,000 injured (Espinosa, 1976).

The national seismic network is currently under the direction of Research and Geophysical Services of the Institute of Seismology, Volcanology, Meteorology, and Hydrology (INSIVUMEH) and it is equipped by analogue and digital seismological stations; the network began operating in 1976, after the $M 7.5$ earthquake of 4 February. The number of stations has varied over time, starting with 5 short-period stations; in 2013, 23 stations were operating, 5 are broadband, 5 extended-band, and 13 are short-period instruments (Pinillos, 2018).

According to the earthquake catalogues taken as reference in this study (Fig. 4.24), we estimate that the majority of events of the historical period are located along the volcanic arc, whilst the seismicity is located mainly offshore during the last decades. Note that relevant mislocation problems and uncertainties in magnitude assignment may also affect very recent earthquakes. This is a common feature for the central America region, as the compilation of earthquake catalogues needs to account for the availability of different information. Our work began by gathering reports of the most important seismic events before the instrumental period; for them, it is known that the earthquakes have occurred at a certain time and place,

mación de un arco volcánico que recorre toda Centroamérica; estos movimientos han producido fallas secundarias como las de Mixco, Santa Catarina Pinula, Jalpatagua y Jocotán-Chamelcón (ver Styron *et al.*, 2020).

La conformación sismotectónica dentro del país ha producido eventos sísmicos, que se datan desde la conquista de los españoles; muchos de ellos han sido catastróficos como el sismo de 1976, el cual causó la pérdida de 1,1 billones de dólares, más de 22.700 personas fallecidas y 76.000 heridos (Espinosa, 1976).

La Red Sísmica Nacional está bajo la dirección de Investigación y Servicios Geofísicos del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) la cual cuenta con estaciones sismológicas analógicas y digitales; la red inició sus operaciones en el año 1976, posterior al terremoto del 4 de febrero ($M 7,5$). El número de estaciones ha variado con el tiempo, se inició con 5 estaciones de período corto, en el 2013 se incorporaron 23 estaciones en las que 5 son de banda ancha, 5 de banda intermedia y 13 de período corto (Pinillos, 2018).

Según los catálogos de terremotos tomados como referencia en este estudio (Fig. 4.24), consideramos que la mayoría de los eventos del período histórico se ubican a lo largo del arco volcánico, mientras que la sismicidad está localizada principalmente costa afuera durante las últimas décadas. Debemos tener en cuenta también que los problemas de ubicación incorrecta y las incertidumbres en la asignación de magnitud pueden afectar los terremotos muy recientes. Esta es una característica común para la región de CA, ya que la compilación de catálogos de terremotos cuenta con diferente disponibilidad de información. De hecho, el trabajo comenzó recopilando reportes de los eventos sísmicos más importantes antes de la instrumentación, por lo que se sabe que sucedieron en un tiempo y lugar determinado, pero han sido registrados por personas que no se relacionan en el campo

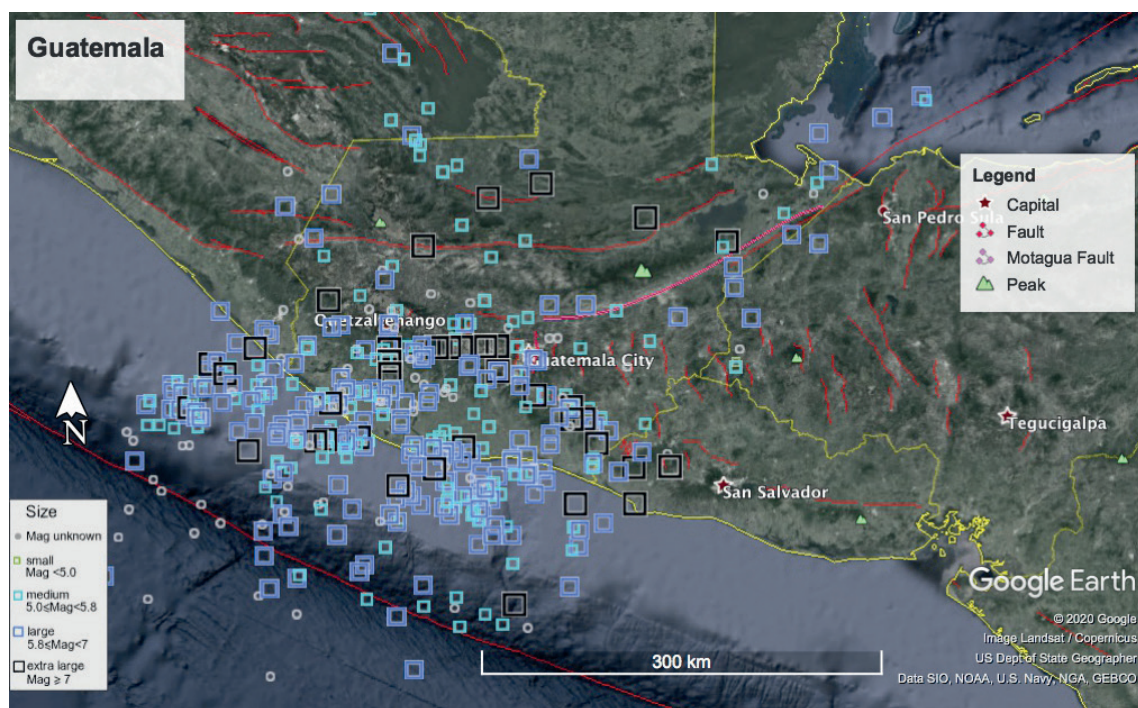


Fig. 4.24 - Epicentral map of the MARCA-GEHN earthquakes falling in an arbitrary polygon that surrounds the territory of Guatemala. The 423 extracted events are represented in Fig. 4.25.

Fig. 4.24 - Mapa de epicentros de los terremotos de MARCA-GEHN que caen en un polígono arbitrario que envuelve el territorio de Guatemala. La evolución temporal de las magnitudes de los 423 extraídos se representa en la Fig. 4.25.

but it should be noted that the description of the damage may have been exaggerated, if these reports were necessary to request financing from the government for rebuilding or repairs. Rigorous works such as those of AMAD996, derive macroseismic information from local and international newspapers, complemented by published and unpublished reports, local and foreign, such as government reports, consular correspondence, meteorological reports, and technical documents.

Works like the one described above allow us to obtain information about the most important earthquakes in the country, as they were the most destructive ones. Note that for other earthquakes, such as those in December 1917 and January 1918, there is accurate and timely information referring to

sísmico; cabe enfatizar que la descripción de los daños fue muy relevante, debido a que eran necesarios estos informes para pedir financiamiento al gobierno y poderlos reconstruir o reparar. Esto dio la pauta para poder interpretar los daños causados y así asignar una escala de intensidad. Trabajos como los de Ambraseys y Adams, 1996 (AMAD996), donde la información macrosísmica fue interpretada a partir de periódicos locales e internacionales, complementados por reportes publicados y no publicados, locales y extranjeros, como reportes del gobierno, correspondencia consular, informes meteorológicos y documentos técnicos, permitieron generar información importante para la época.

Trabajos como los anteriormente descritos, permitieron obtener los sismos que forman parte de la actividad más importante del país, puesto que fueron muy destructivos. Cabe resaltar que

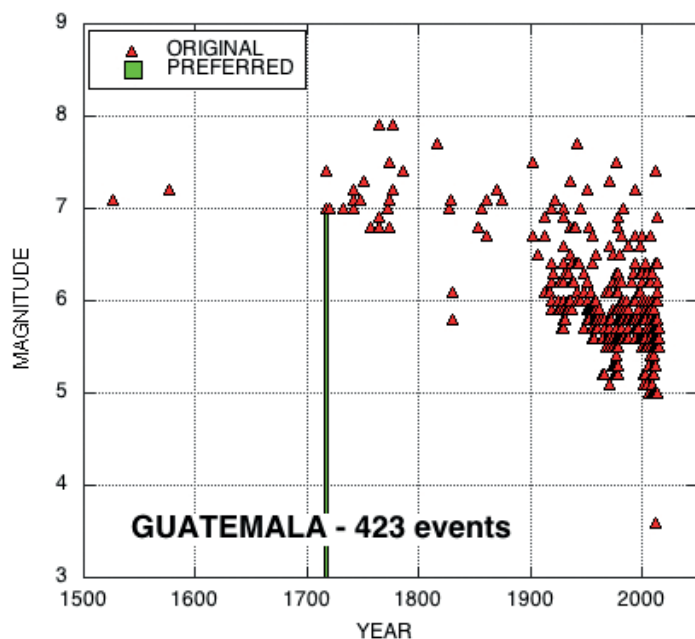


Fig. 4.25 - Graph of the magnitude versus time of the 423 events extracted from the MARCAGEHN catalogue for the territory of Guatemala (see map in the previous figure). Note the decrease in minimum magnitude versus time, according to the completeness rules in the original catalogue. Green squares indicate the events for which a different value of magnitude with respect to the origin catalogue is assigned in the preferred location (see Table 4.3).

Fig. 4.25 - Gráfico de la evolución temporal de magnitud de los 423 eventos extraídos del catálogo MARCA-GEHN para el territorio de Guatemala (ver mapa en la figura anterior). Se evidencia la disminución de la magnitud mínima frente al tiempo, de acuerdo con las reglas de completitud del catálogo original. Los cuadrados verdes indican los eventos para los cuales se asigna un valor de magnitud diferente con respecto al catálogo de origen en la ubicación asignada (ver Tab. 4.3).

the City of Guatemala, but no news coming from the surroundings: it is desirable that future efforts can broaden these pictures, as these events cannot be ruled out.

The earthquakes have been selected as they generated a very large impact on the country, and not on the basis of a threshold of magnitude. There are some events for which very limited information has been collected: MDP sets with less than 3 IDPs are not described or commented on in the text, but they can contribute to the seismic history at a location.

4.2.2. Studied events

For Guatemala, we uploaded macroseismic data sets (more than 2 IDPs) for 12 earthquakes, the majority of which are documented only by historical data (Table 4.3). Note that the most recent event is taken as representative of the far-field amplification due to subduction offshore events: with the 1976 one, they are the only events post 1905 to be given a $M 7+$. They have been selected because it is a priority to reconstruct

de sismos como el de diciembre de 1917 y enero 1918, existe información puntual de la Ciudad de Guatemala, pero no de los alrededores, por lo que se busca ampliar esta información.

Los sismos han sido seleccionados en base al impacto producido y no sobre la base de un umbral de magnitud. Hay algunos eventos para los cuales se ha recopilado información muy limitada: los conjuntos de MDP con menos de 3 IDP no se describen ni comentan en el texto, pero pueden contribuir a la historia sísmica en un lugar.

4.2.2. Eventos estudiados

Para Guatemala, se han ingresado conjuntos de datos macrosísmicos (MDP) para 12 eventos sísmicos, la mayoría de ellos, están documentados solo a nivel histórico (Tab. 4.3). Téngase en cuenta que el evento más reciente publicado en la base de datos se toma como representativo de la amplificación de campo lejano debido a los eventos de subducción costa afuera; el terremoto de el 7 de noviembre 2012, con el de 1976, son los únicos eventos posteriores a 1905

Table 4.3 - List of MDPs entered in MARCA-GEHN for Guatemala. The earthquake parameters usually refer to the origin catalogue: if indicated in round brackets, the Date/Origin Time and Epicentral Area of the origin catalogue has been substituted by a new preferred one, based on the information gathered in this study by means of the IDPs, and by controls on existing literature; magnitude in brackets indicates that a new value is entered as an alternative, preferred parameter. Origin time in the catalogue is given in UTC; sometimes it is given in local time, to be more immediately related to the cited sources. The maximum intensity (*I_{max}*) is given in MM if not differently specified.

Tabla 4.3 - Lista de MDP ingresados en MARCA-GEHN para Guatemala. Los parámetros del terremoto generalmente se refieren al catálogo original, pero en algunos eventos la fecha, hora, magnitud y/o área epicentral han sido sustituidas por otras soluciones preferidas, en base a la información recopilada en este estudio por medio de los IDP, y por los controles de la literatura existente. En estos casos los datos del catálogo original se indican entre paréntesis. La hora origen en el catálogo siempre se proporciona en UTC, si bien en algunos eventos se especifica además la hora local, para facilitar la relación con las fuentes citadas. La intensidad máxima (*I_{max}*) se proporciona en MM si no se indica otra escala diferente.

N	EVENTID	Date	Origin Time	Epicentral Area	Mag	IDP Num	<i>I_{max}</i>	Reloc
1	1717.0929	1717-09-29	not given	(Patzicia) Ciudad Vieja	(7.4) 7.0	21	IX	Y
2	1742.081	1742-08-10	not given	(San Antonio Suchilepequez) San Antonio Suchitepequez	7.1	5	VIII	N
3	1751.0304	1751-03-04	(not given) 8 local 16 UTC	(Compala) San Casimiro	7.3	5	VIII	N
4	1773.0729	1773-07-29	(not given) 21:37 UTC	(Antigua to L. Atitlan) Santa Marta de Santiago	7.5	6	VIII	Y
5	1816.0723	1816-07-23	00:30	([Guatemala]) Huehuetenango	7.7	56	IX	N
6	1830.0503	1830-05-03	not given	[Guatemala]	5.8	6	VII-VIII	N
7	1870.0612	1870-06-12	not given	Chiquimulilla	7.2	6	VIII	Y
8	1902.041902	1902-04-19	02:23	[Guatemala] Quetzaltenango	7.5	54	IX (MSK)	N
9	913739	(1917-12-25) 1917-12-26	not given	[Guatemala]	6.1	71	IX	N
10	717474	1976-02-04	09:01:46	Izbal	7.5	103	IX - IX (ESI)	Y
11	14225163	2010-01-11	23:30:45	Izbal	5.2	30	V (DYFI)	N
12	601879562	2012-11-07	16:35:45	[Pacific Ocean]	7.4	144	VII-VIII	Y

the country’s seismic history. Currently in MARCA-GEHN there are 584 IDPs referring to Guatemalan localities for internal or neighbouring countries’ earthquakes, even if usually the data collection is done for the country where the earthquake was generated.

The review of the MDP sets has covered the identification of the correct geographical location and spelling, to the assignment of a unique code identifier for the locality,

que reciben una *M* 7+. Dado que es prioridad reconstruir la historia sísmica del país, se ha enfatizado en estos eventos para fines del presente trabajo. Actualmente en MARCA-GEHN se cuenta con 584 IDP distribuidos dentro de Guatemala, para eventos que han afectado no solo el país, sino también países vecinos.

La exhaustiva revisión de los sismos, ha ido desde la corrección de la ubicación geográfica, códigos únicos del lugar, bibliografía, hasta la ortografía. Este trabajo es un punto de partida,

and checks on bibliography. This work is nevertheless considered a starting point, to be continued for updates and new entries, in order to have the most complete and reliable as possible macroseismic database.

In the following, a short description of each studied event is given.

The 1717 Ciudad Vieja earthquake

The seismic events of 29 September 1717 are part of a relevant seismic period for the Guatemalan region. Peraldo and Montero (1996) reconstruct the sequence of events on the basis of new documentary sources, found in the Archive of the Indies of Seville (Spain) and implemented by documents from the General Archive of Central America, Guatemala. Archival sources provide, in this case, key information about the physical nature of a cascading sequence of natural events occurring between August and October 1717 in Guatemala.

The seismic activity in 1717 lasted three months, starting on 27 August, and ending on 14 October. In this time span, the authors distinguish the seismic activity as due to three different seismogenic origins:

- 1) a seismic activity that began in late August 1717, connected with an increase of the eruption activity of the Volcan de Fuego;
- 2) the seismic activity of September, hypothesised to be generated by very local cortical faulting;
- 3) the seismic activity of October, generated by a subduction earthquake.

In the evening of 29 September 1717, several large earthquakes inflicted significant damage on Santiago de Guatemala (Antigua) and the surrounding localities, with some loss of life. The seismic sequence was characterised by three major events that occurred at about 15 minutes from each other. The first event, (according to the quoted source, lasting several minutes), was strongly felt

para poder seguir actualizando los eventos, y tener una base de datos macrosísmica lo más completa y confiable posible.

A continuación, se ofrece una breve descripción de cada evento estudiado.

El sismo de Ciudad Vieja en 1717

Los eventos sísmicos del 29 de septiembre de 1717 son parte de un período sísmico relevante para la región guatemalteca. Peraldo y Montero (1996) reconstruyen la secuencia de eventos con base en nuevas fuentes documentales, encontradas en el Archivo de Indias de Sevilla (España) e implementadas por documentos del Archivo General de Centroamérica, Guatemala. Las fuentes de archivo proporcionan, en este caso, una información clave sobre la naturaleza física de una secuencia en cascada de eventos naturales que ocurren entre agosto y octubre de 1717 en Guatemala.

La actividad sísmica en 1717 duró tres meses, comenzando el 27 de agosto y terminando el 14 de octubre. En este lapso de tiempo, los autores distinguen la actividad sísmica debido a tres orígenes sismogénicos diferentes:

- 1) Una actividad sísmica que comenzó a fines de agosto de 1717, relacionada con un aumento de la actividad eruptiva del volcán de Fuego;
- 2) La actividad sísmica de septiembre, hipotéticamente generada por fallas corticales muy locales;
- 3) La actividad sísmica de octubre, generada por un terremoto de subducción.

En la tarde del 29 de septiembre de 1717, varios terremotos grandes causaron daños significativos en Santiago de Guatemala (Antigua) y las localidades circundantes, con algunas pérdidas de vidas. La secuencia sísmica se caracterizó por tres eventos principales que ocurrieron a unos 15 minutos uno del otro. El primer evento, (según la fuente citada, que duró varios minutos), fue fuertemente sentido por la pobla-

by the population but produced no damage; the second event, quite similar to the previous one, with no damage. The third shock involved a wide area of the Guatemalan territory. The most severe damage was reported in Alotenango and Antigua Guatemala, where much of the colonial architecture was destroyed: 3,000 buildings were ruined, including many temples and churches. Outside the capital, the earthquakes were felt on the Costa de Escuintla, about 70 km south of Santiago de Guatemala. The evidence that the earthquakes were not felt in El Salvador, led the authors to define this seismic activity consistent with a local origin.

This type of data has produced a mix of information that induced confusion and misunderstandings in attributing the succession of events; PEMO999 also point out that pre-

ción pero no reportó daños; el segundo evento, bastante similar al anterior, sin daños. El tercer choque involucró un área más amplia del territorio guatemalteco. Los daños más graves se registraron en Alotenango y Antigua Guatemala, donde se destruyó gran parte de la arquitectura colonial: 3.000 edificios resultaron dañados, incluidos muchos templos e iglesias. Fuera de la capital, los terremotos se sintieron en la Costa de Escuintla, a unos 70 km al sur de Santiago de Guatemala. La evidencia de que los terremotos no se sintieron en El Salvador llevó a los autores a definir esta actividad sísmica consistente con un origen local.

Este tipo de datos ha producido una combinación de información que indujo confusión y malentendidos al atribuir la sucesión de eventos; PEMO999 también señala que autores anteriores (Montessus de Ballore, 1888; Grases, 1974)

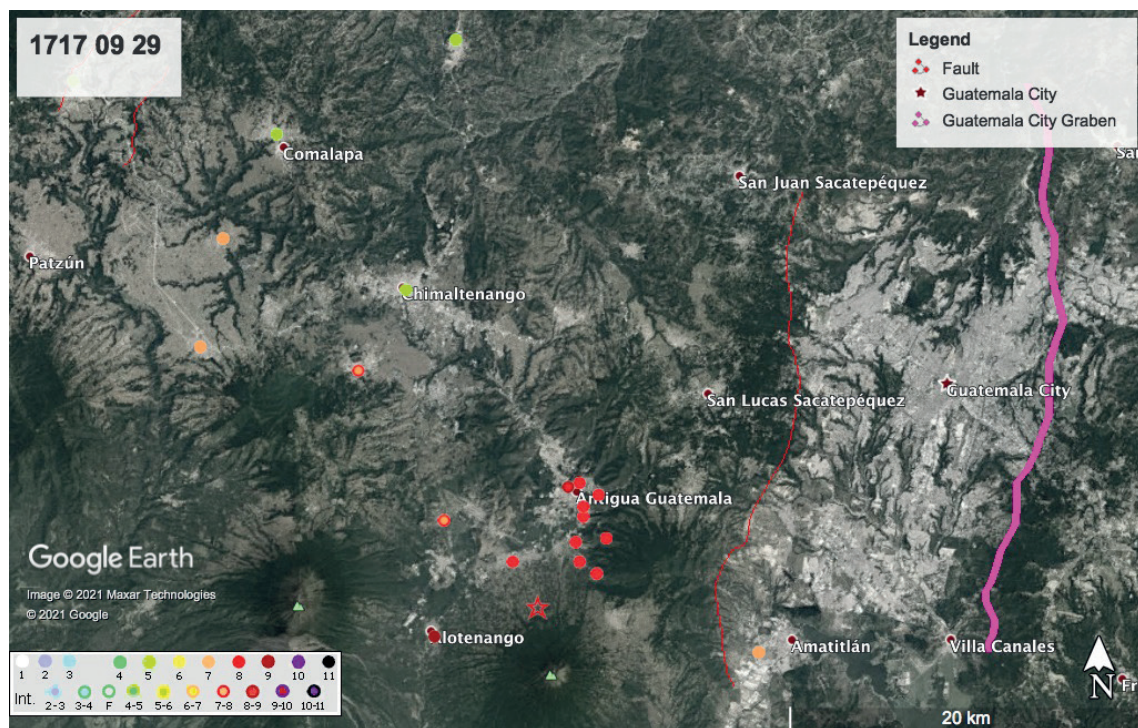


Fig. 4.26 - MDP set for the earthquake of 29 September 1717. The red star shows the location of the origin catalogue, with an epicentre proposed by WHal004.

Fig. 4.26 - Conjunto MDP para el sismo de septiembre 29 en 1717. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen, con epicentro propuesto por WHal004.

vious authors (Montessus de Ballore, 1888; Grases, 1974) have mistakenly attributed the seismic events of September 1717 to the eruption of the Fuego. Conversely, White and Cifuentes (1988) associate the events of 29 September 1717 to subduction sources.

The 21 IDPs collected from this study [MG55 = Peraldo and Montero (1996); Fig. 4.26] are in agreement with the epicentral location given in the origin catalogue GHEC taken from WHal004; a new name has been set in MARCA-GEHN. If a local origin is accepted, the magnitude should probably be lowered, as done for the similar case of 1719, in El Salvador. A preferred magnitude of 7.0 is thus preliminary assigned.

The 1742 San Antonio Suchitepéquez earthquake

The earthquake of 1742 occurred on 10 August, probably again within a complex seismic sequence that affected several countries (see the Comasagua earthquake, in section 4.1.2). PEMO999 refer, according to Feldman's (1988) notes, that the damage to churches and religious temples was reported by the ecclesiastic authorities.

The GHEC catalogue selects the epicentre assigned by WHal004 [the same reported in White and Cifuentes (1988), and by Tanner and Shepherd (1997)], within the country, differently from the third solution cited [Benito and Torres (2009) corresponding to the PEMO999 solution] where it is inferred that the generation of this earthquake is somehow linked to subduction processes. Probably due to a misspelling, the event refers in GHEC to San Antonio Suchilepequez, a town that does not exist. Villagrán *et al.* (1997) also assigns the same magnitude, but its epicentre, although remaining within the country, is located closer to the coast (Fig. 4.27).

The 5 IDPs uploaded to MARCA-GEHN

atribuyeron erróneamente los eventos sísmicos de septiembre de 1717 a la erupción del volcán de Fuego. Por el contrario, White y Cifuentes (1988) asocian los eventos del 29 de septiembre de 1717 a fuentes de subducción.

Los 21 IDP colectados de este estudio (MG55 = Peraldo y Montero, 1996; Fig. 4.26) están de acuerdo con la ubicación epicentral asignada en el catálogo de origen GHEC tomada de WHal004; se ha establecido un nuevo nombre en MARCA-GEHN. Si se acepta un origen local, la magnitud probablemente deba reducirse, como se hizo para el caso similar de 1719, en El Salvador. Se asigna provisionalmente una magnitud preferida de 7.0.

El sismo de San Antonio Suchitepéquez de 1742

El sismo de 1742, ocurrió el 10 de agosto, probablemente dentro de una secuencia sísmica compleja que afectó a varios países (ver el sismo de Comasagua, en la sección 4.1.2); como cita PEMO999, de acuerdo a las notas de Feldman (1988), los daños se presentaron sobre todo en iglesias y templos religiosos, reportados por los encargados de los mismos.

El catálogo GHEC atribuye el epicentro asignado dentro del país, por WHal004 (lo mismo reportado en White y Cifuentes, 1988, y por Tanner y Shepherd, 1997), de manera diferente a la tercera solución citada (Benito y Torres, 2009 que corresponde a la solución de PEMO999) donde se infiere en que fue generado por procesos de subducción. Probablemente por un error ortográfico, el evento se refiere en GHEC a San Antonio Suchilepequez, una localidad que no existe. Villagrán *et al.* (1997), también asigna la misma magnitud pero su epicentro aunque sigue siendo dentro del país; lo ubica más cerca de la costa (Fig. 4.27).

Los 5 IDP cargados en MARCA-GEHN también fueron tomados de WHal004, mostrando una máxima intensidad de VIII.



Fig. 4.27 - MDP set for the earthquake of 10 August 1742. The red star shows the location of the origin catalogue, with an epicentre proposed by WHal004; the few points do not suggest alternative solutions. The coloured pins show locations provided by the sources consulted.

Fig. 4.27 - Conjunto MDP para el sismo de agosto 10 de 1742. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen, con epicentro propuesto por WHal004; los pocos puntos no sugieren soluciones alternativas. Los pines de colores muestran ubicaciones proporcionadas por las fuentes consultadas.

were also taken from WHal004, showing a maximum intensity of VIII.

PEMO999 adds five other locations (Tacuilulá, Siquinilá, San Bartolomé, Santa Ana Mixtán, Escuintla) to the ones reported in WHal004, based on new historical sources. These documents refer to the damage reported by the church of Tacuilulá (Salvador) due to an earthquake, and to the tax exemption request for other places, but the documents do not report the date of occurrence of the earthquake. The authors assess a degree VII to all five locations and, cautiously, place a certain degree of uncertainty on these data. According to the global historical catalogue, these localities could be associated with the 1742 Tucuilula earthquake, with a different epicentre located in

PEMO999 agregan otras cinco ubicaciones (Tacuilulá, Siquinilá, San Bartolomé, Santa Ana Mixtán, Escuintla) al WHal004, con base en nuevas fuentes históricas. Estos documentos se refieren al daño reportado en la iglesia de Tacuilulá debido a un terremoto y a la solicitud de exención de impuestos para otros lugares, pero los documentos no reportan ninguna fecha de ocurrencia del terremoto. Los autores evalúan un VII en las cinco grado ubicaciones y, cuidadosamente colocan un cierto grado de incertidumbre en este dato. Según el GHEC, estas localidades podrían estar asociadas con el terremoto de Tucuilula de 1742. PEMO999 también relaciona el evento a subducción, ya que los pueblos afectados se encuentran del lado del arco volcánico, su epicentro se posiciona fuera de la costa.

San Salvador. In addition, PEMO999 relates the event to subduction, since the affected villages are on the side of the volcanic arc: its epicentre positions is off the coast.

Additional research is needed to reinforce their assumptions; according to the damage distribution, we can only state an epicentre onland, thus following the solution proposed by WHal004.

The 1751 San Casimiro earthquake

This earthquake affected the ancient city of Santiago de los Caballeros (Antigua Guatemala). The event has a record of 5 IDPs, taken from the same source as the previous event (White *et al.*, 2004).

PEMO999 cites many sources for this earthquake that describe the event; starting

Se resalta la necesidad de fortalecer esta aseveración. De acuerdo a los daños ocasionados y su ubicación, solo permite reforzar la teoría de que el epicentro fue dentro del país, siguiendo así la solución propuesta por WHal004.

El sismo de San Casimiro, 4 de marzo de 1751

Este sismo afectó la antigua ciudad de Santiago de los Caballeros (Antigua Guatemala). El evento tiene registro de 5 IDP, tomado de la misma fuente que el evento anterior (White *et al.*, 2004).

PEMO999 cita muchas fuentes que describen el evento; iniciando a las 8 horas de la ma-

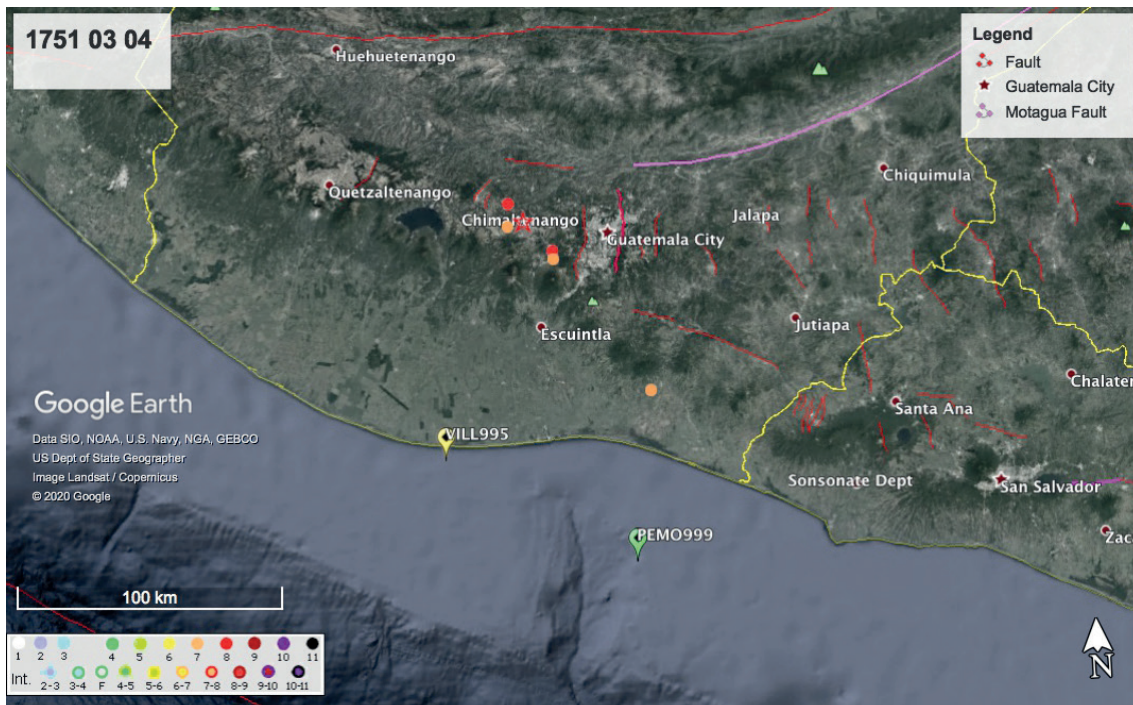


Fig. 4.28 - MDP set for the San Casimiro earthquake, occurred on 4 March 1751. The red star shows the location of the origin catalogue, with the epicentre proposed by WHal004; the few points do not suggest alternative solutions. The colored pins show locations provided by the sources consulted.

Fig. 4.28 - Conjunto MDP para el sismo de San Casimiro, ocurrido el 4 de marzo de 1751. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo original, con el epicentro propuesto por WHal004; los pocos puntos no sugieren soluciones alternativas. Los pines de colores muestran las ubicaciones proporcionadas por las fuentes consultadas.

at 8 a.m. local time, the earthquake damaged the cathedral, churches and numerous houses. In addition, archive sources quoted by Feldman (1988) reported damages in Guazacapán, Santa Rosa.

Similarly to the previous event, three sources were cited in GHEC; the solution chosen by WHal004 is the same one adopted by White and Cifuentes (1988) and Tanner and Shepherd (1997), with an assigned magnitude of 7.3; conversely, Benito and Torres (2009) set the magnitude at 7.2, and take the same epicentre given by PEMO999, off the Pacific coast. Villagrán *et al.* (1997) proposes another location to the epicentre, closer to the Pacific coast. Even if different locations have been assigned (onland, offshore), all the sources agree in assigning the earthquake to the subduction zone. We acknowledge the need to study in a more detailed way the pattern of the damage caused by this event: the epicentre proposed by WHal004 (see Fig. 4.28, red star) is retained until new data are entered. A new epicentral area name, and an approximate origin time is entered in MARCA-GEHN.

The 1773 Santa Marta de Santiago de los Caballeros earthquake

The earthquake of 1773, according to WHal004, was considered “the most traumatic in the history of all of Central America”, destroying churches, houses and important buildings. It had a very negative effect by destroying or severely affecting the churches of the central-southern area of the country. PEMO999 describes that the event started at 9:37 p.m. (UTC); one minute of duration of the shaking was reported. Both the sources agree that in the first 2 seconds, the buildings collapsed. WHal004 reports that about 500-600 people died immediately, and more than 600 died later. It should be noted that the city had been affected by a

ñana hora local, el mismo que dañó la Catedral, iglesias y numerosas casas. Además, fuentes de archivos en Feldmann (1988) reportaron daños en Guazacapán y Santa Rosa.

Similar al evento previo, tres fuentes fueron citadas en GHEC, la solución elegida por WHal004 es la misma adoptada por White y Cifuentes, 1988, Tanner y Shepherd, 1997 y con una magnitud asignada de 7.3; en tanto Benito y Torres (2009), con una magnitud menor de 7.2, toma el mismo epicentro que PEMO999 fuera de las costas del Pacífico. Villagrán *et al.* (1997) propone otra ubicación al epicentro, más cercana a las costas del pacífico. Incluso si diferentes localizaciones han sido asignadas (en tierra, fuera de la costa) todos los fuentes asignan el terremoto a la zona de subducción. Se recalca la necesidad de estudiar el patrón de los daños ocasionados: el epicentro propuesto por WHal004 (ver Fig. 4.28, estrella roja) se mantiene hasta que nueva información sea ingresada. Un nuevo nombre de área epicentral y un tiempo origen aproximado se ingresan en MARCA-GEHN.

El sismo de Santa Marta de Santiago de los Caballeros del 29 de julio de 1773

El sismo de 1773, de acuerdo a WHal004, fue considerado como “el más traumático de la historia de toda Centroamérica”, destruyendo iglesias, casas y edificios importantes. Tuvo un efecto muy negativo al destruir o afectar de manera severa las iglesias del área Centro-Sur del país. Se reportó con una duración de un minuto. PEMO999 describe que el evento inició a las 21:37 (hora UTC). Además ambos coinciden en que en los primeros 2 segundos, las edificaciones colapsaron. WHal004 reporta que alrededor de 500-600 personas murieron inmediatamente y más de 600 murieron después. Cabe destacar que la ciudad había sido afectada por una secuencia de fuertes terremotos en los años pre-

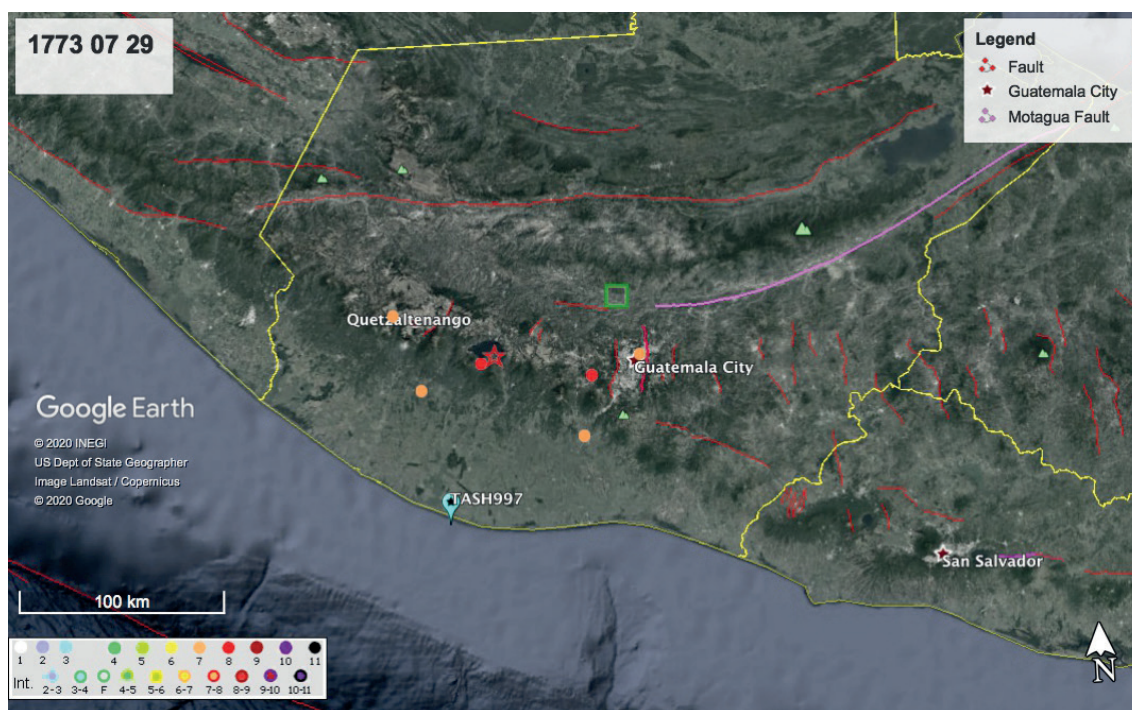


Fig. 4.29 - MDP set for the earthquake of 29 July 1773. The red star shows the epicentre proposed by the origin catalogue GHEC (WHal004): the preferred location (green square) is the one proposed by PEMO999, that hypothesise an origin of this event on the Polochic-Motagua fault.

Fig. 4.29 - Conjunto MDP para el sismo de 1773. La estrella roja muestra el epicentro propuesto por el catálogo original GHEC (WHal004): la ubicación preferida (cuadrado verde) es la propuesta por PEMO999, que hipotetiza un origen de este evento en la falla Polochic-Motagua.

series of strong earthquakes in the previous years, which probably made the city more vulnerable. This earthquake was responsible for the moving of the capital of Guatemala, from Santiago de los Caballeros to its current location.

For this event 6 IDPs were collected, using WHal004 as reference study.

WHal004, Benito and Torres (2009), and White and Cifuentes (1988) agree in suggesting the epicentre in the vicinity of Lake Atitlán; Tanner and Shepherd (1997) and Villagrán *et al.* (1997) propose an epicentre nearby the Pacific coast (Fig. 4.29).

PEMO999 describes the ground shaking in Santiago as “extremely abrupt and impetuous”, which suggests a moderate to short distance of this city from the focus of

vios, lo cual hizo más vulnerable a la ciudad, y este sismo fue el responsable del traslado de la capital de Santiago de los Caballeros hacia la actual capital del país.

Para este evento se registraron 6 IDP, usando WHal004 como estudio de referencia.

WHal004, Benito y Torres (2009), y White y Cifuentes (1988) concuerdan con el epicentro propuesto en las cercanías del lago de Atitlán: en cuanto a Tanner y Shepherd, 1997 y Villagrán *et al.* (1997) proponen su ubicación en la costa del Pacífico (Fig. 4.29).

PEMO999 describe “el movimiento del suelo en Santiago fue sumamente brusco e impetuoso, lo que hace pensar que esta ciudad estaba ubicada a una distancia epicentral de moderada a corta”, además explica que para la actividad sísmica de ese tiempo, la falla Polochic-Mota-

the earthquake: they also suggest that the seismic activity of this event and its predecessor should be attributed to the active Polochic-Motagua fault. Conversely, White and Cifuentes (1988) and WHal004 suggest that this earthquake had a subduction origin. In this case we retain the solution proposed by PEMO999, as they collected additional information (General Archive of the Indies, Guatemala, leg. 658), in addition to the information consulted by WHal004.

The 1816 Huehuetenango earthquake

According to White (1985), this is the largest onland earthquake in the seismic history of Guatemala that was caused by the rupture of the Chixoy-Polochic fault, the main feature at the junction of the North American and Caribbean plates. Damage was detected up to San Cristóbal las Casas, Chiapas, Mexico, with a total length of the fault rupture that could have been up to 240 km long, with surface slip up to 3-5 m (Authemayou *et al.*, 2012).

White (1985) describes the damage, the highest intensities (IX MM) located more than 30 to 45 km north of the fault, in the Soloma area; all the churches, enclosures of the priests, mayors houses collapsed: 23 people died, 57 landslides occurred that buried farms and crops. Further west, damage was referred to San Cristobal las Casas, Chiapas, Mexico (IDPs not included in the macroseismic data set uploaded in the database), where the old bell tower and central arches of the cathedral were severely damaged.

In addition, PEMO999 explains that after the event, two types of seismic events were recognised in the west of the country: a) aftershocks of tectonic origin near Quetzaltenango, which could be due to secondary fault failures, and b) seismic activity of the Cerro Quemado volcano, which

guerra estuvo activa y se le atribuye la generación de este evento y de eventos predecesores. White y Cifuentes (1988) y WHal004 sugieren que este sismo fue de subducción. En este caso proponemos la solución de PEMO999, ya que además de la información que consultó WHal004, se recabó información adicional (Archivo General de Indias, Guatemala, leg. 658), incluyendo nueva ubicación del epicentro.

El sismo de Huehuetenango de julio 23 de 1816

De acuerdo a White (1985), este evento se cataloga como el terremoto en tierra más grande de la historia sísmica de Guatemala; se dio por fracturamiento de la parte central y probablemente occidental de la falla Chixoy-Polochic, que es conformada por la unión de las placas de Norteamérica y del Caribe. Los daños se pudieron evidenciar hasta San Cristóbal las Casas, Chiapas, México. Registra que la longitud de ruptura pudo ser de 240 km, además considera un desplazamiento superficial de 3 a 5 metros (Authemayou *et al.*, 2012).

White (1985) describe los daños, siendo estos los mayores, de 30 a 45 km al norte de la falla en el área de Soloma con intensidad IX MM; todas las iglesias, recintos de los sacerdotes, y de alcaldes casas colapsaron; 23 personas fallecieron, ocurrieron 57 deslizamientos de ladera que enterraron granjas y cultivos. Más al oeste, la mayoría de daños se reportaron en San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México (no incluidos en los IDP de MARCA-GEHN), donde la antigua torre de la campana y arcos centrales de la catedral fueron severamente dañados. Además PEMO999 explica que pasado el evento, se reconocieron dos tipos de eventos sísmicos al occidente del país; a) réplicas de origen tectónico cerca de Quetzaltenango, que pudiera ser por fallamiento secundario y b) actividad sísmica del volcán Cerro Quemado, que provocaron daños en el pueblo de Almolonga.

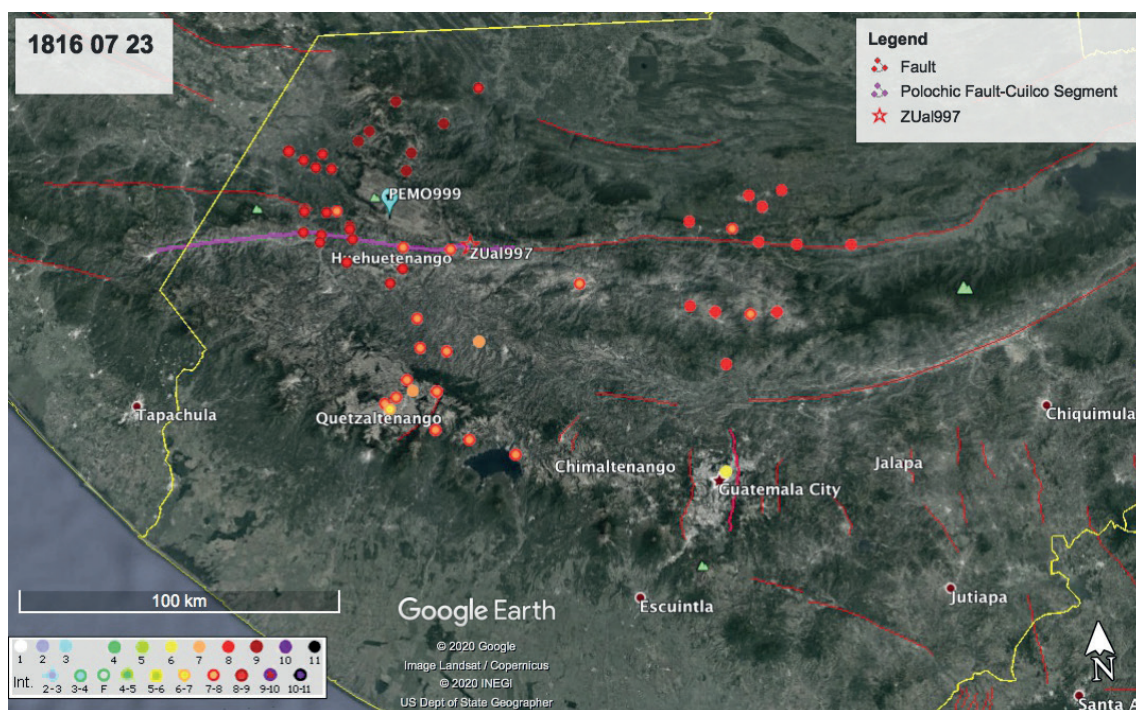


Fig. 4.30 - MDP set for the earthquake of 23 July 1816. The red star shows the epicentre proposed by White (1985) and Zúñiga *et al.* (1997), the light blue pin represents the location of the epicentre proposed by PEMO999. IDPs show the distribution of the most intense damage to the west of the country. Fault traces and name derive from Styron *et al.* (2020).

Fig. 4.30 - Conjunto MDP para el sismo de 1816. La estrella roja ubica el epicentro propuesto por White, 1985 and Zúñiga *et al.*, 1997, el indicador azul representa la ubicación del epicentro propuesto por PEMO999. Los IDP muestran la distribución de los daños de mayor intensidad hacia el oeste del país. Los rastros de fallas y el nombre derivan de Styron *et al.*, 2020.

caused damage in the town of Almolonga.

The uploaded IDPs are 56, which are distributed to the west of the country, reporting maximum intensities of IX in the department of Huehuetenango. The magnitude reported by most of the references is around 7.7 (White, 1985; Villagrán *et al.*, 1997; Zúñiga *et al.*, 1997), with epicentral location in the department of Huehuetenango and nearby the main fault trace; PEMO999 and Benito and Torres (2009) move the epicentre slightly northwards of the fault, but always in the same department (see Fig. 4.30).

We maintain the location proposed by White (1985), acknowledging the need for extending the collection of data beyond the Guatemala borders. In the brief review of

Los IDP identificados fueron 56, los cuales están distribuidos hacia el oeste del país, reportando intensidades máximas de IX en el departamento de Huehuetenango. La magnitud reportada por la mayoría de la bibliografía es cerca de 7,7 (White, 1985; Villagrán *et al.*, 1997; Zúñiga *et al.*, 1997), la ubicación epicentral de White (1985) se encuentra en el departamento de Huehuetenango cerca de la falla principal; PEMO999 y Benito y Torres (2009) ubican el epicentro al norte de la falla siempre en el mismo departamento (ver Fig. 4.30).

Proponemos seguir utilizando la ubicación de White (1985), reconociendo la necesidad de extender la recolección de datos fuera de las fronteras de Guatemala. En la consulta de fuentes de este trabajo, la discrepancia en la fe-

sources done for this work, the discrepancy in the date (22 July for local reports, 23 in GHEA) is generated only by the use of local or UTC time: the utilisation of the Saint of the day - Maria Magdalena - in the colloquial reference of that earthquake, is thus motivated. Two other events of the 19th century, felt in the Santa Rosa department and represented by small MDP sets (<7 IDPs), are briefly presented later on, in the chapter on special cases.

The 19 April 1902 earthquake

This event occurred during an intense period of seismic and volcanic activity along the coast of Guatemala and El Salvador, described for some tsunami consequences in chapter 4.1.3.2. The earthquake destroyed several towns located in the departments of Quetzaltenango, Sololá, San Marcos, Totonicapán, Chimaltenango, reaching intensities up to IX MSK, according to AMAD996, the main source used (reference code MG17 in the online database). The rumble lasted approximately 40 seconds and the shaking was strongly felt up to large distances (e.g. Puerto Barrios on the Atlantic coast, and Comayagua in Honduras with intensities V-VI). In general, the damage along the Pacific coast were not as large as the ones generated in the highlands.

The number of people that died from the earthquake is uncertain, but, nonetheless, very high, with 200 casualties quoted by ERN-CAPRA (2009) project and up to 1500 reported by AMAD996 (in the district of Quetzaltenango around 500 people, and in San Pedro Sacatepéquez 49); we set an intermediate value of 800 in the database, but more investigations are needed on this subject.

Landslides and soil failures were reported in different locations; the railroads between Retalhuleu and the Port of Champerico, and

cha (22 de julio para informes locales, el 23 en GHEA) es generado sólo por el uso de la hora local o UTC: la referencia local de la Santa Patrona del día - María Magdalena - en la referencia coloquial de ese terremoto, ayuda a corroborar la fecha. Otros dos eventos del siglo XIX, sentidos en el departamento de Santa Rosa y representados por pequeños conjuntos de MDP (<7 IDP), se presentan brevemente más adelante, en el capítulo de casos especiales.

El sismo del 19 de abril de 1902

Este evento ocurrió durante un periodo intenso de actividad sísmica y volcánica a lo largo de la costa de Guatemala y El Salvador, descrita por alguna consecuencia de tsunamis en el capítulo 4.1.3.2. El sismo que destruyó varios pueblos localizados en los departamentos de Quetzaltenango, Sololá, San Marcos, Totonicapán, Chimaltenango, alcanzado intensidades de hasta IX MSK, de acuerdo a Ambraseys y Adams, 1996, la fuente principal utilizada (código de referencia MG17 en la base de datos en línea). El estruendo duró aproximadamente 40 segundos y la sacudida fue fuertemente sentida a largas distancias (ej. Puerto Barrios en la costa Atlántica, y Comayagua en Honduras con intensidades V-VI). En general los daños a lo largo de la costa Pacífica no fueron tan grandes como los generados en las tierras altas.

El número de personas que murieron por el terremoto es en gran parte incierta, pero considerable, con 200 bajas citadas por el proyecto ERN-CAPRA (2009), alrededor de 1500 reportadas por Ambraseys y Adams, 1996 (en el distrito de Quetzaltenango alrededor de 500 personas, y en San Pedro Sacatepéquez 49); estimamos un valor intermedio de 800 en la base de datos, sin embargo, más investigaciones son necesarias para este tema.

Deslizamientos de ladera y fallas en el suelo fueron reportadas en diferentes localidades; las vías del ferrocarril entre Retalhuleu y el Puerto



Fig. 4.31 - MDP set for the earthquake of 19 April 1902. The red star shows the epicentre of the original catalogue, maintained in this study. Coloured pins show other solutions mentioned by the sources.

Fig. 4.31 - Conjunto MDP para el sismo de 1902. La estrella roja muestra el epicentro del catálogo original, mantenido en este estudio. Los indicadores de colores muestran otras soluciones mencionadas por las fuentes.

between Ocos and Coatepec were interrupted for collapse of bridges and damage to the tracks; the railroad between Guatemala City and the port of San José was not affected (AMAD996).

Additional contemporary sources have been considered too, namely Eisen (1903) (MG21), and Rockwell (1902). Eisen (1903) reports that the quake was felt throughout Central America, till southern Mexico, and describes that the most destructive sites are between Quetzaltenango and San Marcos. He also suggests that the extensive damage to the houses may be due to structural weaknesses, as the rock used for construction in Quetzaltenango is very fragile, and it “can be crushed between the fingers or the foot”. Despite suggesting that the seismic wave could have come from the ocean, hundred

de Champerico, y entre Ocos y Coatepec fueron interrumpidas por el colapso de puentes y daños en los caminos; las vías entre la ciudad de Guatemala y el puerto de San José no fueron afectadas (AMAD996). Fuentes contemporáneas adicionales han sido consideradas también como Eisen, 1903 (MG21), y Rockwell, 1902. Eisen reporta que el terremoto se sintió a través de toda América Central, hasta el Sur de México, y describe que los sitios más afectados están entre Quetzaltenango y San Marcos; también sugiere que el daño extenso de las casas puede ser debido a las debilidades estructurales, como la roca utilizada para la construcción en Quetzaltenango que es muy frágil, y “puede ser destruida de entre los dedos o los pies”. A pesar de que sugiere que la onda sísmica podría provenir del océano, a cien millas de distancia en la costa, recalca que no hay nada que lo acredite,

miles away in the offshore, he also claims that there is nothing to prove it, and assigns the epicentre near the major observed damage, that is between Quetzaltenango and San Marcos.

The eruption of the Santa Maria volcano is attributed to this event (Williams and Self, 1983).

The MDP we compiled has 53 IDPs in MSK scale, and 1 additional point in ESI scale, derived from the search on tsunami effects [Fernández (2002) quoted as MG70], previously mentioned in chapter 4.1.3.2. The epicentral location selected from the GHEC [taken from Enghdal and Villasenor (2002)] addresses a subduction-interface earthquake near the Pacific coast: no constraints on depth are available. Conversely, AMAD001, in agreement with AMAD996 and Eisen (1903), put it in the western highlands; WHal004 and Zuniga *et al.* (1997) further west in the department of San Marcos, in agreement with the widespread geological effects. By reckoning that a more detailed analysis of the earthquake sequence is needed, we maintain the original parameters, by changing only the name of the epicentral area to acknowledge the distribution of damage.

The seismic sequence of 1917 - 1918

Starting from November 1917 to January 1918, Guatemala City was shaken by a series of moderate earthquakes that caused considerable damage. The total number of deaths in the city was about 600 (Saville, 1919). The so-called 25 December 1917 earthquake [see Table 4.4 for comparison of earthquakes origin times, as derived from Saville (1919), and ISC bulletins, (ISCxx in Appendix 1)] destroyed or seriously damaged about 40% of the houses in the city. Other large earthquakes occurred on 29 December 1917, 4 and 25 January 1918. Plafker (1976) describes the seismic

y asigna el epicentro cercano a los mayores daños observados, es decir, entre Quetzaltenango y San Marcos.

La erupción del volcán de Santa María es atribuida a este evento (Williams y Self, 1983). El conjunto MDP que compilamos tiene 53 IDP en la escala MSK, y 1 punto adicional en escala ESI, derivada de la búsqueda en los efectos del tsunami (Fernandez, 2002; MG70), previamente mencionada en el capítulo 4.1.3.2. La localización epicentral seleccionada del GHEC (tomada de Enghdal y Villasenor, 2002) aborda un terremoto de subducción cerca de la costa del Pacífico: no hay restricciones de profundidad disponibles. Por el contrario Ambraseys y Adams, 2001 (AMAD001 en Fig. 4.31), en concordancia con AMAD996 y Eisen, 1903, lo ubican en las tierras altas occidentales; WHal004 y Zuniga *et al.* (1997), más al oeste en el departamento de San Marcos, de acuerdo con los efectos geológicos generalizados. Considerando que se necesita un análisis más detallado de la secuencia del terremoto, mantene-mos los parámetros originales, cambiando solo el nombre del área epicentral para reconocer la distribución de los daños.

La secuencia sísmica de 1917 - 1918

A partir de noviembre de 1917 hasta enero de 1918, la ciudad de Guatemala fue sacudida por una serie de terremotos moderados que causaron daños considerables. El número total de muertes en la ciudad fue de aproximadamente 600 (Saville, 1919). El llamado terremoto del 25 de diciembre de 1917 (consulte la Tabla 4.4 para obtener un tiempo origen del terremoto más confiable, según se deriva de Saville, 1919, y de los boletines del ISC, ISCxx en Apéndice 1) destruyó o dañó gravemente alrededor del 40% de las casas, en la ciudad. Otros grandes terremotos ocurrieron el 29 de diciembre de 1917, el 4 de enero y el 25 de enero de 1918. Plafker (1976)

Table 4.4 - Main events of the 1917-1918 earthquake sequence in Guatemala; local time is given according to Saville (1919), other parameters taken from original bulletins (formerly Bulletin of the British Association Seismology Committee, and since 1918 then International Seismological Summary, see ISCxx in Appendix 1). The fourth shock has been referred to as “lasted a minute and a half”.

Tabla 4.4 - Principales eventos de la secuencia del terremoto de 1917-1918 en Guatemala; la hora local se da de acuerdo con Saville (1919), otros parámetros tomados de los boletines originales (anteriormente Boletín del Comité de Sismología de la Asociación Británica, luego, Resumen Sismológico Internacional desde 1918, ver ISCxx en el Apéndice 1). Al cuarto choque se le conoce como el que “duró un minuto y medio”.

Local Time	Delta Time	UTC Time	EVENTID	Lat Lon	Mag
1917/12/25 22:35	06:46	1917/12/26 05:21:00	913738	10.5000 -91.0000	
1917/12/25 ~23:05	07:13	1917/12/26 06:18:10	913739	10.5000 -91.0000	
1917/12/27 03:00		not reported in ISC	Bulletin		
1917/12/28 14:30	08:30	1917/12/29 22:50:40	913745	15.5919 -96.4872	7.0/7.5
1918/01/03 22:45	05:45	1918/01/04 04:30:05	913026	10.5000 -91.0000	
		1918/01/04 04:32:25	913027	10.5000 -91.0000	
1918/01/24 19:25	05:55	1918/01/25 01:20:30	913044	12.0000 -95.5000	

sequence as reported by Vassaux (1969); Amatitlán, Antigua Guatemala, and Villa de Guadalupe, sustained more damage than Guatemala City in the initial phase of the seismic sequence (November); for the following shocks, the sources report only the damage suffered by Guatemala City.

Considering the relevance of such a sequence, and the capacity of the contemporary surveys to detect site amplification inside the urbanised area, we have uploaded an MDP set with 71 IDPs, taken from Taracena Flores (1970). Note that in this case intensity values are assigned basically referring to individual buildings, and the site coordinates and codes (SITEIDs) inferred from coeval city maps. In addition, the damage accumulation due to the long-lasting sequence can alter the global image. For these reasons, this event will be described in detail in the special cases section 4.2.3.1.

The 4 February 1976 earthquake

The literature on this earthquake is vast, the 4 February 1976 earthquake being the most damaging event occurring in

describe la secuencia sísmica según lo informado por Vassaux (1969); Amatitlán, Antigua Guatemala y Villa de Guadalupe, sufrieron más daños que la ciudad de Guatemala en la fase inicial de la secuencia sísmica (noviembre); para los siguientes eventos, las fuentes informan sólo del daño sufrido por la ciudad de Guatemala.

Considerando la relevancia de tal secuencia, y las potencialidades de los estudios contemporáneos para detectar la amplificación del sitio dentro de la zona urbanizada, también hemos estudiado este conjunto de MDP con 71 IDP, tomados de Taracena Flores (1970). Téngase en cuenta que en este caso los valores de intensidad se asignan básicamente en referencia a edificios individuales, y las coordenadas y códigos del sitio (SITEID) inferidos de mapas de ciudades de la misma época. Además, la acumulación de daño debido al enjambre prolongado puede alterar la imagen global. Por estas razones, este evento se describe en detalle en la sección de casos especiales 4.2.3.1.

El terremoto del 4 de febrero de 1976

La literatura sobre este terremoto es enorme, siendo el terremoto del 4 de febrero de 1976 el evento más dañino ocurrido en Guatemala

Guatemala in the last century (Fig. 4.32a; e.g. see the references quoted by the source catalogue ISC at <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?evid=717474>). Only a brief presentation will be given here, as a state-of-the-art of knowledge for such a relevant earthquake is beyond the scope of this work. About 23,000 people were killed and 75,000 were wounded, it was estimated that some 258,000 houses were destroyed and 1.2 million people homeless (Naciones Unidas - Consejo Económico y Social, 1976).

The area of maximum damage is located in the Guatemala and Zacapa departments, where the city of Gualan was almost completely destroyed, and surface faulting was observed. Official disaster reports indicate that in the Department of Chimaltenango, 13 of the 16 existing municipalities were entirely destroyed. In the Mixco area, in the Guatemala Department, the heavy damage was associated with secondary faulting.

The structural damage was often increased by the contemporaneous triggering of large landslides, surface faulting, and liquefactions. Given the extension of the effects produced by the event of 4 February, the survey of damages was carried out mainly by cars and helicopters, and by the collection of macroseismic questionnaires sent to the most remote areas (Espinosa *et al.*, 1976).

The MDP set uploaded here is derived from the compilation of the “USGS Atlas Shakemap” [USGS (1976), quoted by MG37 in the online database], that utilizes the contemporary technical reports by Espinosa (1976) and Espinosa *et al.* (1976). It has been integrated by original press sources to cover some localities, especially in Honduras [Rodríguez García (2019), referred as MG33]. There are 102 IDPs in MM scale, and one site for which the ESI

en el último siglo (Fig. 4.32a; ver las referencias citadas por el catálogo de fuentes ISC en <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?evid=717474>). Aquí sólo se dará una breve presentación, ya que está fuera del alcance de este trabajo un estado del conocimiento del arte de tal terremoto. Cerca de 23.000 personas murieron y 75.000 resultaron heridas, se estimó que unas 258.000 casas fueron destruidas y 1,2 millones de personas resultaron sin hogar (Naciones Unidas-Consejo Económico y Social, 1976).

El área de mayor daño se ubica en los departamentos de Guatemala y Zacapa, donde la ciudad de Gualán fue casi completamente destruida, observándose también fallas superficiales. Los informes oficiales de desastres (asistencia de la ONU) indican que en el departamento de Chimaltenango, 13 de los 16 municipios existentes, fueron totalmente destruidos. En el área Mixco, en el Departamento de Guatemala, los fuertes daños estuvieron asociados a fallas secundarias.

El daño estructural a menudo se incrementó por la activación contemporánea de grandes deslizamientos de ladera, fallas en la superficie y licuefacciones. Dada la extensión de los efectos producidos por el evento del 4 de febrero, el levantamiento de daños se llevó a cabo principalmente con autos y helicópteros, y por la recolección de cuestionarios macrosísmicos enviados a los sitios más externos (Espinosa *et al.*, 1976).

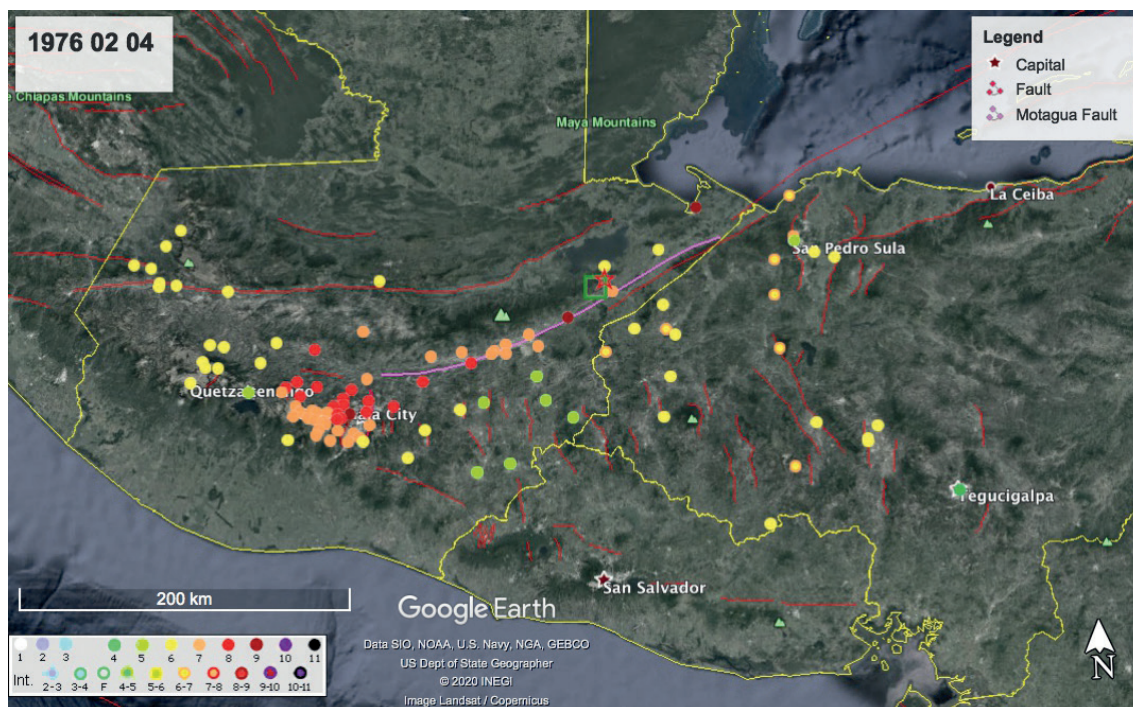
El conjunto MDP aquí cargado se deriva de la compilación del “USGS Atlas Shakemap” [USGS (1976), citado como MG37 en la base de datos en línea] que utiliza la informes técnicos contemporáneos de Espinosa (1976), y Espinosa *et al.*, 1976. A su vez se han integrado fuentes de prensa originales para cubrir algunas localidades, especialmente en Honduras [Rodríguez García (2019), citado como MG33]. Hay 102 IDP en la escala MM y un sitio para el que también se ha evaluado la intensidad ESI (Puer-



Fig. 4.32 - Earthquake of 4 February 1976: a) images and news on local press; b) MDP set: the red star and the green open square indicate the location of the original and preferred epicentre (taken from Yoshida, 1995).

Fig. 4.32 - Terremoto del 4 de febrero de 1976. a) Imágenes y noticias en prensa local. b) Conjunto MDP. La estrella roja y el cuadrado verde abierto indican la ubicación del epicentro original y preferido (tomado de Yoshida, 1995).

a)



b)

intensity has been evaluated too (Puerto Barrios, see Fig. 4.32b).

The location of surface ruptures and instrumental data indicate that the 4 February 1976 earthquake was a tectonic shallow earthquake, generated mainly by the slip on the Motagua fault (Plafker, 1976; Bucknam *et al.*, 1978). The main fault was identified in a discontinuous line, for 240 km in the Motagua Valley and west of the valley. Note that the Motagua fault trace [segment in pink, referred to as CA_26 in Styron *et al.* (2020)] is given a sinistral strike-slip with slip rate of 14-22 mm/yr (Franco *et al.*, 2012); a subparallel segment is mapped for about 110 km, eastwards of the 1976 epicentre (CA_27, taken from unpublished work). Several N-to NE-trending secondary fault breaks were identified in the Mixco area, the so-called Mixco system. Among these, the reactivation of an at least 21 km length segment has been observed (Plafker, 1976; Langer and Bollinger, 1979). Updated source inversion (e.g. Young *et al.*, 1989; Yoshida, 1995) suggested a complex source with asymmetric bilateral rupture extending eastwards and westwards along the Motagua fault, with the largest episode of moment release occurring ~90 km west of the epicentre, near a change in strike in the surface faulting. The preferred epicentral location is taken from Yoshida (1995). It is worth mentioning, however, that for such a magnitude, the point source approximation represents the starting point of the rupture only.

The 11 January 2010 earthquake

On 11 January 2010 an $M_w \sim 5$ earthquake occurred at the Guatemala-Honduras border. The focal mechanism (left lateral strike-slip on an ENE-WSW high angle fault) and hypocentral location are compatible with the activation of a limited patch of the Motagua

to Barrios, ver Fig. 4.32b).

La ubicación de las rupturas superficiales y los datos instrumentales indican que el terremoto del 4 de febrero de 1976, fue un terremoto tectónico poco profundo, generado principalmente por el deslizamiento en la falla de Motagua (Plafker, 1976; Bucknam *et al.*, 1978). La falla principal se identificó en una línea discontinua, por 240 km en el Valle de Motagua y al oeste del valle. Téngase en cuenta que la traza de la falla de Motagua (segmento en rosa, denominado CA_26 en Styron *et al.*, 2020) tiene un desplazamiento sinistral con una tasa de deslizamiento de 14-22 mm/año (Franco *et al.*, 2012); se mapea un segmento subparalelo de unos 110 km al este del epicentro de 1976 (CA_27, tomado de un trabajo no publicado). Se identificaron varias rupturas de fallas secundarias con tendencia NNE en el área de Mixco el llamado sistema de Mixco. Entre estos, se ha observado la reactivación de un segmento de al menos 21 km de longitud (Plafker, 1976; Langer y Bollinger, 1979). La inversión actualizada de la fuente (p. ej., Young *et al.*, 1989; Yoshida, 1995) sugirió una fuente compleja con ruptura bilateral asimétrica que se extiende hacia el este y el oeste a lo largo de la falla de Motagua, con el episodio más grande de liberación de momento ocurriendo ~90 km al oeste del epicentro, cerca de un cambio de rumbo en la superficie de falla. La ubicación epicentral preferida la toma la solución proporcionada por Yoshida, 1995. Cabe mencionar que el epicentro únicamente indica el punto de inicio de la ruptura, la cual tuvo un área de varias decenas de kilómetros para este evento.

El terremoto del 11 de enero de 2010

El 11 de enero de 2010 ocurrió un terremoto de $M_w \sim 5$ en la frontera entre Guatemala y Honduras. El mecanismo focal (desplazamiento lateral izquierdo en una falla de alto ángulo ENE-WSW) y la ubicación hipocentral son compatibles con la activación de un tramo limitado de



Fig. 4.33 - MDP set for the earthquake of 11 January 2010. The red star indicates the location of epicentre in the original catalogue (ISC019).

Fig. 4.33 - Conjunto MDP para el terremoto del 11 de enero de 2010. La estrella roja indica la ubicación del epicentro en el catálogo original (ISC019).

fault [Franco *et al.* (2012); CA_26 in Styron *et al.* (2020)].

The macroseismic data set collected here (Fig. 4.33) is based on the DYFI answers that assign intensities that are sometimes 1-2 degrees higher than the intensity data reported in the ISC bulletin (http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=14225163&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE, source unknown). Note that the same intensity IV is assigned to San Pedro Sula for this event and for an $M_s \sim 3.5$ occurring one month later in central Honduras, that represents the minimum magnitude event collected in this release of MARCA-GEHN archive.

la falla de Motagua (Franco *et al.*, 2012; CA_26 en Styron *et al.*, 2020).

El conjunto de datos macrosísmicos recopilados aquí (Fig. 4.33) se basa en las respuestas DYFI que asignan intensidades que en ocasiones son 1-2 grados más altas que los datos de intensidad informados en el Boletín ISC (http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/web-db-v4?event_id=14225163&out_format=IMS1.0&request=COMPREHENSIVE, fuente desconocida). Nótese que la misma intensidad IV se le asigna a San Pedro Sula para este evento y para un $M_s \sim 3.5$ ocurrido un mes después en el Centro de Honduras, que representa el evento de magnitud mínima recolectado en esta publicación del archivo MARCA-GEHN.

The 7 November 2012 earthquake

On 7 November 2012 an M_w 7.4 earthquake occurred offshore of Guatemala, near its border with Mexico (Secretaría de Planificación y Programación – Segeplan, 2014). The importance of this event is twofold: it was a deadly event documented by the national civil defence and scientific organisations too (reports to as MG8 and MG10 in the database, see Appendix 1), with a good instrumental monitoring. Therefore, it can be considered the best available representation of the damage distribution of intermediate depth (30-50 km) offshore events, generated on or near to the subduction zone interface of the Middle America Trench, where Coco plate moves NNE relative to the Caribbean and North America plates at about 70-80 mm/yr. The focal mechanism provided by several agencies indicates a nearly pure thrust on a low angle WNW-ESE trending, NNE dipping fault.

National and local newspapers (Prensa Libre, El Quetzalteco, Mi Región) describe the effects produced by the earthquake in the departments of Retalhuleu, San Marcos, Huehuetenango, Quetzaltenango, Sololá, and Totonicapán. The damage was greater in San Marcos and Quetzaltenango. At least 52 people were killed, 21 missing, 150 wounded and more than 17,000 affected, mainly due to landslides (Milenio, 2013).

This MDP set (144 IDPs, see Fig. 4.34) sheds light on the anomalies in the propagation of seismic waves; note that similarly to other events, the maximum damage is concentrated along the volcanic belt, at more than 100 km away from the epicentre, and not along the coastal stripe. Critical Moho reflections as well as huge amplification effects can be invoked to explain this pattern, that need to be further investigated.

El terremoto del 7 de noviembre de 2012

El 7 de noviembre de 2012 se produjo un M_w 7,4 frente a las costas de Guatemala, cerca de su frontera con México (Secretaría de Planificación y Programación – Segeplan, 2014). La importancia de este evento es doble; fue un evento mortal, documentado también por la defensa nacional civil y las organizaciones científicas con un buen monitoreo instrumental (reportes MG8 y MG10 en la base de datos, ver Apéndice 1). Por lo tanto, se puede considerar la mejor representación disponible de la distribución de daños de eventos costa afuera poco profundos (30-50 km), generados en o cerca de la interfaz de la zona de subducción de la Trincherá Mesoamericana (TMA), donde la placa del Coco se mueve NNE en relación con las placas del Caribe y América del Norte aproximadamente de 70-80 mm/año. El mecanismo focal proporcionado por varias agencias indica un empuje inverso casi puro, una superficie de bajo ángulo orientada WNW-ESE, buzando hacia el NNE. Periódicos nacionales y locales (Prensa Libre, El Quetzalteco, Mi Región) describen los efectos producidos por el terremoto en los departamentos de Retalhuleu, San Marcos, Huehuetenango, Quetzaltenango, Sololá y Totonicapán. Los daños fueron mayores en San Marcos y Quetzaltenango. Finalmente, por lo menos 52 personas murieron, 21 desaparecieron, 150 fueron heridas y más de 17.000 afectadas, principalmente por deslizamientos de tierra (Milenio, 2013).

Este conjunto MDP (144 IDP, ver Fig. 4.34) ilustra las anomalías en la propagación de ondas sísmicas; téngase en cuenta que de manera similar a otros eventos, el daño máximo se concentra a lo largo del cinturón volcánico, a más de 100 km de distancia del epicentro, y no a lo largo de la franja costera. Se pueden apelar a reflexiones críticas desde la base de la corteza (Moho), así como enormes efectos de amplificación para explicar estos patrones, las cuales se deben estudiar más a fondo.

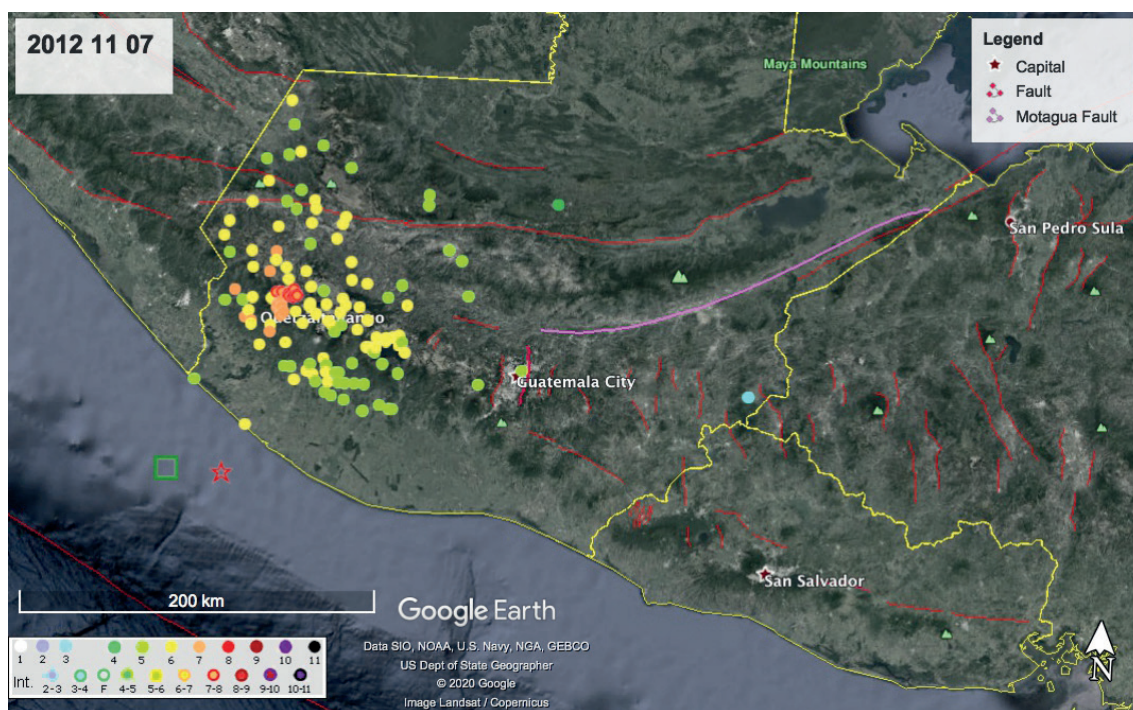


Fig. 4.34 - MDP set for the earthquake of 7 November 2012. This event demonstrates the anomalies in seismic wave propagation, causing relevant damage far away from the epicentral area.

Fig. 4.34 - Conjunto MDP para el sismo de 2012. Este evento demuestra anomalías en la propagación de ondas sísmicas, provocando daños relevantes lejos del área epicentral.

This earthquake can also be a benchmark for tuning the intensity observations derived from online questionnaires and from instrumental data (e.g. DYFI and SHAKEMAP, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jv5f/>), with respect to field surveys of experienced personnel.

4.2.3. Special cases

In this chapter we briefly present some case studies that have been uploaded in the MARCA-GEHN archive for specific purposes.

4.2.3.1. The 1917-18 sequence: proxy to local seismic response

As previously mentioned, the damage survey during an earthquake sequence

Este terremoto también puede ser un punto de referencia para ajustar las observaciones de intensidad derivadas de cuestionarios en línea (por ejemplo, DYFI) y de datos instrumentales (SHAKEMAP, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jv5f/>), con respecto a los levantamientos en campo de personal experimentado.

4.2.3. Casos especiales

En este capítulo presentamos brevemente algunos estudios de caso que se han cargado en el archivo MARCA-GEHN por diferentes razones.

4.2.3.1. La secuencia de 1917-18: acercamiento de la respuesta sísmica local

Como se mencionó anteriormente, el estudio de daños que se ha recopilado en un conjunto de

is quite different to the image of intensities due to a single shock. The link of the MDP set that was compiled in this study (Esposito, 2019) with a given earthquake is tricky, and we always have to consider the cumulative damage, even sometimes inappropriate intensity assignments that in many cases are referred to individual buildings. Nonetheless, detailed macroseismic information on the damage distribution (Fig. 4.35) allows us to reconstruct a proxy of local seismic response of urban areas, thus identifying the ones that are more prone to amplifications.

Contemporary historical sources are available for the 1917-1918 earthquakes. First of all, the account of a prominent resident of Guatemala City, professor Marshall H. Saville of the Museum of the American Indian, Heye Foundation, New York, provides a detailed description of the damage undergone by the buildings for the event of 25 December, as well as for the “after-shocks” of 28 December and 3 January 1918, which further aggravated the level of damage in the city (Saville, 1919): note, as explained in Table 4.4, the origin time in the chronicle is given according to local time, with some discrepancies with respect to the instrumental earthquake parameters. A commemorative photo album was edited by Arturo Taracena Flores in 1970, thus about fifty years after the events. This album represents a graphical documentation showing the Guatemala City as it was in the early 1900s, and how it was almost completely razed by the 25 December earthquake; for each church or building, a photo is given before and after the quake. The album is complemented by a contemporary impressive chronicle of the writer José Rodríguez Cerna (published in mid-1918, under the original title “Between rubble, frescoes, the terrible scenes lived by the Guatemalans

MDP (Esposito, 2019) es algo diferente de una imagen tradicional de intensidades para un solo terremoto. El vínculo con un terremoto específico dentro de una secuencia sísmica de larga duración es desencadenante, así como también tenemos que considerar el daño acumulativo y a veces la asignación de intensidad inapropiada, ya que en muchos casos se refieren edificios individuales. Sin embargo, la importancia de la información macrosísmica detallada sobre la distribución de daños (Fig. 4.35) nos permite reconstruir un aproximado de la respuesta sísmica local de las áreas urbanas propensas a los terremotos, así como identificar las áreas que están más expuestas a las amplificaciones.

Las fuentes históricas contemporáneas están disponibles para los terremotos de 1917-1918. En primer lugar, el relato de un destacado residente de la ciudad de Guatemala, el profesor Marshall H. Saville, del Museo del Indio Americano, Fundación Heye, Nueva York, proporciona una descripción detallada del daño sufrido en los edificios para el evento del 25 de diciembre, así como para las “réplicas” del 28 de diciembre y 3 de enero de 1918 que agravaron aún más el nivel de daño en la ciudad (Saville, 1919). Téngase en cuenta, como se explica en la Tabla 4.4, que el tiempo origen en la crónica se da de acuerdo con la hora local, con algunas discrepancias respecto a los parámetros instrumentales del terremoto. Luego, Arturo Taracena Flores editó un álbum de fotos conmemorativo en la década de 1970, unos cincuenta años después de los acontecimientos. Este álbum representa una documentación gráfica que muestra la ciudad de Guatemala como era a principios de 1900 y cómo fue arrasada casi por completo por el terremoto del 25 de diciembre; para cada iglesia o edificio, se entrega una foto antes y después del terremoto. El álbum se complementa con una impresionante crónica contemporánea del escritor José Rodríguez Cerna (publicada a mediados de 1918, bajo el título original “Entre escombros, frescos, patentes, las terribles esce-

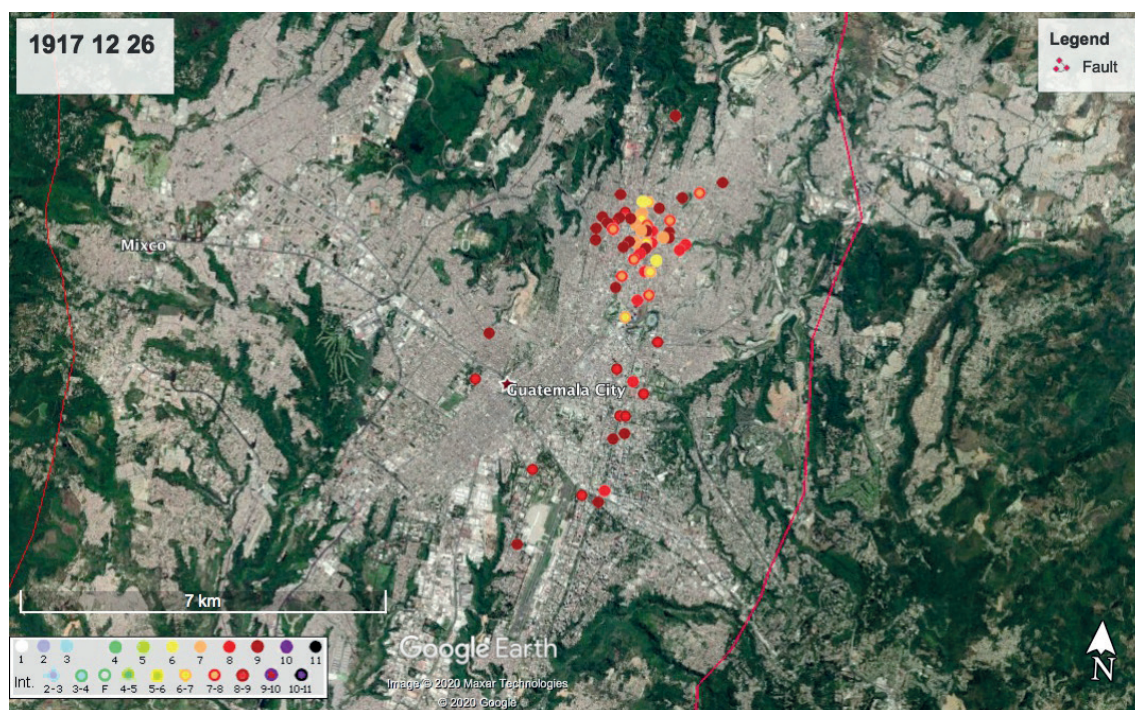


Fig. 4.35 - MDP set for the earthquake of 26 December 1917 (25 December, local time). The IDPs refer mainly to single building damage, geo-referenced on contemporary city maps. As can be seen, most of the points are located between zones 1, 4, 5, 9 and 13 of the capital city: they represent the most important buildings of that time. Photos allow the comparison before and after the event (Esposito, 2019).

Fig. 4.35 - Conjunto MDP para el sismo del 26 de diciembre de 1917 (25 de diciembre, hora local). Los puntos de intensidad se refieren principalmente a daños de edificios individuales, georreferenciados en mapas contemporáneos de la ciudad. Como se puede observar, la mayoría de puntos están localizados en la ciudad capital, entre la zona 1, 4, 5, 9 y 13; representan los edificios más importantes de esa época, lo que permitió la realización de la comparación antes y después del evento, gracias a las fotos (Esposito, 2019).

of that time”) and by a letter dated 24 May 1968 of the president of the Society of Geography and History of Guatemala. After a scrupulous examination of the entire photographic series, he summed up:

1. the earthquakes of 1917-1918 have thrown down most, if not all, of the buildings that were the proud of the city;
2. photographs are the existing graphic testimonies that give a complete idea of the strength of the earthquakes and show how the city was before December 1917.

Further information, accompanied mostly by photographs of the damage, was found in local and national newspapers including La Prensa of 1917 and 1918 (Prensa Libre,

nas vividas por los guatemaltecos de esa época”) y una carta de fecha 24 de mayo de 1968 del presidente de la Sociedad de Geografía y Historia de Guatemala. Después de un examen escrupuloso de toda la serie fotográfica, sintetizó:

1. Los terremotos de 1917-1918 han derribado la mayoría, si no todos, los edificios que eran orgullo de la ciudad;
2. Las fotografías son los testimonios gráficos existentes que dan una idea completa de la fuerza de los terremotos y muestran cómo era la ciudad antes de diciembre de 1917.

Se encontró más información, acompañada principalmente de fotografías del daño, en periódicos locales y nacionales, incluidos La Pren-

2017), *Diario de Centro América* (1918), *Diario La Hora* (2017).

In addition, the photographic documentation helped us to reconstruct the spatial damage, with geographically indivisible panoramas, which allow completing the damage delimitation relative to specific areas.

We have taken the opportunity to collect the data related to the local event of 26 December 1917 (UTC), to offer an additional tool to both technicians and researchers that have to take into account past seismic scenarios to develop seismic risk reduction strategies and urban plans. The descriptions made by witnesses of the past and the documentary attestations constitute real experimental data concerning the earthquake-territory interaction process. The description of the damage in urban areas can be used to assess the local seismic response in significant terms, allowing us to know the areas of amplification or attenuation of the earthquake effects on a local scale.

The vast photographic collection (over one hundred photographs), constitutes the most important contribution of the documentation available for this earthquake; in particular the comparison of the buildings before and after the earthquake, manages to convey the memory of the original aspect of the places and monumental buildings destroyed by the earthquakes. In this sense, the photographic collection of Taracena Flores (1970) represents an extraordinary tool that documents the damage caused by the destructive event and the extreme emergency situation in which the people suffered immediately after the catastrophe. The damages of the Christmas earthquake 1917 were enormous, completely altering the city: buildings of entire streets collapsed entirely, the main cemetery was totally destroyed by the earthquake, with about 80,000 dead

sa de 1917 y 1918 (*Prensa Libre*, 2017), *Diario de Centro América* (1918), *Diario La Hora* (2017).

Además, la documentación fotográfica nos ayudó a reconstruir el daño espacial, con panoramas geográficamente indivisibles, que nos permiten completar la delimitación del daño en relación con áreas específicas.

Hemos aprovechado la oportunidad para recopilar los datos relacionados con el evento local del 26 de diciembre (UTC) de 1917, para ofrecer una herramienta adicional tanto a técnicos como a investigadores que deben tener en cuenta escenarios sísmicos pasados para desarrollar estrategias de reducción de riesgo sísmico y planes urbanos. Las descripciones hechas por testigos del pasado y las certificaciones documentales constituyen datos experimentales reales sobre el proceso de interacción terremoto-territorio. La descripción del daño en áreas urbanas se puede usar para evaluar la respuesta sísmica local en términos significativos, lo que nos permite conocer las áreas de amplificación o atenuación de los efectos del terremoto a escala local.

La vasta colección fotográfica (más de cien fotografías), constituye la contribución más importante de la documentación disponible para este terremoto; en particular, la comparación de los edificios antes y después del terremoto, logra transmitir la memoria sobre el aspecto original de los lugares y edificios monumentales destruidos por los terremotos. En este sentido, la colección fotográfica de Taracena Flores (1970) representa una herramienta extraordinaria que documenta el daño causado por el evento destructivo y la situación de emergencia extrema en que las poblaciones sufrieron inmediatamente después de la catástrofe. Los daños del terremoto de la navidad de 1917 fueron enormes, alterando completamente la ciudad; los edificios de calles enteras se derrumbaron por completo, el cementerio principal fue totalmente destruido por el terremoto, con alrededor de 80.000 muer-

bodies that were literally snatched from their graves, thus exposing and endangering the city for a possible plague.

The pre-post images also allow us to detect information on the types of buildings, the materials used and the conservation status of the buildings at the time of the earthquake. In general, it can be said that the large civil and ecclesiastical buildings had a medium-good quality of the load-bearing structures to which an intrinsic weakness of the internal dividing walls was associated. It is in fact these parts of the buildings that are most affected by the effects of the earthquake. Frequent damage to the *façade* of ecclesiastical buildings is represented by the collapse of towers and bell towers. The damage reported by poor housing is often linked to the fall of the roofs and load-bearing walls.

On the basis of the type of damage suffered, and in accordance with the description of the damage provided by the MM scale, four categories of damage have been distinguished:

- 1) light damage, not affecting the load-bearing structures of the building;
- 2) serious damage, affecting the load-bearing of the building structures;
- 3) partial collapses of buildings;
- 4) total collapses.

Therefore, on the basis of each individual photograph shown in the photo album, as well as the reconstruction of the information provided by contemporary sources, the general picture of the effects produced in the city was recreated (Fig. 4.35). The maps available online of the Dirección General de Obras Públicas Guatemala C.A. Sección de Urbanismo - Plano de la Ciudad de Guatemala - Años 1850, 1894 y 1900, have been used to correctly locate the damage caused by the earthquake. The urban layout used as a basis for the damage processing

tos que literalmente dejaron sus tumbas, exponiendo y poniendo en peligro la ciudad por una posible plaga.

Las imágenes previas y posteriores también nos permiten detectar información sobre los tipos de edificios, los materiales utilizados y su estado de conservación en el momento del terremoto. En general, se puede decir que los grandes edificios civiles y eclesiásticos tenían una calidad media-buena en función de las estructuras de carga, a las que se asocia con una debilidad intrínseca de los muros divisorios internos. De hecho, estas estructuras de los edificios son las más afectadas por los efectos del terremoto. El daño frecuente a la fachada de los edificios eclesiásticos está representado por el colapso de las torres y campanarios. El daño reportado por viviendas pobres a menudo está relacionado con la caída de los techos y muros de carga.

Sobre la base del tipo de daño sufrido, y de acuerdo con la descripción del daño proporcionado por la escala MM, se han distinguido cuatro categorías de daños:

- 1) Daños leves, no afectan las estructuras de carga del edificio;
- 2) Daños graves, que afectan la carga de soporte del edificio;
- 3) Colapsos parciales de edificios;
- 4) Colapsos totales.

Por lo tanto, sobre la base de cada fotografía individual que se muestra en el álbum, así como la reconstrucción de la información proporcionada por las fuentes contemporáneas, se reconstruyó la imagen general de los efectos producidos en la ciudad (Fig. 4.35). Para localizar correctamente el daño causado por el terremoto, se utilizaron los mapas disponibles en línea de la Dirección General de Obras Públicas Guatemala C.A. Se ha utilizado la Sección de Urbanismo - Plano de la Ciudad de Guatemala - Años 1850, 1894 y 1900. El diseño urbano utilizado como base para el procesamiento de daños consiste en el Mapa de 1900 (Fig. 4.36), cronológicamente más cercano al terremoto, capaz de representar

have been reported. An example of the monument filing and the related damage assessment on the MM scale is shown in Fig. 4.37.

Various descriptions of the earthquake-damaged building are available (Stuart, 1918; Saville, 1919; Spinden, 1919; Recinos, 1922) for a comparison on the level of damage to individual ecclesiastical, administrative and private buildings. Descriptions of the damage status of entire roads are also available in literature, supported, however, by photographs in which the geographical references are indicated. In particular, Wilhelm Prince of Sweden (1922) describes in "Between Two Continents - Notes from a Journey in Central America", the state of the city after the earthquake: *"In 1918, it should be explained, the whole region was shaken by the most violent earthquake in the recent history of Guatemala. On Christmas Day the earth began to tremble; sometimes the movement was up and down, then again sideways. And at every new shock a handful of houses went down as if they had been built of sand or cardboard. After a few hours the once well-built city was nothing but a smoking mass of debris, and the authorities repented bitterly that ever they had given up Antigua. The sufferings of the people were indescribable... It was a perfect triumph of misery"*.

The seemingly solid public buildings did not support the force of the earthquake, and succumbed shattered or left with cracks in their structure. Temples such as Cathedral, La Merced, La Recolectión, La Parroquia Vieja, El Cerro del Carmen, Santa Teresa, and El Santuario de Guadalupe, did not support the onslaught of earthquakes. Serious damage was also observed in La Concepción, Santa Catalina, Santa Clara, Candelaria, El Carmen, San José, Santo Domingo, Santa Rosa and Belén. The forcefulness also reached the Evangelical Chapel and the

Se encuentran disponibles varias descripciones de daños en edificios por el terremoto (Stuart, 1918; Saville, 1919; Spinden 1919; Recinos, 1922) para comparar el nivel de daño individual sufrido en edificios eclesiásticos, administrativos y privados individuales. Las descripciones del estado de daños de carreteras enteras también están disponibles en la literatura, sin embargo, respaldadas por fotografías en las que se indican las referencias geográficas. En particular, Wilhelm Prins de Suecia describe en "Entre dos continentes; notas de un viaje en América Central" (1922), el estado de la ciudad después del terremoto: *"En el 1918, debería explicarse, toda la región fue sacudida por el terremoto más violento en la historia reciente de Guatemala. El día de Navidad la tierra comenzó a temblar; a veces el movimiento era hacia arriba y hacia abajo, luego otra vez de lado y en cada nuevo choque, un puñado de casas se derrumbaba como si hubieran sido construidas con arena o cartón. Después de unas pocas horas, la bien construida ciudad, no era más que una masa humeante de escombros, y las autoridades se arrepintieron amargamente de haber renunciado a Antigua. Los sufrimientos de la gente eran indescriptibles ... Fue un triunfo perfecto de la miseria"*.

Los edificios públicos aparentemente sólidos no soportaron la fuerza del terremoto y sucumbieron destrozados o con grietas en su estructura. Templos como la Catedral, La Merced, La Recolectión, La Parroquia Vieja, El Cerro del Carmen, Santa Teresa y El Santuario de Guadalupe, no soportaron la embestida de los terremotos. También se observaron daños graves en La Concepción, Santa Catalina, Santa Clara, Candelaria, El Carmen, San José, Santo Domingo, Santa Rosa y Belén. La furia también llegó a la Capilla Evangélica y al Templo Masónico. En cuanto a los edificios públicos, las huellas del terremoto fueron visibles en el Palacio de Gobierno, el Comando de Armas, el Portal del municipio, el Palacio Presidencial,

COORDENADAS	14°38'30" N	90°30'43" W	
Denominación:	CATEDRAL METROPOLITANA de Ciudad de Guatemala		
Denominación histórica:	Santa Iglesia Catedral Metropolitana de Santiago de Guatemala		
Año de construcción:	Año 1779-1867	Siglo	Epoca
Dirección:	7a Avenida 6-73		
	<p>Breve descripción: Es la iglesia principal de la Arquidiócesis de Guatemala y tiene el título de Basílica. Si cruzas la calle hacia la Plaza de la Constitución, en el centro de la ciudad. Hay un elemento del estilo neoclásico que fue la instalación por primera vez con la construcción de la Catedral Metropolitana. El edificio tiene 100 barras de largo y 22 de alto en la nave principal, también tiene 7 puertas grandes, 88 ventanas, 4 fuentes, 4 patios y ventas especiales, incluyendo la capilla, sala de recepción, hall de recepción, oficina arzobispal y la biblioteca. La Catedral ha pasado por innumerables eventos durante más de 200 años, incluidos varios terremotos importantes, independencia y revolución. Fue gravemente dañada por los terremotos de 1917 y 1976. El terremoto de 1917 rompió las estatuas de los cuatro evangelistas, de dos metros de altura, que se encontraban frente a la Catedral.</p>		

a)

FOTO ANTES DEL TERREMOTO	FOTOS DESPUÉS DEL TERREMOTO	Descripción del daño
		<p>Fachada principal de la catedral:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Colapso de los dos campanarios, 2) Volcado del elemento superior, 3) Daño al techo de la estructura.
		<p>Nave central:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) parte de la bóveda se derrumbó sobre el altar; 2) lesiones a la vez en la parte central de la nave.
<p>CLASIFICACIÓN DEL DAÑO OBSERVADO Daño estructural severo, daño no estructural muy grave.</p>	<p>NIVEL DE DAÑO-D4</p> 	<p>INTENSIDAD MM</p> <p>7-8</p>

b)

Fig. 4.37 - Example of the monument description and the related damage assessment on the MM scale (taken from Esposito, 2019); a) building description; b) damage evaluation.

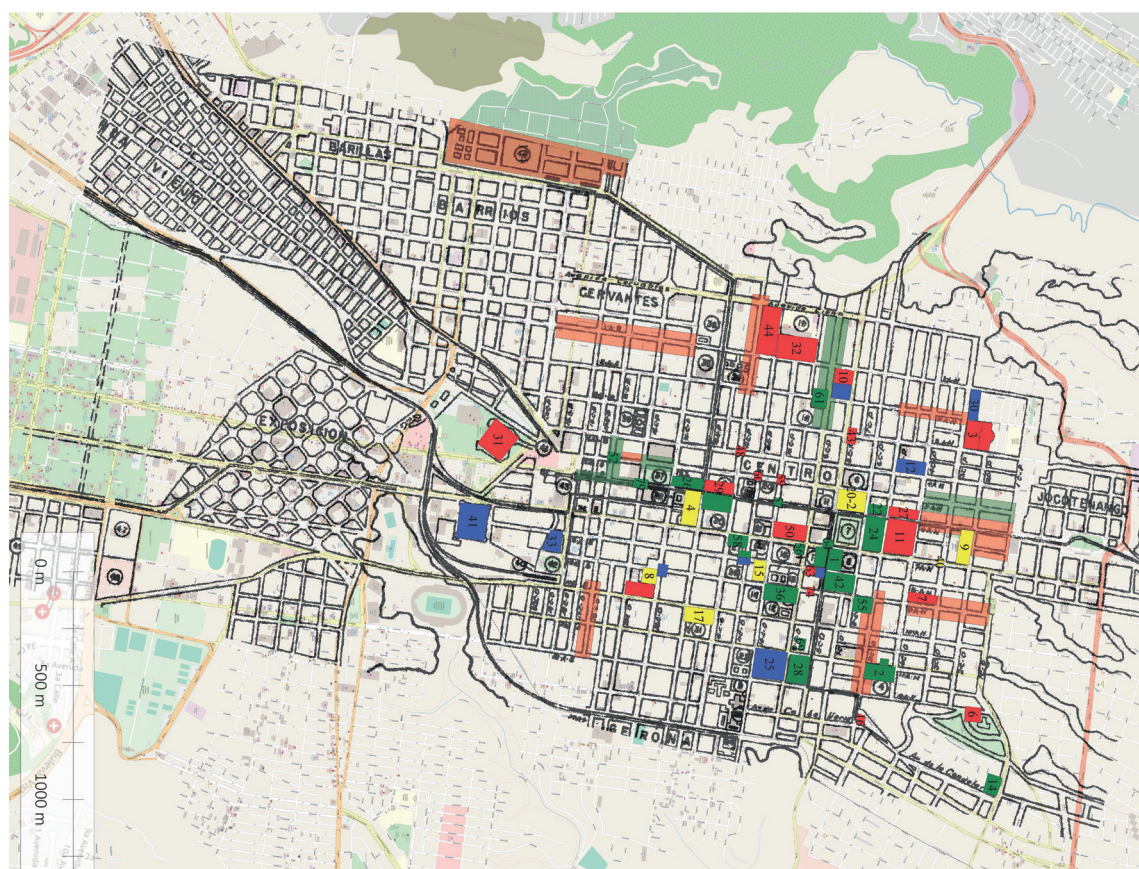
Fig. 4.37 - Ejemplo de la descripción del monumento y la evaluación de daños en relación de la Escala MM (tomado de Esposito, 2019); a) descripción del edificio; b) evaluación de daños.

Masonic Temple. As for public buildings, the traces of the earthquake were visible in the Government Palace, the Commando de Armas, the Portal of the municipality, the Presidential Palace, as well as the General Post Office, the Ministry of Development, and the Teatro Colón, where today the park of the same name is located (Diario de Centro America, 1918; Prensa Libre, 2017).

From the comparison of all available information, a map of the distribution of the damages was drawn up (Fig. 4.38a); the four categories of damage previously defined are colour coated as 1) light = yellow; 2) serious = green; 3) partial collapse = blue; 4) total collapse = red. The earthquake altered the face of the city, necessitating demolition interventions and, above all, restoration and new restructuring, including notable ones, variously witnessed shortly after the inauspicious event. Total collapses of buildings (in red on the map) and partial collapses (in blue on the map) can be observed in the entire perimeter of the historic centre, with a slight prevalence in the northern part, between Calle 5 and Avenida 12. To the west, there is also a fairly widespread presence of total collapses of buildings between Calle 9-17 and Avenida 1 (some images taken from Taracena Flores (1970) are shown in Fig. 4.38b-e). The cemetery area (n. 104 of the legend) was completely demolished, and it is said that 8,000 deaths were literally snatched from their graves, threatening pestilence to the city (Prensa Libre, 2017; Wilhelm Prince of Sweden, 1922). The southernmost area, between Avenida 3-10 and Calle 17-21, which comprises the Castillo de San José (n. 31) and the Penitenciaría Central area (n. 41), was severely affected by the earthquake effects. In particular the Castle area has a height of over 20 m above the normal level of the city. Serious damage to building

así como la Oficina General de Correos, el Ministerio de Desarrollo y el Teatro Colón, donde hoy se encuentra el parque del mismo nombre (Diario de Centro América, 1918; Prensa Libre, 2017).

A partir de la comparación de toda la información disponible, se elaboró un mapa de la distribución de los daños (Fig. 4.38a) las cuatro categorías de daños representadas como: 1) leves = amarillo; 2) graves = verde; 3) colapsos parciales = azul; 4) totales = rojo. El terremoto alteró la faz de la ciudad, forzando intervenciones de demolición y, sobre todo, restauraciones y reorganizaciones, incluidas algunas muy sobresalientes, que fueron testigo poco después del evento desfavorable. Se pueden observar (algunas imágenes tomadas de Taracena Flores (1970) se muestran en la Fig. 4.38b-e) colapsos totales de edificios (en rojo en el mapa) y colapsos parciales (en azul en el mapa) en todo el perímetro del centro histórico, con una ligera prevalencia en la parte norte, entre la Calle 5 y la Avenida 12. En el oeste, también hay una presencia bastante generalizada de derrumbes totales de edificios entre la Calle 9-17 y la 1era Avenida. El área del cementerio (no. 104 de la leyenda) fue completamente demolida, y se dice que alrededor de algo así como 8.000 cadáveres fueron literalmente sacudidos de sus tumbas, amenazando con una peste a la ciudad (Prensa Libre, 2017; Wilhelm, 1922). El área más meridional, entre la Avenida 3-10 y la Calle 17-21, que comprende el Castillo de San José (n. 31) y el área de la Penitenciaría Central (n. 41), se vio gravemente afectada por los efectos del terremoto. En particular, el área del castillo tiene una altura de más de veinte metros sobre el nivel normal de la ciudad. El daño grave a las estructuras de los edificios (verde en el mapa) fue detectable en toda el área de la ciudad y representa, como porcentaje, el tipo más común de daño sufrido por la ciudad. Finalmente, el daño leve (amarillo) puede atribuirse solo a unos pocos edificios, dispersos en el área central del



a)

N.	LEYENDA MONUMENTOS
1	CATEDRAL
2	LA MERCED
3	LA RECOLECCION
4	SAN FRANCISCO
5 ^	PARROQUIA VIEJA
6	CERRO DEL CARMEN
7	SANTA TERESA
8	BEATAS DE BELEN
9	SAN SEBASTIAN
10	SANTUARIO DE GUADALUPE
11	LA CONCEPCION
12	SANTA CATALINA
13	SANTA CLARA
14	CANDELARIA
15	EL CARMEN
16	SAN JOSE
17	BELEN
18*	CAPILLA EVANGELICA
19*	TEMPLO MASONICO
20	PALACIO DEL GOBIERNO
21	PORTAL DEL GOBIERNO, COMANDANCIA DE ARMAS
22	COMANDANCIA DE ARMAS

23*	PORTAL DE MUNICIPALIDAD
24	PALACIO PRESIDENCIAL
25	ADUANA CENTRAL
26	DIRECCION GENERAL DE CORREOS
27	MINISTERIO DE FOMENTO
28	TEATRO COLON
29	MUSEO NACIONAL LA REFORMA
30	ACADEMIA MILITAR
31	CASTILLO DE SAN JOSE'
32	HOSPITAL GENERAL
33	ASILO ESTRADA CABRERA
34	ESCUELA DE MEDICINA
35	INSTITUTO NACIONAL DE VACUNA
36	INSTITUTO NACIONAL PARA VARONES
37*	ESCUELA DE INDIGENAS
38	ESCUELA PRACTICA PARA VARONES
39	ESCUELA PRACTICA PARA SENORITAS
40	ESCUELA 21 DE NOVIEMBRE
41	PENITENCIARIA CENTRAL
42	MERCADO CENTRAL
43	EMPRESA DE TELEFONOS

44	MANICOMIO
45*	FUENTE DE NEPTUNO
46*	ACUEDUCTO DE ARCOS
47*	DIRECCION GENERAL DE CUENTAS
48*	LEGACIONES DE ALEMANA
49*	LEGACIONES DE MEXICO
50	LEGACIONES DE NORUEGA
51*	LEGACIONES DE INGLATERRA
52	CONSULADO DE LOS ESTADOS UNIDOS
54*	PORTAL DEL COMERCIO
55	ESTACION FERROCARRIL CENTRAL
56	BANCO COLOMBIANO
57	BANCO INTERNACIONAL
58	BANCO AMERICANO
59	OFFICINA NOTTEBOHN
60	CLUB ALEMAN
61	EMPRESA ELECTRICA
62	TEATRO OLIMPIA
63	JOYERIA LA PERLA
64	EL CAZADOR JUAN VAN DE PUTTE Y CIA

65	EDIFICIO EL FENIX
66	EDIFICIO SAN MARCO
67	HOTEL ESPANA
68	HOTEL PARIS
69	HOTEL COLON
70*	ALMACEN DE MUEBLES ALFONSO FAHSEN
71	FABRICA DE VELAS DE AZURDIA
72*	ALMACENES SENORES CASTANEDA HINOS Y FARMACIA ENRIQUEZ TORO
73	ALMACEN QUAN Y CIA
74	RESTAURANTE EL GAMBRINUS
75	HOTEL BAR
76*	FARMACIA VICTOR MARTINEZ
77*	HOSPITAL AMERICANO
78*	CASA PARTICULAR
79	CASA MANUEL ZEBADUA
80	CASA BARNOYA GALVEZ
81*	COLEGIO AMERICANO
82*	VILLA MARGARITA
104	CEMENTERIO GENERAL

*Fuera del mapa
*No localizado

Fig. 4.38 - Earthquakes of 1917-1918, in Guatemala City: a) damage distribution in the historical centre (zone 1) in the list, monuments are grouped for their scope; and images of the damage through the photographs of Taracena Flores (1970); b) in the southern part of the city (1 avenida - 7 calle); c) 5 avenida - norte; d) 3 calle 5 - 6 avenida; e) the Military Academy.

Fig. 4.38 - Terremotos de 1917-1918, en la Ciudad de Guatemala: a) distribución de daños en el centro histórico (zona 1) en leyenda, monumentos agrupados por alcance; e imágenes de los daños a través de las fotografías de Taracena Flores (1970); b) en la zona sur de la ciudad (1 avenida - 7 calle); c) 5 avenida - norte; d) 3 calle 5 - 6 avenida; e) la Academia Militar.



b)



c)

Fig. 4.38 - continued.
Fig. 4.38 - continuada.



d)



e)

Fig. 4.38 - continued.
Fig. 4.38 - continuada.

structures (green on the map) is detectable throughout the city area, and represents, as a percentage, the most common type of damage undergone by the city. Finally, light damage (yellow) can be attributed only to a few buildings, scattered in the central area of the historic centre.

The general high damage value inflicted on the city can be assessed as a global intensity of VIII-IX degree of the MM scale. Although the spatial distribution of damage in the Guatemala City historic centre does not indicate evident trends that may be identified as areas of local effects amplification, sorts of clusters of damage have been observed. Most of the buildings suffered further damage from the earthquakes of January 1918. Furthermore, the seismic history of Guatemala City indicates that the town underwent serious damage even during the 1976 earthquake. This suggests that a more complete damage analysis including effects of other strong earthquakes into the historical centre should be addressed.

4.2.3.2 Improving the database by site histories: the Santa Rosa case

The compilation of a macroseismic database usually starts by gathering the data of major events, in terms of consequences (intensity) or energy (magnitude) of the earthquake; sometimes the database is the result of archiving the available documentation. In the case of MARCA-GEHN, we started with a prototype collection of the available material of the best known events, but one of the activities performed at the very beginning of the work was devoted to improving the knowledge at some specific sites, so that some statistics on the frequency of perception/damage condition at given sites can be performed. This was the case of Santa Rosa Department, in Guatemala, which is frequently mentioned in chronicles of earth-

centro histórico.

El alto valor general de daño sufrido por la Ciudad se puede evaluar como una intensidad de grado VIII-IX entre la escala MM. Aunque la distribución espacial del daño en el Centro Histórico de la ciudad de Guatemala no indica tendencias evidentes que puedan identificarse como áreas de amplificación de efectos locales, se han observado algunos daños agrupados. La mayoría de los edificios sufrieron más daños por los terremotos de enero de 1918. Además, la historia sísmica de la ciudad de Guatemala indica que la ciudad ha sufrido graves daños incluso durante el terremoto de 1976. Esto sugiere que se debe abordar un análisis de daños más completo que incluya los efectos de otros terremotos fuertes en el centro histórico.

4.2.3.2. Mejoramiento de la base de datos por historiales de sitio: el caso de Santa Rosa

La compilación de una base de datos macro-sísmica generalmente comienza con la recopilación de datos de eventos importantes, en términos de consecuencias (intensidad) o energía (magnitud) del terremoto; a veces, la base de datos es el resultado de archivar la documentación disponible. En el caso de MARCA-GEHN, partimos de una colección prototípica del material disponible de los eventos más conocidos, pero una de las actividades realizadas al inicio del trabajo se dedicó a mejorar el conocimiento en algunos sitios específicos, de modo que se pueden realizar algunas estadísticas sobre la frecuencia de percepción / condición de daño en sitios determinados. Este fue el caso del departamento de Santa Rosa, en Guatemala, que se menciona frecuentemente en las crónicas de

quakes. Thus, aside from the maps showing the distribution of macroseismic intensity for given earthquakes we recovered the “timeline” of intensities observed in Santa Rosa Department, with MDP sets given by very few points of observations. This is the case for example of the earthquakes of 1830, 1870, 1913 and 1930. We present in this section the map of the first two events, for further commenting on the seismic site history of the main town Cuilapa, as a benchmark for future improvements of the database.

The seismic sequence that affected the eastern part of Guatemala from 1 April to 3 May 1830 was characterised by numerous shocks felt by the Guatemalan population. Although the seismic sequence has been described by several authors (Dunlop, 1847; Perrey, 1847; Montessus de Ballore, 1888; Vassaux, 1969; Grases, 1974; Feldman, 1988), the information regarding the date of occurrence of the most significant events, i.e. events that caused damage in different locations in Guatemala, were largely confusing, identifying the same event with different dates (PEMO999). On the basis of original documents, PEMO999 define for the first time the date, time, and focal parameters of the two main events 21 April and 3 May, that characterised the 1830 seismic sequence. The most damaging event occurred on 21 April at 20:45 local time, causing damage in 8 locations, including Guatemala City and Palin (VII MM). The maximum damage was recorded in Amatitlan and Petapa (VIII MM). The earthquake of 3 May 1830 affected 6 localities with a level of damage between VII-VIII and V MM: we uploaded this second MDP only in the database (Fig. 4.39a).

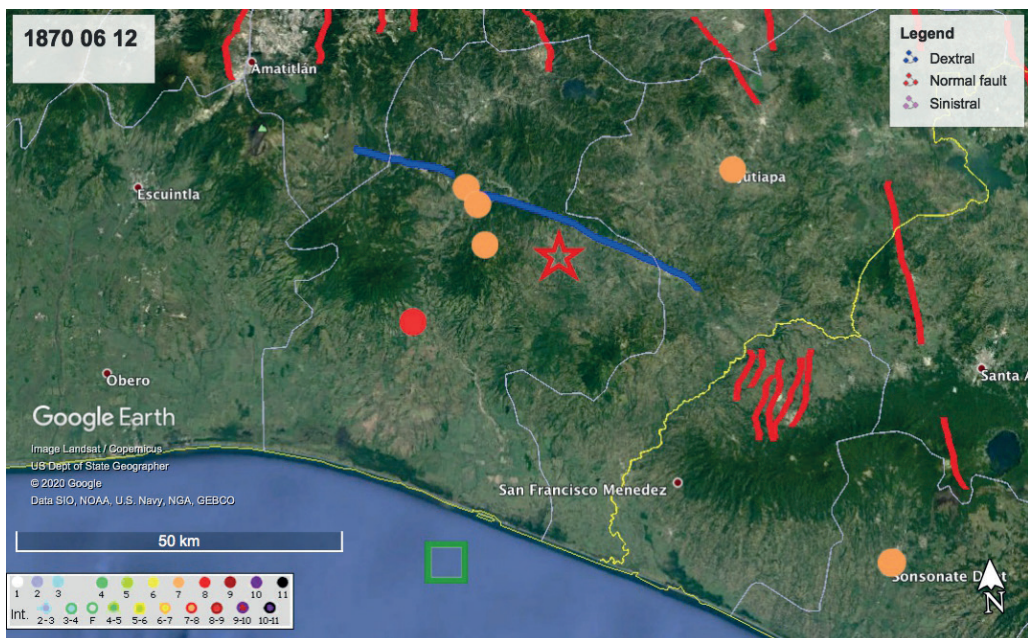
Historical sources mention several geological phenomena connected with the events of greater energy of the seismic se-

terremotos. Por lo tanto, además de los mapas que muestran la distribución de la intensidad macrosísmica para terremotos dados, recuperamos la “línea de tiempo” de las intensidades observadas en el Departamento de Santa Rosa, con conjuntos de MDP dados por un solo punto de observación, o muy pocos. Este es el caso, por ejemplo, de los terremotos de 1830, 1870, 1913 y 1930. Presentamos en esta sección el mapa de los dos primeros eventos, para comentar con más detalle la historia sísmica para la localidad de Cuilapa, como referencia para futuras mejoras de la base de datos.

La secuencia sísmica que afectó la parte este de Guatemala del 1 de abril al 3 de mayo de 1830 fue caracterizada por muchas sacudidas sentidas por la población guatemalteca. Aunque la secuencia sísmica ha sido descrita por numerosos autores (Dunlop, 1847; Perrey, 1847; Montessus de Ballore, 1888; Vassaux, 1969; Grases, 1974; Feldman, 1988), la información sobre la fecha de ocurrencia de los eventos más significativos, es decir, eventos que causaron daño en diferentes localidades en Guatemala, fueron mayormente confusos, identificando un mismo evento con diferentes fechas (PEMO999). Sobre la base de documentos originales, PEMO999 define por primera vez la fecha, hora y parámetros focales de los dos principales eventos del 21 de abril y el 3 de mayo, que caracterizaron la secuencia sísmica de 1830. El evento más dañino ocurrió el 21 de abril a las 20:45 hora local, causando daños en 8 localidades, incluyendo la ciudad de Guatemala y Palin (VII MM). El máximo daño fue registrado en Amatitlán y Petapa (VIII MM). El terremoto del 3 de mayo de 1830 afectó 6 localidades con un nivel de daño entre VII-VIII y V MM; cargamos solo este segundo MDP en la base de datos (Fig. 4.39a). Fuentes históricas mencionan varios procesos geológicos conectados a los eventos de mayor energía de la secuencia sísmica de 1830. En particular, Feldman (1988) informa una fuente histórica cuya descripción sugiere



a)



b)

Fig. 4.39 - MDP sets of two earthquakes of the 19th century in Guatemala: a) 3 May 1830, IDPs and epicentral location by PEMO999; b) 12 June 1870, IDPs from PEMO999, the red star shows the location provided in GHEA, the preferred location offshore is from PEMO999. Note the complexity of assigning a source to the earthquakes represented by only a few observations.

Fig. 4.39 - Conjunto MDP de dos terremotos del siglo XIX en Guatemala: a) 1830, 3 de mayo, IDP y ubicación epicentral por PEMO999; b) 1870, 12 de junio, IDP de PEMO999, la estrella roja muestra la ubicación proporcionada en GHEA, la ubicación preferida costa afuera es de PEMO999. Téngase en cuenta la complejidad de asignar una fuente a los terremotos representados sólo por unas pocas observaciones.

quence of 1830. In particular, Feldman (1988) reports a historical source whose description suggests a possible superficial fault developed on the eastern part of the Cerro Pelato of the Pacaya Volcano (PEMO999). References to non-localised large landslides and liquefaction phenomena were also found. Intense fracturing phenomena were observed near Santa Inés and Petapa (PEMO999). The 21 April and 3 May earthquakes were associated with upper-crust seismic activity. Based on the level of damage reported in Guatemala City (VII MM), PEMO999 hypothesised a seismogenic source close to the city, probably related to the normal faults of the Guatemalan graben, on the Jalpatagua fault.

The seismic activity recorded in Guatemala in the period May-July 1870 is characterised by a high degree of uncertainty, probably linked to transcription errors of the dates of earthquakes as reported in non-contemporary sources. PEMO999 report some observations on the attribution of the date of occurrence to the Guatemala-El Salvador earthquakes of 12 June and July 1870. Based on the information reported in Grases (1974) and Feldman (1988), on 12 June 1870 a strong shock struck the eastern part of Guatemala, 7 localities were damaged by the earthquake, varying intensity between the VII and VIII on the MM scale. The most affected localities were Chiquimulilla (VIII) and Santa Rosa (VII-VIII), the localities of Cuilapa, Ixhuatán, Los Esclavos, Jutiapa, and Sonsonate reached an intensity of VII MM. The same authors relate the event of 12 June to the main earthquake, which occurred in the same area on 12 May 1870. PEMO999 attribute both events (12 May and 12 June) to the same seismogenic fault or, in any case, different but very close faults, underlining the close similarity between the areas dam-

una posible falla superficial desarrollada en la parte oriental del Cerro Pelato del Volcán Pacaya (PEMO999). También se encontraron referencias a grandes deslizamientos de ladera y procesos de licuefacción. Se observaron procesos intensos de fracturación cerca de Santa Inés y Petapa (PEMO999). Los terremotos del 21 de abril y del 3 de mayo se asociaron con la actividad sísmica de la corteza superior. Basado en el nivel de daño reportado por la ciudad de Guatemala (VII MM), PEMO999 hipotetizó una fuente sismogénica cercana a la Ciudad, probablemente relacionada con las fallas normales del graben de Guatemala, en la falla de Jalpatagua.

La actividad sísmica registrada en Guatemala en el periodo de mayo-julio de 1870 es caracterizada por un alto grado de incertidumbre, probablemente vinculado a errores de transcripción de las fechas de los terremotos reportados en fuentes no contemporáneas. PEMO999 informa algunas observaciones en la atribución de la fecha de ocurrencia a los terremotos de Guatemala-El Salvador del 12 de junio y julio de 1870. Basado en la información reportada en Grases (1974) y Feldman (1988), el 12 de junio de 1870 una fuerte sacudida golpeó la parte oriental de Guatemala, 7 localidades fueron dañadas por el terremoto, variando intensidad entre VII y VIII en la escala MM. Las localidades más afectadas fueron Chiquimulilla (VIII) y Santa Rosa (VII-VIII), las localidades de Cuilapa, Ixhuatán, Los Esclavos, Jutiapa y Sonsonate alcanzaron una intensidad de VII MM. Los mismos autores relacionan el evento del 12 de junio al terremoto principal que ocurrió en la misma área el 12 de mayo de 1870. PEMO999 atribuye ambos eventos (12 de mayo y 12 de junio) a la misma falla sismogénica o en cualquier caso a fallas diferentes pero muy cercanas, subrayando la gran similitud entre las áreas dañadas por los terremotos y la misma ubicación epicentral. Los autores también discuten acerca de la falta de agravamiento de los daños que deberían de

aged by the earthquakes and the same epicentral location. The authors also noted no worsening of the damage that should have been recorded following the 12 June quake. On this basis, they put forward the hypothesis that it is the same seismic event. The situation, as reported by PEMO999, becomes more complicated for one additional event occurring in July 1870 that hit El Salvador and Guatemala (and tentatively Honduras). A specific study on primary sources is necessary to dispel these uncertainties: a summary of the bibliographic sources with the different attribution of the date of the earthquakes is available in PEMO999.

In the database, we adopted the solution proposed by PEMO99 that according to White and Cifuentes (1988) indicate the 12 June 1870 as a subduction event, assigning a magnitude of 7.2 (Fig. 4.39b).

These examples show the difficulties of assigning a source to historical earthquakes, even if detailed contemporary or nearly contemporary documental sources are available. Regarding epicentral location, we stress the importance of using location algorithms based on macroseismic intensity point distribution [e.g. by Boxer, Gasperini

haberse registrado tras el terremoto del 12 de junio. Sobre esta base plantean la hipótesis que es el mismo evento sísmico. La situación, según informó PEMO999, se vuelve más complicada por un evento adicional que ocurrió en julio de 1870, que afectó a El Salvador y Guatemala (y tentativamente a Honduras). En la actualidad, es necesario un estudio específico en fuentes primarias para disipar estas incertidumbres. Un resumen de la fuentes bibliográficas con la diferente atribución de la fecha de los terremotos está disponible en PEMO999.

En la base de datos adoptamos la solución propuesta por PEMO999 que según White y Cifuentes (1988) indica el 12 de junio de 1870 como un evento de subducción, asignando una magnitud de 7,2 (Fig. 4.39b).

Estos ejemplos muestran las dificultades para asignar una fuente a terremotos históricos, incluso si se dispone de fuentes documentales contemporáneas o casi contemporáneas detalladas. Sobre la ubicación epicentral, enfatizamos la importancia de utilizar “algoritmos de ubicación” basados en la distribución de los punto de intensidad macrosísmica (por ejemplo Boxer, Gasperini *et al.*, 1999; 2010); sin embargo deben aplicarse con mucho cuidado en situaciones en las que los terremotos profundos de subduc-

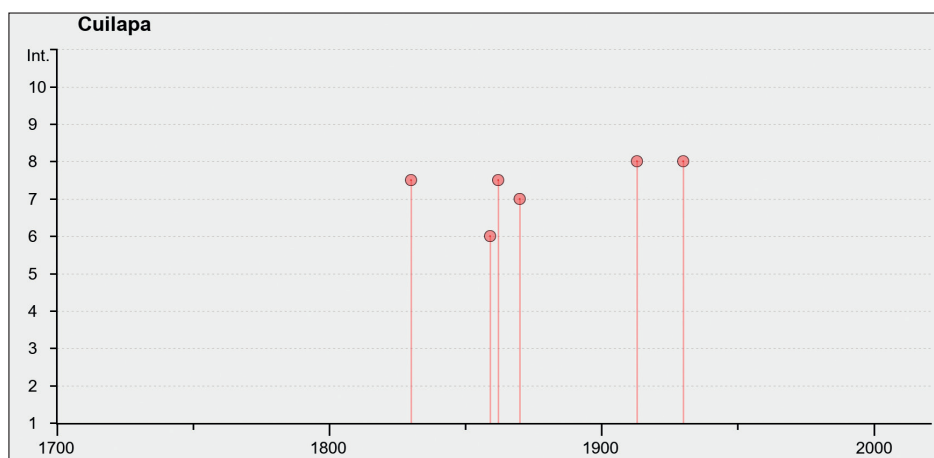


Fig. 4.40 - Site history for Cuilapa, the main town in Santa Rosa Department.

Fig. 4.40 - Historia del sitio de Cuilapa, la ciudad principal del departamento de Santa Rosa.

et al. (1999, 2010)]; nonetheless, they need to be applied with great care in such situations where subduction deep earthquakes coexist with shallow crustal events.

A systematic search on local and foreign archives can help in constraining the site history at key localities, checking data incompleteness and prioritising the search of shallow fault sources as well. Note for example that the occurrence of damaging conditions in Cuilapa, from 1830 on (Fig. 4.40), is documented for some decades only, and it should probably be ascribed to the availability of historical testimonies, more than referred to natural fluctuations of the seismic activity.

4.3. Nicaragua

4.3.1. Introduction

Nicaragua borders Honduras to the north, the Caribbean Sea to the east, Costa Rica to the south, and the Pacific Ocean to the west. The current administrative policy divides the national territory into 15 departments, 153 municipalities, and 2 autonomous regions (<https://www.inide.gob.ni/redatam/Censo2005/Censo2005.html>).

Statistics from the National Institute for Development Information estimate the population of Nicaragua at 6.46 million people (BCN, 2018).

The first seismic network was installed in 1975 after the catastrophic event in Managua in 1972; it was made up of 16 vertical component telemetry stations (Segura, 2018). Currently, the national seismic network has 92 seismic stations that transmit their signals via radio, Internet, and fibre optics to the Seismic Centre in Managua; the instrumentation includes short-term, accelerographic, and broadband stations. In addition, data from more than 500 foreign seismic stations were acquired for the com-

ción coexistan con eventos de la corteza superficial.

Una búsqueda sistemática en archivos locales y extranjeros, puede ayudar a restringir la historia del sitio en localidades clave, comprobando datos incompletos y priorizando también la búsqueda de fallas poco profundas. Observe por ejemplo que la ocurrencia de condiciones dañinas en Cuilapa, a partir de 1830 (Fig. 4.40), es documentada solo por algunas décadas, y probablemente deba atribuirse a la disponibilidad de testimonios históricos, más que referido a fluctuaciones naturales de la actividad sísmica.

4.3. Nicaragua

4.3.1. Introducción

Nicaragua limita al norte con Honduras, al este con el Mar Caribe, al sur con Costa Rica y al oeste con el Océano Pacífico. La división-política administrativa actual divide el territorio nacional en 15 departamentos, 153 municipios y 2 regiones autónomas (<https://www.inide.gob.ni/redatam/Censo2005/Censo2005.html>).

Estadísticas del Instituto Nacional de Información de Desarrollo estiman la población de Nicaragua en 6,46 millones de personas (BCN, 2018).

La primera red sísmica se instaló en 1975 después del catastrófico evento de Managua en 1972; estaba formada por 16 estaciones telemétricas de componente vertical (Segura, 2018). Actualmente, la Red Sísmica Nacional cuenta con 92 estaciones sísmicas que transmiten sus señales vía radio, Internet y fibra óptica a la Central Sísmica en Managua. Entre ellas, estaciones de período corto, acelerográficas y banda ancha. Además, se adquirirían los datos de más de 500 estaciones sísmicas extranjeras para la compilación de boletines nacionales (INETER, 2020).

pilation of national bulletins by the Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER, 2020).

Tectonically, Nicaragua lies on the Caribbean plate and is located on the western edge of it. This plate collides with the Coco plate, and sinks down to approximately 250 km depth, i.e. the maximum depth of earthquakes recognised in the Nicaraguan territory (Protti *et al.*, 1995). These plates converge in a 25°-30° N direction with a velocity of approximately 70 to 90 mm/yr (Demets, 2001).

In turn, Nicaragua is located on the Chortis block. The Chortis block is clearly defined to the west by the Motagua fault and to the SW by the Middle America Trench. In the southern part, this block is covered by Cenozoic volcanic products, but it is estimated that it can extend to the Santa Elena peninsula, in the northern part of Costa Rica, as well as to the Hess escarpment, located in the Caribbean Sea of Nicaragua. The eastern margin of the Chortis block is not clear, since it has not been possible to identify a clear evident discontinuity of the emerging part of Nicaragua, and seismotectonic activity has been occurring in this block since the early Cretaceous. According to Segura (2018), seismicity in Nicaragua originates from four main sources, with differences in the amounts of events generated as well as in their mechanisms, namely: the subduction zone, the forearc, the arc area, and back-arc zone. Of these areas, the one with the highest production of earthquakes is the subduction zone, generating more than 90% of the earthquakes recorded by the Nicaraguan seismic network. The hypocentres are shallow offshore and deepen as they approach the volcanic arc. The characteristic focal mechanisms in the Nicaraguan subduction zone are reverse and normal. In the case of events occurring in the area near the central

Tectónicamente, Nicaragua está asentada sobre la placa Caribe y se ubica en el borde oeste de la misma. Esta placa colisiona con la placa del Coco, la cual se subduce hasta los 250 km aproximadamente, pues es la profundidad máxima de los sismos en el territorio nicaragüense (Protti *et al.*, 1995). Estas placas convergen en una dirección 25°-30° N con una velocidad aproximada de 70 a 90 mm/año (Demets, 2001).

A su vez, Nicaragua está ubicada sobre el bloque Chortis. Este bloque está claramente definido al oeste por la falla Motagua y al SO por la fosa mesoamericana. En la parte sur, este bloque ha sido cubierto por productos volcánicos del cenozoico pero se estima que puede extenderse hasta la península Santa Elena, en la parte norte de Costa Rica así como hasta el escarpe de Hess, ubicado en el mar Caribe de Nicaragua. El margen este del bloque Chortis no es clara, pues no se ha logrado identificar una discontinuidad evidente de la parte emergida de Nicaragua, la actividad seismotectónica ha estado ocurriendo en este bloque desde el cretácico temprano. De acuerdo a Segura (2018) la sismicidad en Nicaragua se origina a partir de cuatro fuentes principales, las cuales muestran diferencias en las cantidades de eventos generados, así como en sus mecanismos, estas fuentes son: la zona de subducción, la zona ante arco, la zona del arco y la zona tras arco. De estas zonas, la de mayor producción de sismos es la zona de subducción, generando más del 90% de los sismos que registra la red sísmica de Nicaragua. Los hipocentros son someros mar adentro y se profundizan conforme se aproximan al arco volcánico. Los mecanismos focales característicos en la zona de subducción nicaragüense son de tipo inverso y normales. En el caso de los eventos que ocurren en la zona próxima al eje central de la cadena volcánica son desplazamiento de rumbo. La característica de las trazas de las fallas en dirección NE-SO en la zona volcánica, respecto a las que tienen dirección paralela a la

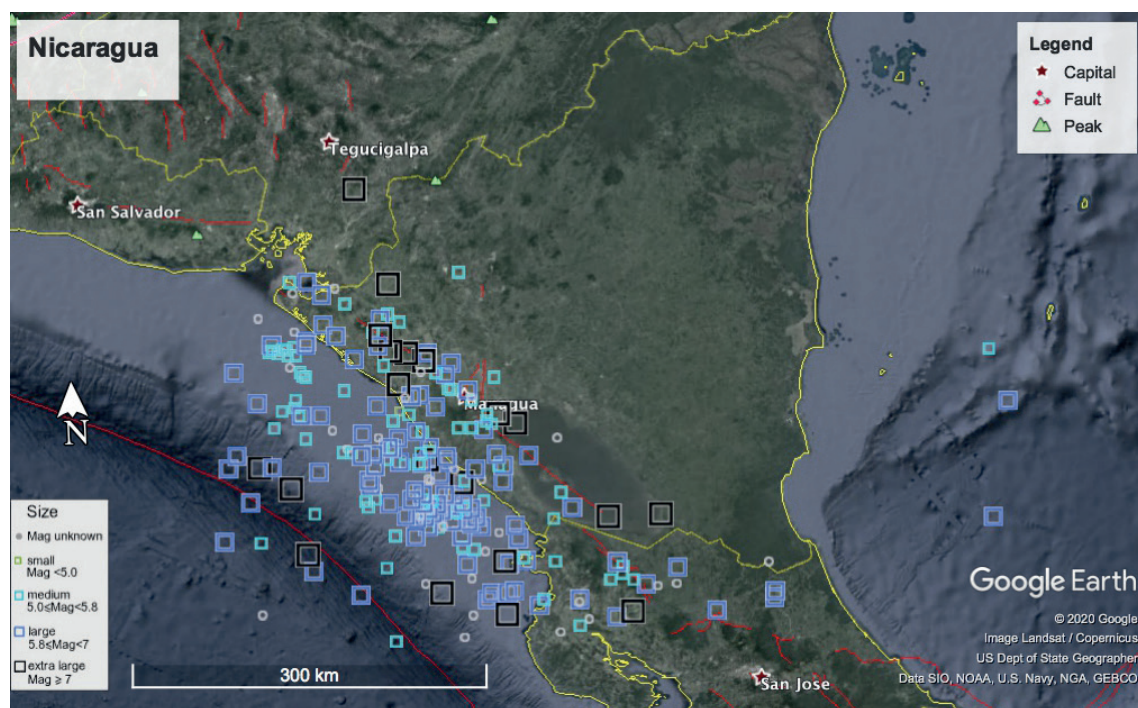


Fig. 4.41 - Epicentral map of the MARCA-GEHN earthquakes falling in an arbitrary polygon that surrounds the territory of Nicaragua. The 239 extracted events are represented in Fig. 4.42.

Fig. 4.41 - Mapa de epicentros de los terremotos de MARCA-GEHN que caen en un polígono arbitrario que envuelve el territorio de Nicaragua. La evolución temporal de las magnitudes de los 239 eventos extraídos se representa en la Fig. 4.42.

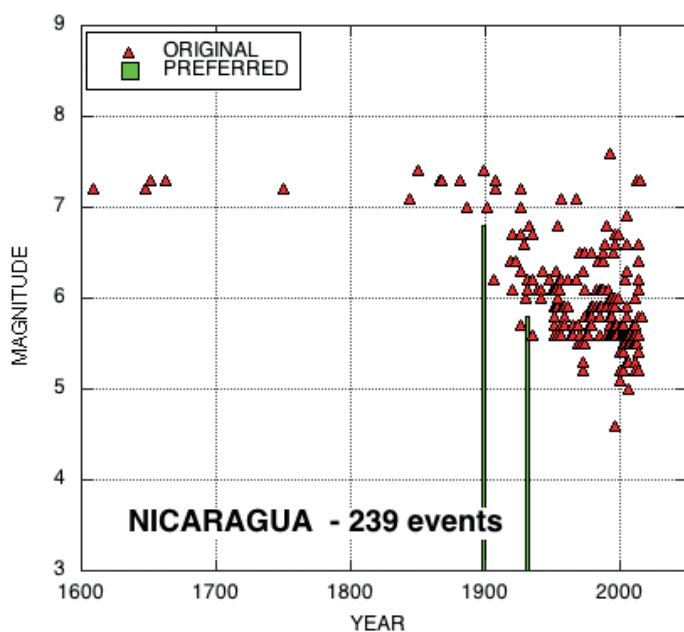


Fig. 4.42 - Graph of the magnitude versus time of the 239 events extracted from the MARCAGEHN catalogue for the territory of Nicaragua (see map in the previous figure). Note the decrease in minimum magnitude versus time, according to the completeness rules in the original catalogue. Green squares indicate the events for which a different value of magnitude with respect to the original catalogue is assigned in the preferred location (see Tab. 4.5).

Fig. 4.42 - Gráfico de la evolución temporal de magnitud de los 239 eventos extraídos del catálogo MARCA-GEHN para el territorio de Nicaragua (ver mapa en la figura anterior). Se evidencia la disminución de la magnitud mínima frente al tiempo, de acuerdo con las reglas de completitud del catálogo original. Los cuadrados verdes indican los eventos para los cuales se asigna un valor de magnitud diferente con respecto al catálogo de origen en la ubicación asignada (ver Tab. 4.5).

axis of the volcanic chain, they have a trans-current component too. The characteristics of the fault lines in a NE-SW direction in the volcanic zone, with respect to those that have a direction parallel to the trench, has been explained by several authors. Burbach *et al.* (1984) propose a mechanism for segmentation of the Central American subduction zone independently in each segment; for their part, La Femina *et al.* (2002) propose an accommodation of movement by a rotation of blocks with a vertical axis.

According to the earthquake catalogues taken as reference in this study (Fig. 4.41), the majority of events are located along the volcanic arc, and in the Pacific offshore. Note also that relevant mislocation problems and uncertainties in magnitude assignment may also affect very recent earthquakes. Macro seismic information derives from the rigorous international works previously cited, complemented by published and unpublished reports.

4.3.2. Studied events

For Nicaragua, we uploaded macro seismic data sets (events with more than 2 IDPs) for 8 earthquakes, since 1898 (Table 4.5). They represent shallow source events onland and subduction offshore earthquakes, including a special case of a “slowquake” that generated a destructive tsunami. Currently in MARCA-GEHN, there are 483 IDPs referred to Nicaragua localities. Some sites identified correspond to single building intensity assessment, and, therefore, the related MDP sets must be handled with particular care. As in the previous cases, this work should be considered a starting point, and wide reaching possibilities of improvement are expected in the future, if adequately supported.

In the following, a short description of each studied event is given.

trinchera ha sido explicada por varios autores. Burbach *et al.* (1984) propone un mecanismo de segmentación de la zona de subducción de Centroamérica con independencia en cada segmento; por su parte La Femina *et al.* (2002) propone un acomodamiento del movimiento por una rotación de bloques con un eje vertical.

De acuerdo con los catálogos de terremotos tomados como referencia en este estudio (Fig. 4.41), la mayoría de eventos sísmicos se localizan a lo largo del arco volcánico y en el Pacífico costa afuera. Debemos tener en cuenta que los problemas de mala ubicación y las incertidumbres en la asignación de magnitud también pueden afectar a terremotos muy recientes. La información macrosísmica deriva de rigurosos trabajos internacionales previamente citados, complementados con informes publicados e inéditos.

4.3.2. Eventos estudiados

Para Nicaragua, cargamos conjuntos de datos macrosísmicos (eventos con más de 2 IDP) para 8 terremotos, desde 1898 (Tab. 4.5). Representan eventos de fuentes poco profundas en tierra y terremotos de subducción costa afuera, incluido un caso especial de un “terremoto lento” que generó un tsunami destructivo. Actualmente en MARCA-GEHN existen 483 IDP referidos a localidades de Nicaragua. Algunos sitios identificados corresponden a la evaluación de la intensidad de un solo edificio y, por lo tanto, los conjuntos de MDP relacionados deben manejarse con especial cuidado. Como en los casos anteriores, este trabajo debe considerarse un punto de partida, y se esperan amplias posibilidades de mejora en el futuro, si se cuenta con el apoyo adecuado.

A continuación, se da una breve descripción de cada evento estudiado.

Table 4.5 - List of MDPs entered in MARCA-GEHN for Nicaragua. The earthquake parameters usually refer to the origin catalogue: if indicated in round brackets, the Date/Origin Time and Epicentral Area of the origin catalogue has been substituted by a new preferred one, based on the information gathered in this study by means of the IDPs, and by controls on existing literature; magnitude in brackets indicates that a new value is entered as an alternative, preferred parameter. Origin time in the catalogue is given in UTC; sometimes it is given in local time, to be more immediately related to the cited sources. The maximum intensity (*I_{max}*) is given in MM if not differently specified.

Tabla 4.5 - Lista de MDP ingresados en MARCA-GEHN para Nicaragua. Los parámetros del terremoto generalmente se refieren al catálogo original, pero en algunos eventos la fecha, hora, magnitud y/o área epicentral han sido sustituidas por otras soluciones preferidas, en base a la información recopilada en este estudio por medio de los IDP, y por los controles de la literatura existente. En estos casos los datos del catálogo original se indican entre paréntesis. La hora origen en el catálogo siempre se proporciona en UTC, si bien en algunos eventos se especifica además la hora local, para facilitar la relación con las fuentes citadas. La intensidad máxima (*I_{max}*) se proporciona en MM si no se indica otra escala diferente.

N	EVENTID	Date	Origin Time	Epicentral Area	Mag	IDP Num	<i>I_{max}</i>	Reloc
1	1898.042916	1898-04-29	(not given) 10:45 local 16:45 UTC	(Intraplate) Chinandega	(7.4) 6.8	16	VIII (MSK)	Y
2	906694	1931-03-31	16:02:19	([Pacific Ocean]) Managua	(6.1) 5.8	5	VII	Y
3	766571	1972-12-23	06:29:44	Managua	6.3	71	IX	N
4	270936	1992-09-02	00:16:03	[Pacific Ocean]	7.6	25	VIII-IX (TSU)	N
5	956538	1996-04-01	18:40:58	([Pacific Ocean]) Puerto Sandino	4.6	13	IV-V	N
6	1747177	2000-07-06	19:30:18	Masaya	5.4	57	VIII	N
7	604451431	2014-04-10	23:27:45	Managua	(6.1) 6.0	140	VII	Y
8	604454318	2014-04-14	05:07:04	Managua	(5.2) 5.1	126	V-VI	Y

The 29 April 1898

Chinandega earthquake

On 29 April 1898, at 10:45 local time, a destructive earthquake, lasting about a minute, struck the central and north-western region of Nicaragua with significant effects in the cities of Chinandega, León, and Managua. Thousands of people were left homeless and 7 people perished in León (ERN-CAPRA, 2009). The event was distinctly felt in El Salvador, southern Honduras, and northern Costa Rica.

Ambraseys and Adams (1996), based on contemporary sources, describe in detail the level of damage for the individual locations: maximum damage, VIII MSK, was assigned to five locations including Chinandega, lo-

El terremoto del 29 de abril de 1898 en Chinandega

El 29 de abril de 1898, a las 10:45 hora local, un devastador terremoto, de aproximadamente un minuto, golpeó la región central y noroeste de Nicaragua con importantes impactos en las ciudades de Chinandega, León y Managua. Miles de personas quedaron sin hogar y 7 personas fallecieron en León (ERN-CAPRA, 2009). El evento se sintió claramente en El Salvador, el sur de Honduras y el norte de Costa Rica.

Ambraseys y Adams, 1996, con base en fuentes contemporáneas, describen en detalle el nivel de daño para las ubicaciones individuales: el daño máximo, VIII MSK, se asignó a cinco ubicaciones, incluida Chinandega, ubicada NNW de Managua. Se mantuvieron 16 IDP



Fig. 4.43 - MDP set for the earthquake of 29 April 1898. The red star shows the location of the origin catalogue (GHEC), the green square the preferred location proposed by Ambraseys and Adams (2001).

Fig. 4.43 - Conjunto MDP para el terremoto del 29 de abril de 1898. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (GHEC), el cuadrado verde la ubicación preferida propuesta por Ambraseys y Adams, 2001.

cated in the NNW of Managua. We retained 16 IDPs (Fig. 4.43) in the MSK scale, as given by the reference study (MG17 in the online references). The Authors also argue about some contemporary writers who grossly exaggerated the effects of this event, while others tend to play down the damage caused; they suggest a crustal event of about M_s 6.8, based on the distribution of damage and of felt effects, and on the long aftershocks sequence. Similarly, Peraldo and Montero, 1999, in agreement with Leeds, 1974, interpret the event as a “typical” interplate earthquake, and assign intensities VII-VIII to León and Chinandega, VII to Managua. The location and magnitude proposed by the GHEC catalogue derive from the study of Benito *et al.* (2012), that maintain the location given by Tanner and

(Fig. 4.43) en la escala MSK, como lo indica el estudio de referencia (MG17 en las referencias en línea). Los autores también discuten sobre algunos escritores contemporáneos que exageran enormemente los efectos de este evento, mientras que otros tienden a minimizar el daño causado; sugieren un evento cortical de aproximadamente M_s 6,8, basado en la distribución de daños y de efectos sentidos, y en la secuencia de réplicas largas. Asimismo, PEMO999, de acuerdo con Leeds, 1974, interpretar el evento como un sismo interplaca “típico” y asigna intensidades VII-VIII a León y Chinandega, VII a Managua.

La ubicación y la magnitud propuesta por el catálogo GHEC derivan del estudio de Benito *et al.* (2012), que mantienen la ubicación dada por Tanner y Shefferd, 1997, al disminuir su magnitud de 7,9 a 7,4. Estamos a favor de la solución

Shefferd (1997), by decreasing their magnitude from 7.9 to 7.4. We are in favour of the solution proposed by Ambraseys and Adams (2001), given as the preferred solution in the online database. The epicentral area name has been changed as well.

The 31 March 1931 Managua earthquake

Listed among the destructive earthquakes that occurred in Nicaragua, the seismic event of 31 March 1931 is of particular importance for the almost total destruction of the city of Managua, and its similarities with the 1972 Managua earthquake. The death toll was estimated at more than 1,000 and the amount of damage set at \$15,000,000 (Sultan, 1931; Leeds and Moore, 1973); several thousand people were injured and about 45,000 were left homeless. Damage was centred in Managua that was almost destroyed (Fig. 4.44a), while the rest of the country underwent little or no damage (Beaulac, 1931). The quake generated a cracks zone through the western part of the city: in particular a roughly 2 km long fault, trending N36°E, was detected and mapped, from the General Somoza Stadium to the shore of Lake Managua (Durham, 1931; Sultan, 1931). The highest damage was observed along the fault trace (Hardy, 2009); subsequent fires destroyed many of the remaining buildings. In Granada, SE of Managua, the shock was felt by all the residents without producing damage; the same occurred in Masaya, Rivas, and San Carlos (Freeman, 1932). As a detailed response effects survey is not available, only 5 IDPs with intensities from IV to VII have been entered in the database, using a contemporary source [Sultan (1931), given as MG40]. The epicentre listed in the international reference catalogue (ISC019) is not considered reliable (Fig. 4.44b, red star in the upper left

propuesta por Ambraseys y Adams, 2001, dada como la solución preferida en la base de datos en línea. El nombre del área epicentral también ha sido cambiado.

El terremoto del 31 de marzo de 1931 en Managua

Incluido entre los terremotos destructivos ocurridos en Nicaragua, el evento sísmico del 31 de marzo de 1931 es de particular importancia por la destrucción casi total de la ciudad de Managua y sus similitudes con el terremoto de Managua de 1972. El número de muertos se estimó en más de 1.000 y la cantidad de daños se fijó en \$15.000.000 (Sultan, 1931; Leeds y Moore, 1973); varios miles de personas resultaron heridas y unas 45.000 quedaron sin hogar. Los daños se centran en Managua que fue casi destruida (Fig. 4.44a), mientras que el resto del país experimentó poco o ningún daño (Beaulac, 1931). El sismo generó una zona de grietas en la parte occidental de la ciudad: en particular, se calculó y cartografió una falla de aproximadamente 2 km de largo, con tendencia a N36°E, desde el Estadio General Somoza hasta la orilla del lago Managua (Durham, 1931; Sultan, 1931). Los mayores daños se observaron a lo largo de la línea de falla (Hardy, 2009); los incendios posteriores destruyeron muchos de los edificios restantes. En Granada, al sureste de Managua, la sacudida fue sentida por todos los vecinos sin producir daños; lo mismo ocurrió en Masaya, Rivas y San Carlos (Freeman, 1932). Como no se dispone de una encuesta detallada sobre los efectos de respuesta, solo se han introducido en la base de datos 5 IDP con intensidades de IV a VII, utilizando una fuente contemporánea (Sultan, 1931, dado como MG40). El epicentro que figura en el catálogo de referencia internacional (ISC019) no se considera confiable (Fig. 4.44b, estrella roja en la esquina superior izquierda); una ubicación preferida se ve en



a)



b)

Fig. 4.44 - The 31 March 1931 earthquake: a) Photos before and after the earthquake of the National Palace in Managua; b) MDP set: the red star shows the location of the original catalogue (ISC019), the green square the preferred location proposed by assigning the earthquake to the Tiscapa fault segment (Durham, 1931; Duke, 1973; Styron *et al.*, 2020).

Fig. 4.44 - Terremoto del 31 de marzo de 1931. a) Fotos antes y después del terremoto del Palacio Nacional de Managua; b) conjunto MDP: la estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), el cuadrado verde la ubicación preferida propuesta al asignar el terremoto al segmento de falla de Tiscapa (Durham, 1931; Duke, 1973; Styron *et al.*, 2020).

corner); a preferred location is given in Fig. 4.44b, on the Tiscapa fault segment [Brown *et al.* (1973) and Freundt *et al.* (2010), identified as CA_248 by Styron *et al.* (2020)];

la Fig. 4.44b, en el segmento de falla de Tiscapa (Brown *et al.*, 1973; Freundt *et al.*, 2010; identificado como CA_248 por Styron *et al.*, 2020); la magnitud también se ha reducido.

magnitude has been lowered as well.

Similarly to the 23 December 1972 event, the surface cracks and evidence of severe shaking were located exactly where the 1931 fault had been mapped, suggesting that this fault has been repeatedly activated in the last century (Plafker and Brown, 1973; Cowan *et al.*, 2002).

The 23 December 1972 Managua earthquake

The 23 December 1972 Managua earthquake had a devastating, unprecedented effect for a moderate size event (M 6.3), on the capital city and its inhabitants with an estimated death toll of 10,000 (Wyllie *et al.*, 1974). Geologic effects of the quake included surface faulting, landslides and local ground subsidence. Displacement along surface faults was directly responsible for severe localized damage to the streets, underground utilities of Managua and to many buildings along the fault traces (Plafker and Brown, 1973); at least four major faults have been identified, and all consistently show left lateral motion trending in a north-eastern direction (Ward *et al.*, 1974). Aftershock data, even if poorly constrained (Algermissen *et al.*, 1974), indicate that at least one of the local faults extends from the surface to a depth of 8 to 10 km and that faulting extends at least 6 km NE of the city beneath Managua. Similarly to the Guatemala earthquake in 1976, there is a copious bibliography, but mainly focused on site-response and structural engineering aspects (<http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?ev-id=766571>).

At the time of the earthquake, Managua had few buildings in the 7- to 17-story range, several dozen buildings in the 3- to 6-story range, and a multitude of 1- and 2-story buildings; most of them sustained signif-

De manera similar al evento del 23 de diciembre de 1972; las grietas de la superficie y la evidencia de temblores severos se ubicaron exactamente donde se había cartografiado la falla de 1931, lo que sugiere que esta falla se ha activado repetidamente en el último siglo (Plafker y Brown, 1973; Cowan *et al.*, 2002).

El terremoto del 23 de diciembre de 1972 en Managua

El terremoto de Managua del 23 de diciembre de 1972 tuvo un efecto devastador y sin precedentes para un evento considerado de tamaño moderado (M 6,3) sobre la ciudad capital y sus habitantes, con una cifra estimada de muertos en 10.000 (Wyllie *et al.*, 1974). Los efectos geológicos del terremoto incluyen fallas en la superficie, deslizamientos de ladera y hundimientos locales del suelo (subsistencia). El desplazamiento a lo largo de las fallas superficiales fue directamente responsable de graves daños localizados en las calles, los servicios públicos subterráneos de Managua y en muchos edificios a lo largo de las huellas de las fallas (Plafker y Brown, 1973); se han identificado al menos cuatro fallas principales, y todas muestran consistentemente un movimiento lateral izquierdo con tendencia hacia el noreste (Ward *et al.*, 1974). Los datos de réplicas, incluso si están pobremente elaborados, (Algermissen *et al.*, 1974,) indican que al menos una de las fallas locales se extiende desde la superficie hasta una profundidad de 8 a 10 km y que la falla se extiende al menos 6 km al noreste de la ciudad debajo de Managua. De manera similar al terremoto de Guatemala en 1976, existe abundante bibliografía, pero principalmente enfocada en aspectos de ingeniería estructural y respuesta del sitio (<http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?ev-id=766571>).

En el momento del terremoto, Managua tenía pocos edificios en el rango de 7 a 17 pisos, varias docenas de edificios en el rango de 3 a 6 pisos y una multitud de edificios de 1 y 2 pisos;

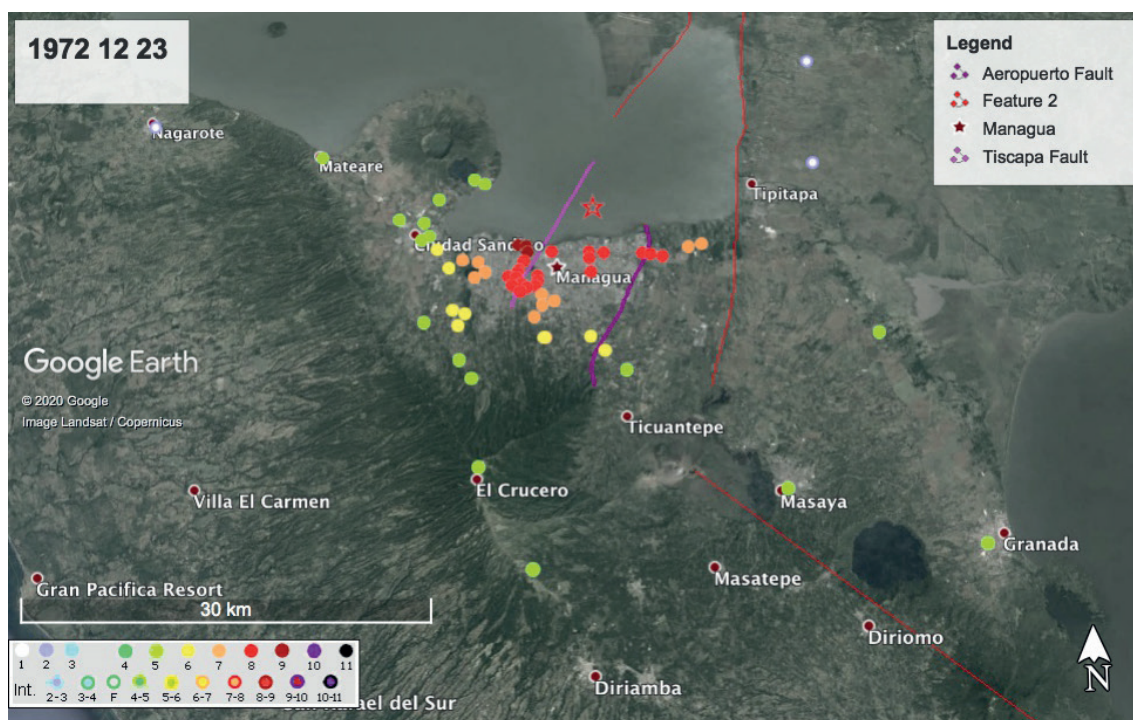


Fig. 4.45 - Detail of the MDP set for the 23 December 1972 Managua earthquake. The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019), fault traces taken from Styron *et al.* (2020).

Fig. 4.45 - Detalles del conjunto MDP para el terremoto de Managua del 23 de diciembre de 1972. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019), trazas de falla tomadas de Styron *et al.*, 2020.

ificant structural damage due to permanent ground displacement, and caused by strong seismic ground shaking (10-15 s during the main shock). Because all the fire-fighting equipment had been demolished, fires raged out of control in the downtown area for several days.

Detailed local response effects in the centre of Managua were provided from primary sources, and supported by aerial photographs (Garofalo and Wobber, 1972). The MDP set with 71 IDPs (Fig. 4.45) is taken from the USGS Shakemap Atlas (<https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/atlas/>) V, MG3 in the database, which in turn is derived from scientific paper with the highest quality (Algermissen *et al.*, 1974); concerning the sites geo-reference, intensity data are often referred to single-buildings

la mayoría de ellos sufrieron daños estructurales significativos debido al desplazamiento permanente del suelo y causados por fuertes sacudidas sísmicas (10-15 s durante el choque principal). Debido a que todo el equipo de extinción de incendios había sido destruido por el terremoto, los incendios se descontrolaron en el centro de la ciudad durante varios días.

Los efectos detallados de la respuesta local en el centro de Managua se obtuvieron de fuentes primarias y se apoyan en fotografías aéreas (Garofalo y Wobber, 1972). El conjunto de MDP con 71 IDP (Fig. 4.45) está tomado del USGS Shakemap Atlas (<https://earthquake.usgs.gov/data/shakemap/atlas/>) V, MG3 en la base de datos, que a su vez se deriva de artículos científicos de la más alta calidad (Algermissen *et al.*, 1974). Con respecto a la georreferencia de los sitios, los datos de intensidad a menudo

damage survey, and then have to be handled with some caution.

The 2 September 1992 earthquake

A major earthquake took place off the Pacific coast of Nicaragua on 2 September 1992, generating a very limited perception of seismic shaking, but a relevant tsunami. Considering the singularity of this event, a specific study has been performed, and it will be discussed in chapter 4.3.3.

The 1 April 1996 earthquake

Unlike the previous event, the earthquake occurring on 1 April 1996 near the coast of Nicaragua was a moderate, deep event that was felt along the Pacific coastal area of the country. The international agencies assign a body magnitude 4.6-4.9 and depth around

se refieren a estudios de daños de edificios individuales, por ello se deben manejar con cierto cuidado.

El terremoto del 2 de septiembre de 1992

Un gran terremoto que tuvo lugar frente a la costa del pacifico de Nicaragua, el 2 de septiembre de 1992, generó muy pocos reportes sobre la sacudida sísmica, pero generó un tsunami relevante. Considerando la singularidad de este evento, un estudio específico se ha realizado, y se discutirá en el capítulo 4.3.3.

El terremoto del 1 de abril de 1996

Opuesto al evento anterior, el terremoto ocurrido el 1 de abril de 1996 cerca de la costa de Nicaragua, es un evento moderado y profundo que se ha sentido a lo largo de la zona costera del Pacifico del país. Las agencias internacionales asignan una magnitud de ondas de cuerpo



Fig. 4.46 - MDP set for the 1 April 1996 earthquake. The red star shows the location of epicentre in the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.46 - Conjunto MDP para el terremoto del 1 de abril de 1996. La estrella roja muestra la ubicación del epicentro en el catalogo de origen (ISC019).

80 km, the data provided by the local seismological authority gives an $M_s = 5.0$ and slightly shallower depth of 56 km. The 13 IDPs in the II-III/ IV-V MM degree (Fig. 4.46) have been taken from a local source [Acosta *et al.* (1996), given as MG5 in the online database].

The 6 July 2000 Masaya earthquake

This event is a moderate but shallow earthquake that caused the collapse of tens of dwellings, with a death toll of 6 people. Damage was mostly concentrated in Masaya and Granada towns and surroundings. There were cracks identified at the ground surface in the epicentral area. The epicentre is located in the westernmost part of the Ometepe fault [as given by Styron *et al.* (2020), iden-

entre 4,6-4,9 y una profundidad alrededor de 80 km, los datos proporcionados por la autoridad sismológica local dan una $M_s = 5,0$ y una profundidad ligeramente menor de 56 km. Los 13 IDP en los grados II-III /IV-V MM (Fig. 4.46) han sido tomados de una fuente local (Acosta *et al.*, 1996, dado como MG5 en la base de datos en línea).

El terremoto del 6 de julio del 2000 en Masaya

Este evento es un terremoto moderado pero poco profundo que causó el colapso de decenas de viviendas, con 6 personas fallecidas. Los daños estuvieron en su mayoría concentrados en las localidades y alrededores de Masaya y Granada. Se identificaron grietas en la superficie del suelo en el área epicentral. El epicentro fue ubicado en la parte más occidental de la falla de Ometepe (según Styron *et al.*, 2020, identi-



Fig. 4.47 - MDP set for the 6 July 2000 earthquake. The red star shows the location of epicentre in the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.47 - Conjunto MDP para el terremoto del 6 de julio de 2000. La estrella roja muestra la ubicación del epicentro en el catálogo de origen (ISC019).

tified with CA_102], a dextral feature with regional relevance. Many of the 57 IDPs are Not Felt reports: the intensity data (Fig. 4.47) have been taken from a local source [Acosta *et al.* (2000), given as MG6 in the online database].

The April 2014 Managua earthquakes

Four earthquakes with $5.2 < M < 6.6$ occurred within a few days, in April 2014, in the surroundings of Managua. They caused the collapse of several dwellings with Spanish colony type architecture near the epicentral area, with a death toll of 6 people. At a specific site known as Papalon, cracks at the ground surface were found with at least 200 m length and from 10 to 45 cm wide with a strike $S70^\circ E$. Despite it being hard to define intensity values dur-

ficado con CA_102), una estructura dextral con relevancia regional. Muchos de los 57 IDP son reportes no sentidos: los datos de intensidad (Fig. 4.47) han sido tomados de una fuente local (Acosta *et al.*, 2000, dado como MG6 en la base de datos en línea).

Los terremotos de abril del 2014 en Managua

Cuatro terremotos ocurrieron con $5.2 < M < 6.6$ en unos pocos días, en abril de 2014 en los alrededores de Managua. Provocaron el colapso de varias viviendas con arquitectura de tipo colonial española cerca del área epicentral, con una cifra de 6 personas fallecidas. En un sitio en específico conocido como Papalon se encontraron grietas en la superficie del suelo con al menos 200 m de longitud y de 10 cm a 45 cm de ancho con un strike $S70^\circ E$. A pesar que es difícil definir valores de intensidad durante una

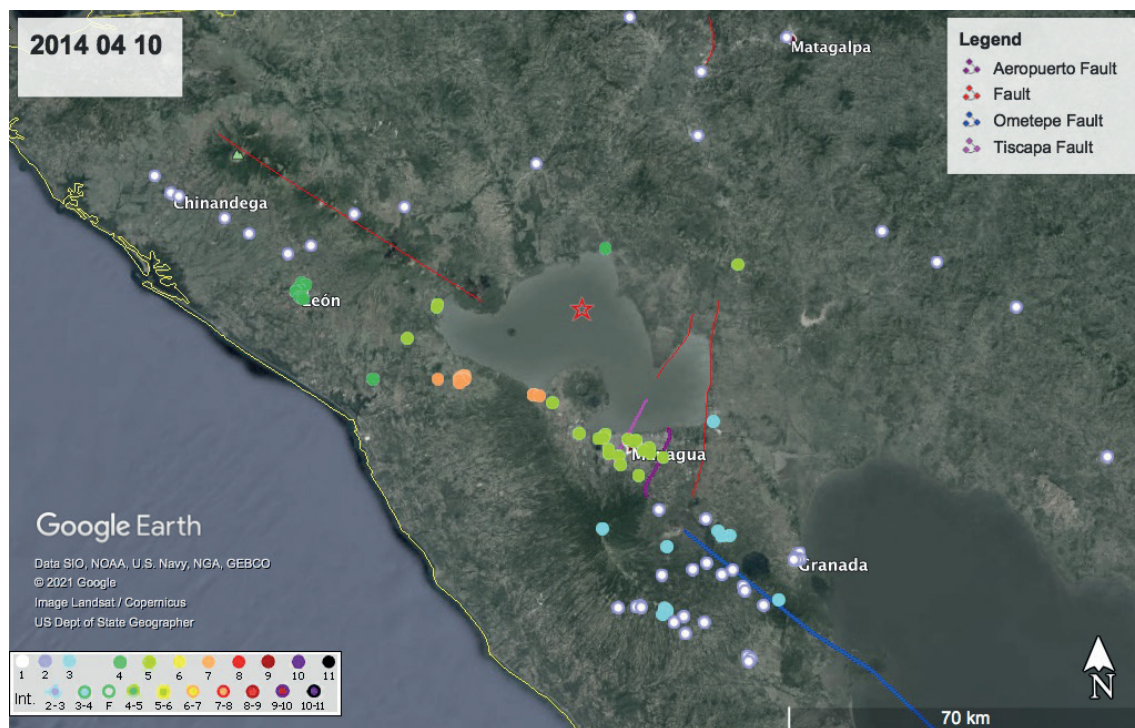


Fig. 4.48 - MDP set for the 10 April 2014 earthquake ($M 6.1$). The red star shows the location of epicentre in the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.48 - Conjunto MDP para el terremoto ($M 6.1$) del 10 de abril de 2014. La estrella roja muestra la ubicación del epicentro en el catalogo de origen (ISC019).

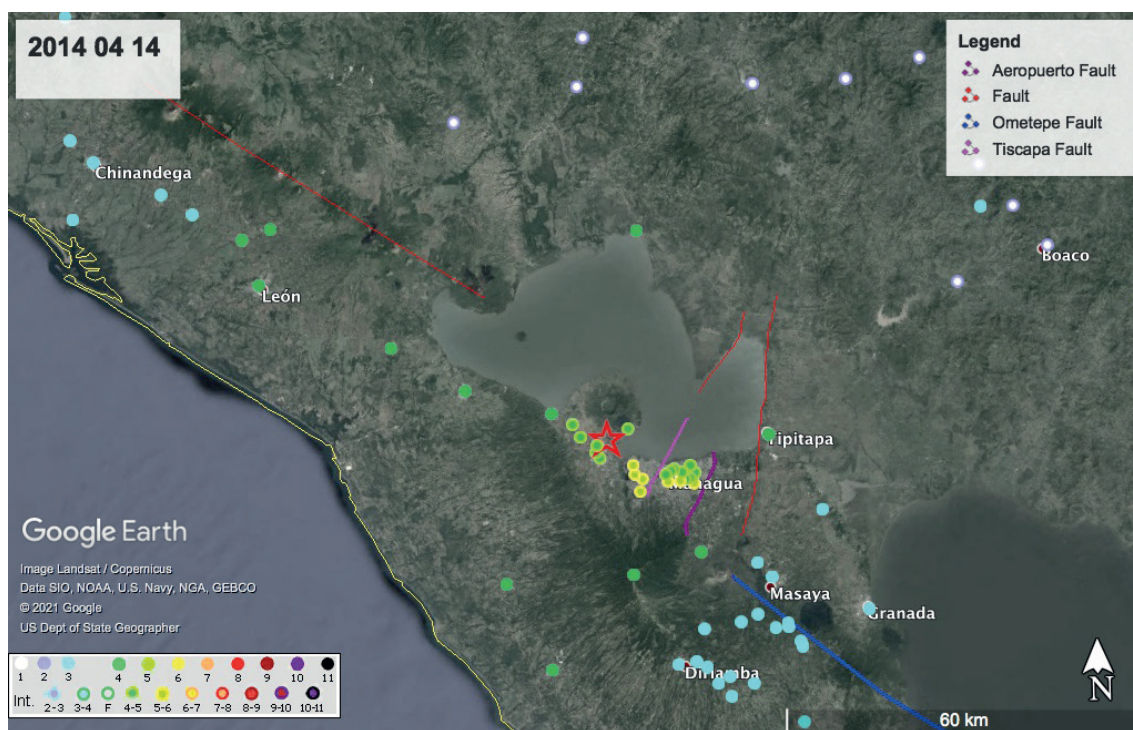


Fig. 4.49 - MDP set for the 14 April 2014 earthquake (M 5.2). The red star shows the location of epicentre in the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.49 - Conjunto MDP para el terremoto (M 5.2) del 14 de abril del 2014. La estrella roja muestra la ubicación del epicentro en el catalogo de origen (ISC019).

ing a seismic sequence, two MDP sets have been compiled (Figs. 4.48-4.49), using a local source [Acosta *et al.* (2014), given as MG9 in the database online]. An exhaustive analysis of the seismic sequence and of the location/magnitude assessment problems is given in Alvarez *et al.* (2018), from whom the preferred location is taken too.

4.3.3. Special cases

The “slow quake” of 1992, near coast of Nicaragua

The major earthquake that took place off the Pacific coast of Nicaragua on 2 September 1992 is not relevant for the consequences due to the seismic shaking, but for the tsunami, much larger than the expected one, given the size of the rupture [M_w 7.7; M_s 7.2: Tanioka *et al.* (2017)]. This tsu-

secuencia sísmica, dos conjuntos MDP han sido compilados (Figs. 4.48-4.49), usando una fuente local (Acosta *et al.*, 2014, given as MG9 en la base de datos en línea). Un análisis exhaustivo de la secuencia sísmica y de los problemas de evaluación de ubicación/magnitud se da en Álvarez *et al.* (2018), de quienes también se toma la ubicación preferida.

4.3.3. Casos especiales

El “terremoto lento” de 1992, cerca de la costa de Nicaragua

El gran terremoto que tuvo lugar frente a la costa del pacífico de Nicaragua, el 2 de septiembre de 1992, no es relevante por las consecuencias debidas a la sacudida sísmica, pero si para el tsunami, mucho más grande de lo esperado dado el tamaño de la ruptura (M_w 7.7; M_s 7.2, Tanioka *et al.*, 2017). Este tsunami es

nami is in fact considered the most destructive tsunami ravaging the Nicaraguan coast until now, causing about 170 fatalities, some dozen missing people, and leaving 13,000 homeless, with more than 1,500 homes destroyed (Satake *et al.*, 1993; Brizuela *et al.*, 2014). The total damage in Nicaragua is estimated at between 20 and 30 million U.S. dollars: it is well documented by daily reports from the United Nations Department of Human Affairs (UNDHA, 1992) as well as by field trips conducted soon after the earthquake (Preuss, 1994). Some damage was also reported in Costa Rica.

Several authors (see the ISC reference list at <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?evid=270936>) define this event as a 'tsunami earthquake'; they argue that a slow thrust earthquake occurred on the subduction interface between the Coco and Caribe plates; for the absence of sediments on the trench floor offshore of Nicaragua, the slip propagated up-dip all the way to the ocean bottom, triggering large tsunamis. The occurrence of slip on a plate interface filled with soft subducted sediments caused the rupture process to be slower than in ordinary subduction zone thrust earthquakes (Kanamori and Kikuchi, 1993; Velasco *et al.*, 1994). The focal mechanism is poorly assessed and corresponds to reverse faulting with a small right-lateral strike-slip component (fault plane solution by GCMT Project, <https://www.globalcmt.org/>: NP1:130/77/85; NP2:331/14/111; the preferred fault plane is NP2). The maximum run-up height was 9.9 m above mean sea level, but the run-up height was mostly between 3 and 8 m along the Nicaraguan coast (Satake, 1995). The tsunami ran inland 1,000 m at Masachapa, Nicaragua.

The descriptions found in the sources were exhaustive for assigning a degree of intensity, according to the Papadopoulos

de hecho, considerado el tsunami más destructivo que ha azotado la costa Nicaragüense hasta ahora, causando alrededor de 170 muertes, algunas docenas de personas desaparecidas y dejando a 13.000 sin hogar, más de 1.500 hogares destruidos (Satake *et al.*, 1993; Brizuela *et al.*, 2014). El daño total en Nicaragua es estimado entre 20 y 30 millones de dólares estadounidenses: lo cual está bien documentado por informes diarios del Departamento de Asuntos Humanos (UNDHA, 1992), así como por viajes de campo realizados poco después del terremoto (Preuss, 1994). También se reportaron algunos daños en Costa Rica.

Varios autores (vea la lista de referencias de ISC en <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/FormatBibprint.pl?evid=270936>) definen este evento como "tsunami-terremoto"; ellos argumentan que ocurrió un terremoto de empuje lento en la interfaz de subducción entre las placas Coco y Caribe. Debido a la ausencia de sedimentos en la trinchera, la ruptura pudo desplazarse hacia arriba hasta la superficie del fondo oceánico provocando un gran desplazamiento vertical en aguas profundas y generando así un gran tsunami. La ocurrencia de desplazamiento en una interfaz de placa llena de sedimentos blandos subducidos, hizo que el proceso de ruptura fuera más lento que en los terremotos comunes de empuje de la zona de subducción (Kanamori y Kikuchi, 1993; Velasco *et al.*, 1994). El mecanismo focal está pobremente controlado y corresponde a fallas inversas con una pequeña componente de deslizamiento lateral derecho (solución del plano de falla por el proyecto GCMT, <https://www.globalcmt.org/>: NP1:130/77/85; NP2:331/14/111; el plano de falla preferido es NP2). La altura máxima de ola fue de 9,9 m sobre el nivel medio del mar; pero a lo largo de la costa de Nicaragua, la altura de subida fue mayormente entre 3 y 8 m (Satake, 1995). El tsunami avanzó 1.000 m tierra adentro en Masachapa, Nicaragua.

Las descripciones encontradas en las fuentes fueron exhaustivas para asignar un grado de

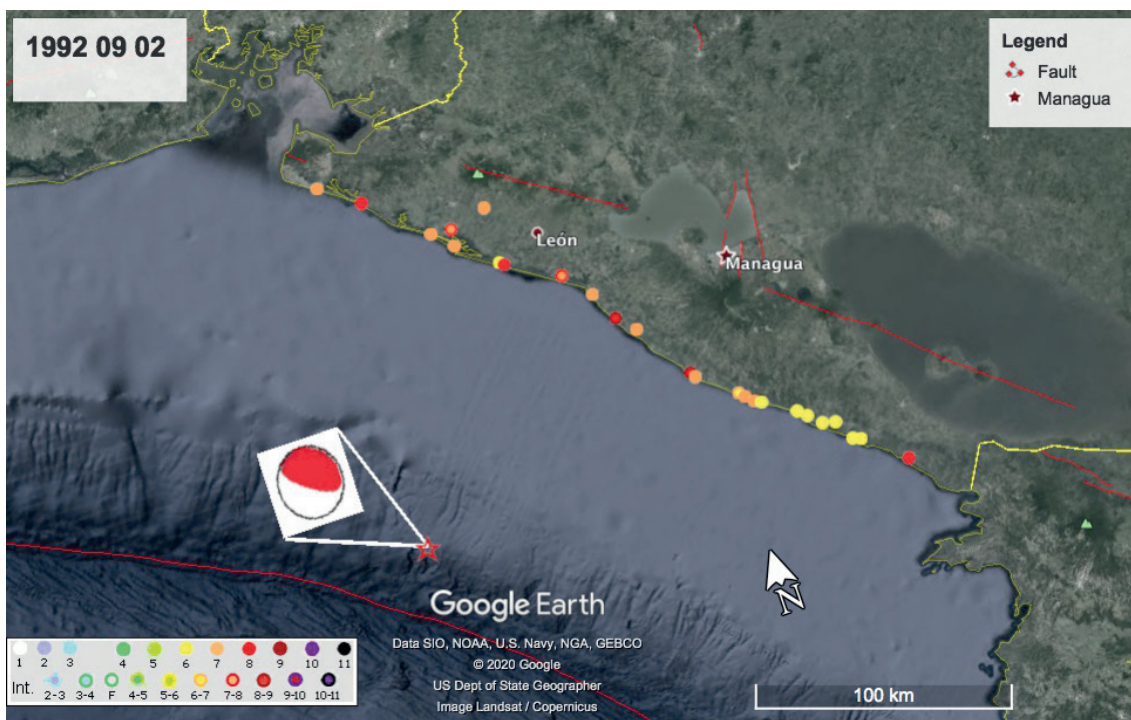


Fig. 4.50 - MDP set for the 2 September 1992 offshore Nicaragua earthquake. The IDPs are given in the Tsunami Intensity scale (TSU), as defined by Papadopoulos and Imamura (2001). The red star shows the location of the origin catalogue (ISC019).

Fig. 4.50 - Conjunto MDP para el terremoto del 2 de septiembre de 1992 costa afuera de Nicaragua. Los IDP son dados en la escala de intensidad de Tsunamis (TSU) según lo definido por Papadopoulos y Imamura, 2001. La estrella roja muestra la ubicación del catálogo de origen (ISC019).

and Imamura (2001) Tsunami Scale.

A total of 23 localities have been identified, geo-referenced and evaluated in terms of tsunami intensity: the maximum degree observed is given as TSU=VIII-IX, in the localities of Masachapa, San Juan del Sur, and Transito (Fig. 4.50). Note the variability of the effects along the coast, due to morphological features of the sea floor.

The unpublished study (Esposito, 2020, given as MG90 in the database) is briefly summarised here in terms of the source trees (Fig. 4.51), and the table of key information gathered for the intensity assignment (Table 4.6).

The work of Preuss (1994) accurately describes the damage along the Nicaraguan coast: it was mainly used for the assignment

intensidad, según la Escala de Tsunami de Papadopoulos y Imamura (2001).

Un total de 23 localidades, se han identificado, georeferenciado y evaluado en términos de intensidad tsunami: el grado máximo observado se da como TSU=VIII-IX, en las localidades de Masachapa, San Juan del Sur y Tránsito (Fig. 4.50). Es de notar la variabilidad de los efectos a lo largo de la costa, debido a las características morfológicas del fondo marino.

Un estudio inédito (Esposito, 2020, MG90 en la base de datos) se resume brevemente aquí en términos del árbol de fuentes (Fig. 4.51), y la tabla de información clave reunida para la asignación de intensidad (Tab. 4.6). El trabajo de Preuss (1994), precisamente describe el daño sufrido a lo largo de la costa de Nicaragua: fue principalmente usado para la asignación del

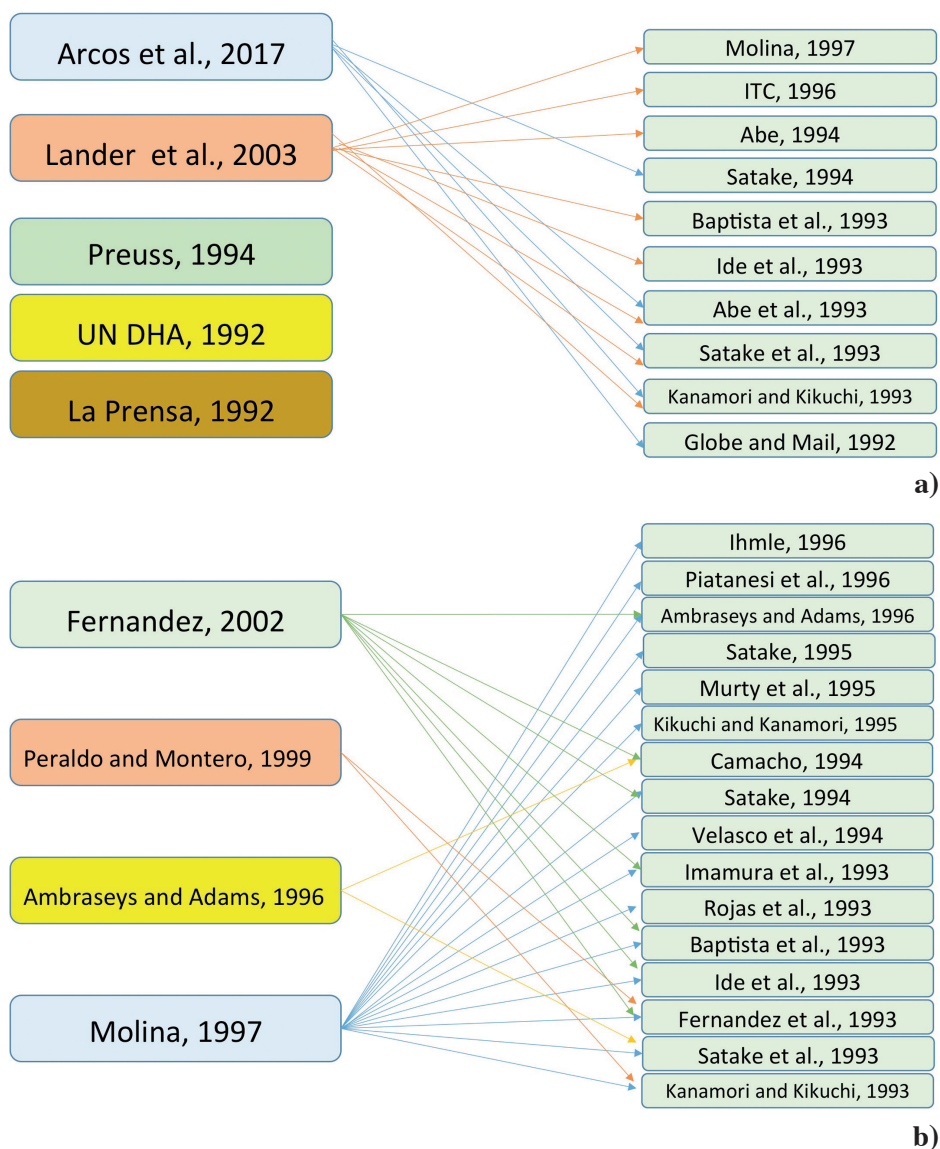


Fig. 4.51 - Source trees for the assessment of intensity according to the Tsunami Intensity Scale, for the 2 September 1992 “slow” earthquake: a) sources tree describing the effects along the coast; b) sources tree of earthquake and tsunami catalogue for the area.

Fig. 4.51 - Árbol de fuentes para la evaluación de intensidad según la escala de Intensidad de Tsunamis, para el terremoto “lento” del 2 de septiembre de 1992: a) árbol de fuentes que describe los efectos a lo largo de la costa; b) árbol de fuentes del catálogo de terremotos y tsunamis para la zona.

of the degree of tsunami intensity, after a comparison with the data given by Arcos *et al.* (2017) and Lander *et al.* (2003) that are in their turn related to field reports as shown in Fig. 4.51a. The sources used in the seismic and tsunami catalogues have been checked too (Fig. 4.51b). This information

grado de intensidad del tsunami, después de una comparación con los datos proporcionados por Arcos *et al.* (2017), y Lander *et al.* (2003), que a su vez están relacionados a informes de campo/ documentos como se muestra en la Fig. 4.51a. Las fuentes usadas en los catálogos sísmicos y de tsunamis también han sido revisadas (Fig.

Table 4.6 - Summary of the key information and related sources used to assign the intensity value in the Papadopoulos and Imamura (2001) scale (column TSU): the references are the number code in brackets as it follows: {1} Preuss, 1994; {2} UNDHA, 1992; {3} La Prensa, 1992; {4} Lander *et al.*, 2003.

Department	Municipality (Locality)	Human Toll	TSU	Damages	Runup	Inundation
RIVAS	SAN JUAN DEL SUR	7 Dead 42 Wounded 17 Missing {1}	8	Areas principal damage between San Juan del Sur and Masachapa... Severely hit with possibly 60 percent of houses destroyed {2}. 785 houses damaged, 56 destroyed {1}	15 m {3} 2-5 m {4}	300 m {3}
MANAGUA	MASACHAPA	9 Dead {2} 16 Dead 20 Wounded 11 Missing {1}	8-9	Areas principal damage between San Juan del Sur and Masachapa... The hardest hit town is reported to be Masachapa...considered the most affected {2}. 827 houses damaged, 80 destroyed {1}	3-6 m {4}	1.000 m {4}
??????????	SAN MARTIN		6	Have sustained damage/ loss of life {2}		
CARAZO	DIRIAMBIA (LA BOQUITA)		6-7	Have sustained damage/ loss of life... considered the most affected {2} 522 houses damaged {1}	2-6 m {4}	
CARAZO	JINOTEPE (HUEHUETE)	2 Dead {1}	7	Have sustained damage/ loss of life... considered the most affected {2} 849 houses damaged, 30 destroyed {1}	4-6 m {4}	
CARAZO	DIRIAMBIA (CASARES)	6 Dead 31 Wounded 11 Missing {1}	7	Have sustained damage/ loss of life... considered the most affected {2} 264 houses damaged, 52 destroyed {1}	4-6 m {4}	
MANAGUA	SAN RAFAEL DEL SUR (POCHOMIL)	9 Dead 13 Wounded {1}	7	Have sustained damage/ loss of life... {2} 563 houses damaged, 40 destroyed {1}	5 m {4}	
LEON	LEON (PONELOYA)		6	Have sustained damage/ loss of life... 70 houses damaged {2}	5 m {4}	
CHINANDEGA	CORINTO	1 Dead {2} 1 Dead 30 Wounded {1}	7	The tsunami damaged food and fuel storage facilities; water wells were flooded with salt water {2} 329 houses damaged, 9 destroyed {1}	3-4 m {4}	
LEON	LEON (SALINAS GRANDE)	4 Dead 20 Wounded 3 Missing {1}	7-8	917 houses damaged, 50 destroyed {1}	3-5 m {4}	

Tabla 4.6 - Resumen de la información clave y fuentes relacionadas utilizadas para asignar el valor de intensidad en la escala de Papadopoulos y Imamura (2001) (columna TSU): las referencias son el código numérico en paréntesis como sigue: {1} Preuss, 1994; {2}UNDHA, 1992; {3} La Prensa, 1992; {4} Lander *et al.*, 2003.

Departamento	Municipalidad (Localidad)	Pérdidas Humanas	TSU	Daños	Runup	Inundación
RIVAS	SAN JUAN DEL SUR	7 Fallecidos 42 Heridos 17 Desaparecidos {1}	8	Principales daños entre las áreas de San Juan del Sur y Masachapa... Severo impacto con posiblemente el 60 por ciento de casas destruidas {2}. 785 casas damnificadas, 56 destruidas {1}	15 m {3} 2-5 m {4}	300 m {3}
MANAGUA	MASACHAPA	9 Fallecidos {2} 16 Fallecidos 20 Heridos 11 Desaparecidos {1}	8-9	Principales daños entre las áreas de San Juan del Sur y Masachapa... Se informa que la ciudad más afectada es MASACHAPA... considerada la más afectada {2}. 827 casas damnificadas, 80 destruidas {1}	3-6 m {4}	1.000 m {4}
??????????	SAN MARTIN		6	Ha sufrido daños/pérdida de vidas {2}		
CARAZO	DIRIAMBIA (LA BOQUITA)		6-7	Ha sufrido daños/pérdida de vidas... considerada la más afectada {2} 522 casas damnificadas, {1}	2-6 m {4}	
CARAZO	JINOTEPE (HUEHUETE)	2 Fallecidos {1}	7	Ha sufrido daños/pérdida de vidas... considerada la más afectada {2} 849 casas damnificadas, 30 destruidas {1}	4-6 m {4}	
CARAZO	DIRIAMBIA (CASARES)	6 Fallecidos 31 Heridos 11 Desaparecidos {1}	7	Ha sufrido daños/pérdida de vidas... considerada la más afectada {2} 264 casas damnificadas, 52 destruidas {1}	4-6 m {4}	
MANAGUA	SAN RAFAEL DEL SUR (POCHOMIL)	9 Fallecidos 13 Heridos {1}	7	Ha sufrido daños/pérdida de vidas... {2} 563 casas damnificadas, 40 destruidas {1}	5 m {4}	
LEON	LEON (PONELOYA)		6	Ha sufrido daños/pérdida de vidas... daño a 70 casas {2}	5 m {4}	
CHINANDEGA	CORINTO	1 Fallecido {2} 1 Fallecido 30 Heridos {1}	7	El tsunami dañó la instalación de almacenamiento de alimentos y combustible; los pozos de agua se inundaron con agua salada {2} 329 casas damnificadas, 9 destruidas {1}	3-4 m {4}	
LEON	LEON (SALINAS GRANDE)	4 Fallecidos 20 Heridos 3 Desaparecidos {1}	7-8	917 casas damnificadas, 50 destruidas {1}	3-5 m {4}	

Table 4.6 - continued.

Department	Municipality (Locality)	Human Toll	TSU	Damages	Runup	Inundation
LEON	NAGAROTE (EL TRANSITO)	15 Dead 150 Wounded 10 Missing {1}	8-9	2493 houses damaged, 260 destroyed {1} 80% of the buildings were swept away (Arcos <i>et al.</i> , 2017)	10 m {4}	
LEON	LEON (MONTE RALO)		6	All the houses of Monte Ralo were washed away by the raging waves {3}		
CHINANDEGA	EL VIEJO (JIQUILILLO)	2 Dead 10 Wounded 6 Missing {1}	8	1,339 houses damaged, 253 destroyed {1}	2 m {4}	
CHINANDEGA	EL VIEJO (MECHAPA)	1 Dead 4 Wounded {1}	7	128 houses damaged, 33 destroyed {1}		
CHINANDEGA	EL VIEJO (PAREDONES-MADERAS)	1 Dead 6 Wounded {1}	7	417 houses damaged, 43 destroyed {1}		
CHINANDEGA	EI REALEJO	3 Wounded {1}	7-8	627 houses damaged, 55 destroyed {1}		
CHINANDEGA	CHICHIGALPA	1 Wounded {1}	7	388 houses damaged, 33 destroyed {1}		
LEON	LEON (PONELOYA-LAS PENITAS)	12 Dead 80 Wounded {1}	8	790 houses damaged, 70 destroyed {1}		
LEON	NAGAROTE (MIRAMAR)		7	309 houses damaged 35 destroyed {1}	4 m (Lander <i>et al.</i> , 2003)	
MANAGUA	VILLA EL CARMEN (SALAMINA-SAN DIEGO)	5 Dead 65 Wounded {1}	7	664 houses damaged, 12 destroyed {1}		
CARAZO	JINOTEPE (TUPILAPA)		6	330 houses damaged, 2 destroyed {1}		
CARAZO	SANTA TERESA (VERACRUZ-ESCALANTE-CHACOCENTE)	2 Wounded {1}	6	23 houses damaged, 1 destroyed {1}		
RIVAS	TOLA (EI GIGANTE)	6 Dead 6 Wounded 2 Missing {1}	6	153 houses damaged, 8 destroyed {1}		
RIVAS	TOLA (MANZANILLO)	2 Dead 1 Wounded 3 Missing {1}	6	54 houses damaged, 3 destroyed {1}		
RIVAS	TOLA (EI LIMON)		6	19 houses damaged, 15 destroyed {1}		
RIVAS	TOLA (PLAYA POPOYA)	15 Dead {1}	6	46 houses damaged, 5 destroyed {1}		
RIVAS	TOLA (EI ASTILLERO)	1 Dead 5 Wounded 6 Missing {1}	6	659 houses damaged, 13 destroyed {1}		

Tabla 4.6 - continuada.

Departamento	Municipalidad (Localidad)	Pérdidas Humanas	TSU	Daños	Runup	Inundación
LEON	NAGAROTE (EL TRANSITO)	15 Fallecidos 150 Heridos 10 Desaparecidos {1}	8-9	2493 casas damnificadas, 260 destruidas {1} 80% de los edificios fueron barridos (Arcos <i>et al.</i> , 2017)	10 m {4}	
LEON	LEON (MONTE RALO)		6	Todas las viviendas de Monte Ralo fueron arrastradas por las embravecidas olas {3}		
CHINANDEGA	EL VIEJO (JIQUILILLO)	2 Fallecidos 10 Heridos 6 Desaparecidos {1}	8	1,339 casas damnificadas, 253 destruidas {1}	2 m {4}	
CHINANDEGA	EL VIEJO (MECHAPA)	1 Fallecido 4 Heridos {1}	7	128 casas damnificadas, 33 destruidas {1}		
CHINANDEGA	EL VIEJO (PAREDONES-MADERAS)	1 Fallecido 6 Heridos {1}	7	417 casas damnificadas, 43 destruidas {1}		
CHINANDEGA	EI REALEJO	3 Heridos {1}	7-8	627 casas damnificadas, 55 destruidas {1}		
CHINANDEGA	CHICHIGALPA	1 Herido {1}	7	388 casas damnificadas, 33 destruidas {1}		
LEON	LEON (PONELOYA-LAS PENITAS)	12 Fallecidos 80 Heridos {1}	8	790 casas damnificadas, 70 destruidas {1}		
LEON	NAGAROTE (MIRAMAR)		7	309 casas damnificadas, 35 destruidas {1}	4 m (Lander <i>et al.</i> , 2003)	
MANAGUA	VILLA EL CARMEN (SALAMINA-SAN DIEGO)	5 Fallecidos 65 Heridos {1}	7	664 casas damnificadas, 12 destruidas {1}		
CARAZO	JINOTEPE (TUPILAPA)		6	330 casas damnificadas, 2 destruidas {1}		
CARAZO	SANTA TERESA (VERACRUZ-ESCALANTE-CHACOCENTE)	2 Heridos {1}	6	23 casas damnificadas, 1 destruidas {1}		
RIVAS	TOLA (EI GIGANTE)	6 Fallecidos 6 Heridos 2 Desaparecidos {1}	6	153 casas damnificadas, 8 destruidas {1}		
RIVAS	TOLA (MANZANILLO)	2 Fallecidos 1 Herido 3 Desaparecidos {1}	6	54 casas damnificadas, 3 destruidas {1}		
RIVAS	TOLA (EI LIMON)		6	19 casas damnificada, 15 destruidas {1}		
RIVAS	TOLA (PLAYA POPOYA)	15 Fallecidos {1}	6	46 casas damnificada, 5 destruidas {1}		
RIVAS	TOLA (EI ASTILLERO)	1 Fallecido 5 Heridos 6 Desaparecido {1}	6	659 casas damnificada, 13 destruidas {1}		

is provided for future investigations and for modelling purposes. Note also that some observations referred to the municipalities far from the coast, or unknown, have been discarded as no mention of the specific locality is provided.

The Nicaragua tsunami earthquake on 2 September 1992 and the Flores Island, Indonesia catastrophic tsunami on 12 December 1992, marked the beginning of ‘modern tsunami science’, becoming systematic with the Post-Tsunami Surveys and Tsunami Bulletin Board, advances in tsunami numerical modelling, as well as the high quality of sea level data, etc. (Kanoglu *et al.*, 2020).

4.4. Honduras

4.4.1. Introduction

The Republic of Honduras lies at the core of the central American isthmus, and it is the second largest country in the area. It borders to the west with Guatemala and El Salvador, to the north with the Caribbean Sea, to the east with Nicaragua and to the south with the Pacific Ocean.

The nation is administratively divided into 18 departments, subdivided into 298 municipalities; the capital Tegucigalpa is located in the central part of the country: about 1,300,000 inhabitants live there, making it the second most populous city in the Central American region after Guatemala City.

Honduras has a territorial area of 112,492 km², with a population of 9,282,036 inhabitants and a population density of 82 inhabitants/km² (<https://www.ine.gob.hn/V3/>). Politically it is a democratic and unitary republic, with presidential elections every 4 years.

From the geodynamic point of view,

4.51b). Esta información es proporcionada para futuras investigaciones, y para propósitos de modelado. Debe tenerse en cuenta que algunas observaciones referidas a las municipalidades lejos de la costa, o desconocidas, han sido descartadas ya que no se proporciona mención de la localidad específica.

El tsunami del terremoto de Nicaragua del 2 de septiembre de 1992, y el tsunami catastrófico de la Isla de Flores en Indonesia el 12 de diciembre del mismo año, marcaron el comienzo de la “ciencia moderna sobre tsunamis”, convirtiendo sistemáticamente, entre ellos, los Estudios Post Tsunami, los boletines de anuncios sobre Tsunamis y avances en la modelo numérico de tsunamis, así como datos de alta calidad del nivel del mar, etc. (Kanoglu *et al.*, 2020).

4.4. Honduras

4.4.1. Introducción

La República de Honduras está situada en el centro del istmo centroamericano, es el segundo país más grande de la región. Limita al oeste con Guatemala y El Salvador, al norte con el Mar Caribe, al este con Nicaragua y al sur con el Océano Pacífico.

La nación está dividida administrativamente en 18 departamentos que a su vez se dividen en 298 municipios, en la parte central se encuentra su capital Tegucigalpa donde viven alrededor de 1.300.000 habitantes, siendo la segunda ciudad más poblada de la región centroamericana después de Ciudad de Guatemala.

Honduras tiene una extensión territorial de 112.492 km², cuenta con una población de 9.282.036 habitantes y una densidad poblacional de 82 hab/km² (<https://www.ine.gob.hn/V3/>). Políticamente es una República democrática y unitaria, los mandatos presidenciales son de 4 años.

Desde el punto de vista geodinámico, Honduras se sitúa sobre la placa del Caribe: frente a las costas del norte, el límite entre la placa de

Honduras belongs to the Caribbean plate: offshore its northern coasts, the boundary between the North America and Caribbean plates is constituted by a huge sinistral shear zone, marked by systems of faults that from west to east are: 1) the Polochic-Motagua Fault System; 2) the Swan Island Transfer zone; and 3) the East-Enriquillo Transfer zone (see also, Álvarez-Gómez *et al.*, 2008; Álvarez-Gómez, 2009; Guzman-Speziale, 2010).

Within its territory, the Honduras depression is formed by several graben systems (Comayagua, Sula, Santa Barbara, etc) that run approximately N-S, from the Caribbean coasts to the Honduras Pacific coast. According to Cáceres and Kulhanek (2000), the rate of deformation in the Honduras depression is about 5 mm/yr, a value that correlates well with other studies (e.g. Guzmán-Speziale, 2001).

Other known faults, such as the Jocotan-Chamelecón fault to the east and the Guayape fault that crosses the country from NE to SW, do not seem to be very active. In the Gulf of Fonseca, the faults are oriented toward north between the volcanic centres (Alvarado *et al.*, 2011). Moving south-westwards, in the Pacific Ocean, the Middle American trough represents the subduction zone where the Coco plate is subducted under the Caribbean plate. The subduction zone below Honduras is supposed to have an inclination between 60° and 80°, thus causing the relevant seismicity that has been detected up to 200 km depth (Escobar Figueroa, 2008) and the high volcanism at the front of the Caribbean plate. This volcanism is active in El Salvador and Nicaragua, but not in Honduras.

The Permanent Contingency Commission (COPECO) is in charge of monitoring seismic activity. It currently manages a network of 15 seismic stations distributed in 14

Norteamérica y el Caribe está constituido por una enorme zona de corte siniestral: el límite Norte América - Caribe, marcado por un sistema de fallas que de oeste a este son: 1) Sistema de Fallas Polochic-Motagua; 2) Transformante de las Islas de Swan; y 3) La Transformante de Oriente - Enriquillo (Álvarez-Gómez *et al.*, 2008; Álvarez-Gómez, 2009; Guzman-Speziale, 2010).

Dentro de su territorio, la “*depresión de Honduras*”, está compuesta por varios grabens (Comayagua, Sula, Santa Barbara, etc) que corren aproximadamente de N-S, desde las costas del Caribe hasta la costa del Pacífico de Honduras. Según Cáceres y Kulhanek (2000), la velocidad de deformación en la depresión de Honduras es aproximadamente de 5 mm/año, un valor que se correlaciona bien con estudios posteriores (ver Guzmán-Speziale, 2001).

Otra fallas conocidas, tal como la falla Jocotan-Chamelecón hacia al este, y la falla de Guayape que cruza al país NE-SO, no parecen ser muy activas. En el golfo de Fonseca, las fallas presentan tendencia al norte entre los centros volcánicos (Alvarado *et al.*, 2011). Moviéndose hacia el Suroeste, en el Océano Pacífico, la fosa Mesoamericana representa la zona de subducción donde la placa del Coco subduce por debajo de la placa del Caribe. La zona de subducción por debajo de Honduras tiene una inclinación de entre 60° y 80°, provocando la sismicidad relevante que se ha reconocido hasta los 200 km de profundidad (Escobar Figueroa, 2008) y un alto vulcanismo en el frente de la placa caribeña. Este vulcanismo es activo en El Salvador y Nicaragua, pero no en Honduras.

El monitoreo de la actividad sísmica está a cargo de la Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), que actualmente maneja una red de 15 estaciones sísmicas distribuidas en 14 departamentos, todas equipadas con sensores de 3 componentes de periodo corto. Dentro de la red nacional, la estación TGUH (ubicada en la capital) está a cargo del Servicio Geológico de

departments, all equipped by 3-component short-period sensors. Within the national network, the TGUH station (located in the capital town) is managed by the United States Geological Survey (USGS), and it has both accelerometer and broadband sensors. However, the small national network still has operational problems, and it suffers from frequent periods of inactivity.

Seeking to fill that gap, the Earth Physics Observatory of the National Autonomous University of Honduras, has been working for the construction of the IHCIT/UNAH seismic network, currently managing an independent network of 12 stations (vertical component, short-period only) distributed in the more seismically active part of the country. In the future, an extension of the network is foreseen, with the inclusion of 3-component low-cost sensors to improve the quality of monitoring and the location of seismic events (<https://stationview.raspberrypi.org/>).

According to the GHEA (Albini *et al.*, 2013), during the pre-instrumental period, most of the seismic events were located outside of Honduras, with magnitudes from 6.5 to 7.7 in 1539, 1855, and 1856. During the instrumental period, part of the seismic activity is concentrated in the central Honduras depression, where small to moderate earthquakes occur; nonetheless, most of the events occur offshore, in the Atlantic and Pacific margins of the Caribbean plate. The seismicity along the Guatemala and El Salvador border is significant too. The catalogue compilation adopted as reference catalogue for the MARCA-GEHN online database lists for Honduras 84 events, represented in the map and graph of Figs. 4.52 and 4.53.

Given the lesser relevance of earthquake damage with respect to the countries, the documentary sources are rare for Honduras.

los Estados Unidos (USGS), y tiene sensores de acelerómetro y de banda ancha. Sin embargo, la pequeña red nacional presenta problemas en su funcionamiento, y sufre frecuentes periodos de inactividad.

En busca de llenar ese vacío, el Observatorio de Física de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, ha estado trabajando para la construcción de la red sísmica IHCIT/UNAH; actualmente gestiona una red independiente de 12 estaciones (componente vertical, periodo corto) distribuidas en la parte más sísmicamente activa del país. En el futuro, se prevé una ampliación de la red, con la inclusión de sensores de bajo costo de 3 componentes para mejorar la calidad del monitoreo y la localización de eventos sísmicos (<https://stationview.raspberrypi.org/>).

Según el archivo histórico global de terremotos (GHEA, Albini *et al.*, 2013), durante el periodo pre-instrumental, la mayoría de los eventos sísmicos se han ubicado fuera de Honduras, con magnitudes entre 6,5 a 7,7 en 1539, 1855 y 1856. Durante el periodo “instrumental”, parte de la actividad sísmica se concentra en la depresión de Honduras, donde ocurren sismos de pequeños a moderados; sin embargo, la mayoría de los eventos ocurren costa afuera, en los márgenes Atlántico y Pacífico de la placa caribeña. En la parte norte (Atlántico), la sismicidad ocurre mayormente a lo largo del límite entre las placas Caribe-Norteamérica, mientras en el sur se concentra en la zona de subducción, frente a las costas del Golfo de Fonseca. Existen otras zonas relevantes como la actividad a lo largo de la frontera entre Guatemala y El Salvador.

La compilación del catálogo adoptado como catálogo de referencia para la base de datos en línea MARCA-GEHN, lista para Honduras alrededor de 84 eventos, representados en el mapa y gráfico de las figuras 4.52 y 4.53.

Dada la menor observancia de los daños por terremotos con respecto a los países vecinos, las fuentes documentadas son escasas, para Hondu-

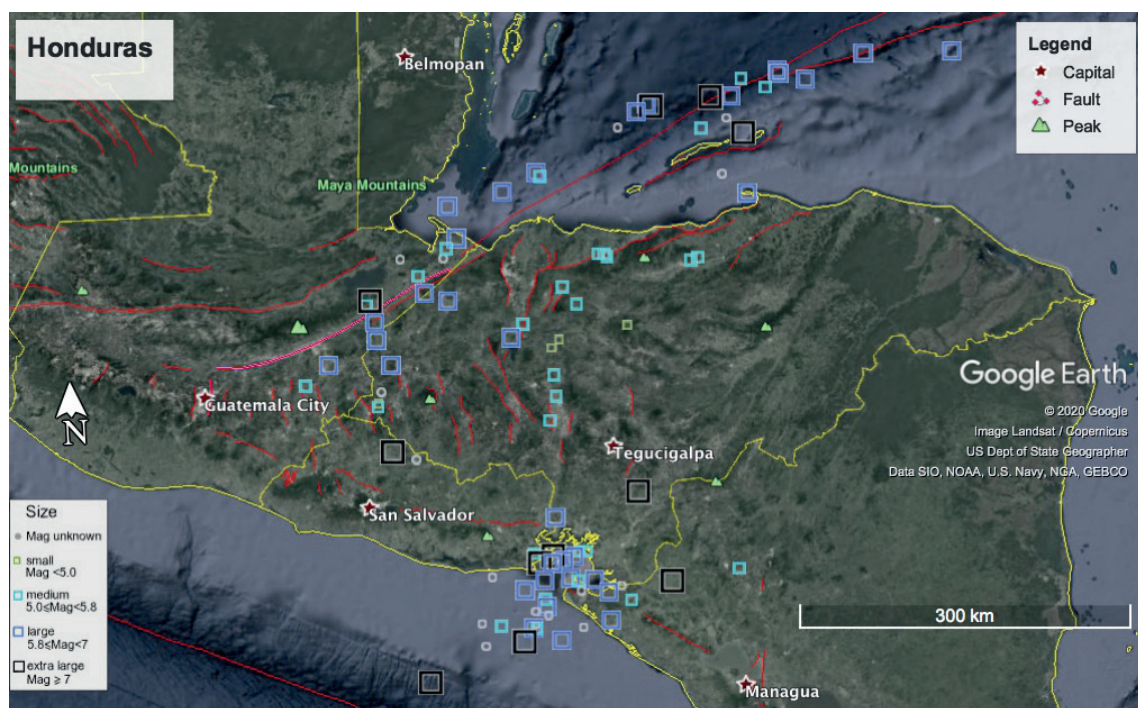


Fig. 4.52 - Epicentral map of the MARCA-GEHN earthquakes falling in an arbitrary polygon that surrounds the territory of Honduras. The 84 extracted events are represented in Fig. 4.53.

Fig. 4.52 - Mapa de epicentros de los terremotos de MARCA-GEHN que caen en un polígono arbitrario que envuelve el territorio de Honduras. La evolución temporal de las magnitudes de los 84 eventos extraídos se representa en la Fig. 4.53.

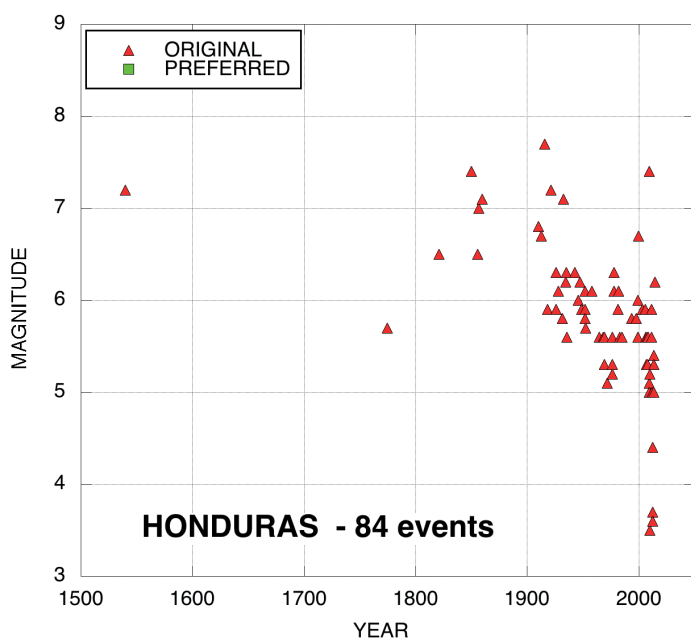


Fig. 4.53 - Graph of the magnitude versus time of the 84 events extracted from the MARCAGEHN catalogue for the territory of Honduras (see map in the previous figure). Note the decrease in minimum magnitude versus time, according to the completeness rules in the original catalogue.

Fig. 4.53 - Gráfico de la evolución temporal de magnitud de los 84 eventos extraídos del catálogo MARCA-GEHN para el territorio de Honduras (ver mapa en la figura anterior). Se evidencia la disminución de la magnitud mínima frente al tiempo, de acuerdo con las reglas de completitud del catálogo original.

In this study, we collected information deriving from historical studies, press, and resorted extensively to the DYFI questionnaires from USGS, to depict damage/perception patterns, and thus potential similarities with the earthquakes of the past. A more intense census and investigation on local historical archives is on-going.

4.4.2. Studied events

The collection of macroseismic data performed in this study contains 11 events (see Table 4.7), and a total of about 371 IDPs falling inside the national borders. Most of the data belong to the very last instrumental period and are moderate-to-light magnitude events. Five earthquakes, including the only historical one, are located inside the Honduras depression; the remaining earthquakes are related to the North American-Caribbean plate boundary, and to the onland faults identified along the country's borders.

During the historical period, a series of potentially $M 7+$ earthquakes occurred, though the review of the investigated sources has not provided sufficient information about the damage and effects to compile reliable macroseismic data sets. However, the existence of unpublished sources has been acknowledged that will give, in the future, the possibility to improve and expand the collection of macroseismic data for the pre-instrumental period. This type of research will open new perspectives for better reconstructing the seismic characteristics of the country.

Conversely, minor events have also been compiled since 2007: they are represented by intensities derived from DYFI. As previously stated, the purpose of this collection is to find patterns that can help in interpreting similar distribution of effects (or damage) for events of the past, thus constraining their earthquake sources. This is the case for example of the most recent earthquake

ras. Para este trabajo, se ha recopilado información derivada de estudios históricos, prensa, y se ha recurrido considerablemente a los cuestionarios del DidYouFeelIT (DYFI) del USGS, para representar patrones de daño/percepción, y así posibles similitudes con los terremotos del pasado. Un censo e investigación más intensa sobre repositorios históricos locales está en curso.

4.4.2. Eventos estudiados

La recopilación de datos macrosísmicos realizada por este estudio contiene 11 eventos (Tab. 4.7), y un total de aproximadamente 371 IDP dentro de las fronteras nacionales. Los datos en su mayoría pertenecen al último periodo instrumental y son eventos de magnitud moderada a ligera. Cinco sismos, incluyendo el único histórico, se encuentran dentro de la depresión de Honduras; el resto de terremotos se asocia al límite de placa Norteamérica-Caribe, y a fallas en tierra firme identificadas a lo largo de las fronteras del país.

Durante el período histórico, ocurrieron una serie de posibles terremotos $M 7+$; la revisión de las fuentes investigadas no ha previsto información suficiente sobre los daños y efectos para compilar conjuntos de datos macrosísmicos confiables. Sin embargo, se ha reconocido la existencia de fuentes inéditas que darán, en el futuro, la posibilidad de mejorar y ampliar la recopilación de datos macrosísmicos para el periodo pre-instrumental. Este tipo de investigación abrirá nuevas perspectivas para reconstruir mejor las características sísmicas del país.

Por otro lado, eventos menores también se han recopilado desde 2007; estos son representados por intensidades derivadas de DYFI. Como se dijo anteriormente, el propósito de esta colección es encontrar patrones que puedan ayudar a interpretar distribuciones similares de efectos (o daños) para eventos del pasado, limitando así la fuente de terremotos. Este es el caso por ejemplo del sismo más reciente referido a Honduras en MARCA-GEHN, ocurrió el 10 de

Table 4.7 - List of MDPs entered in MARCA-GEHN for Honduras. The earthquake parameters usually refer to the origin catalogue: if indicated in round brackets, the Date/Origin Time and Epicentral Area of the origin catalogue has been substituted by a new preferred one, based on the information gathered in this study by means of the IDPs, and by controls on existing literature; magnitude in brackets indicates that a new value is entered as an alternative, preferred parameter. Origin time in the catalogue is given in UTC; sometimes it is given in local time, to be more immediately related to the cited sources. The maximum intensity (*I_{max}*) is given in MM if not differently specified.

Tabla 4.7 - Lista de MDP ingresados en MARCA-GEHN para Honduras. Los parámetros del terremoto generalmente se refieren al catálogo original, pero en algunos eventos la fecha, hora, magnitud y/o área epicentral han sido sustituidas por otras soluciones preferidas, en base a la información recopilada en este estudio por medio de los IDP, y por los controles de la literatura existente. En estos casos los datos del catálogo original se indican entre paréntesis. La hora origen en el catálogo siempre se proporciona en UTC, si bien en algunos eventos se especifica además la hora local, para facilitar la relación con las fuentes citadas. La intensidad máxima (*I_{max}*) se proporciona en MM si no se indica otra escala diferente.

N	EVENTID	Date	Origin Time	Epicentral Area	Mag	IDP Num	<i>I_{max}</i>	Reloc
1	1774.1014	1774-10-14	not given	((Honduras)) Comayagua	5.7	11	VII-VIII	N
2	12964692	2007-09-15	17:59:47	Cortes	5.3	9	VI (DYFI)	N
3	12867661	2009-05-28	08:24:46	[Atlantic Ocean]	7.4	162	IX	N
4	12938960	2009-06-06	04:37:36	[Atlantic Ocean]	5.0	9	IV (DYFI)	N
5	13383611	2009-06-30	16:22:29	Yoro	5.0	9	V (DYFI)	N
6	14302584	2010-02-11	17:43:02	Yoro	3.5	12	V (DYFI)	N
7	600388710	2012-02-06	10:30:23	Comayagua	4.4	9	IV (DYFI)	N
8	600476373	2012-02-07	16:16:41	Comayagua	3.7	7	III (DYFI)	N
9	601511888	2012-08-02	15:36:29	Ocotepeque	3.6	7	IV (DYFI)	N
10	602780308	2013-04-10	19:14:03	Atlantida	5.4	33	V (DYFI)	N
11	611634051	2018-01-10	02:51:33	[Atlantic Ocean]	7.5	40	VIII (DYFI)	N

in MARCA-GEHN referring to Honduras, that occurred on 10 January 2018 (*M_w* 7.6), a potential twin of earthquakes that affected the colonial localities of the Atlantic coast, in 1855-1856.

The main earthquakes uploaded in the database are described briefly hereinafter.

The 1774 Comayagua earthquake

On 14 October 1774, an earthquake occurred that caused major damage to the city of Comayagua and its surroundings. Destruction was reported for churches, houses and prisons, etc. The socio-economic difficulties experienced in the city prolonged the post-disaster recovery of the local communities. PEMO999, from a source of the General Archive of the Indies (Spain),

enero de 2018 (*M_w* 7.6), un potencial gemelo de los terremotos que afectaron las localidades coloniales de la costa Atlántica, en 1855-56.

Los principales terremotos cargados en la base de datos se describen brevemente a continuación.

El sismo de Comayagua 1774

El 14 de octubre de 1774, ocurrió un terremoto que ocasionó grandes daños a la ciudad de Comayagua y sus alrededores. Se reportó destrucción en iglesias, casas, cárceles, etc. Las dificultades socioeconómicas experimentadas en la ciudad habían prolongado la recuperación de las comunidades locales posterior al desastre.

Peraldo y Montero (1999) de una fuente del Archivo General de Indias (España), reporta

report that on 14 October, starting at 09:15 a.m. (local time) several earthquakes were felt. Two strong ones anticipated the most important event that lasted two minutes. Sutch (1981) reports that the earthquakes occurred in Tegucigalpa and Comayagua, cities rarely affected by seismicity, assessing for both the cities an MM of VI. This earthquake is not reported in the global historical catalogue GHEA (Albini *et al.*, 2013), as it is below its magnitude threshold.

The macroseismic data set of 11 localities (Fig. 4.54) has been derived from three sources, namely PEMO999 (given with the code MG39 in the database), Sutch (1981) (MG58), and a local historical report (MG52). The research in the local archives, despite the painful mournig (Sánchez¹) is still on-going.

Sutch (1981) relates this tremor to the depression zone of Honduras, while PEMO999 associate the sequence more precisely to the Comayagua graben. According to the IDPs collected so far, the epicentre proposed by PEMO999 is retained, as it is barycentric to the damage reported in the different localities. If confirmed, the large area of damages, and the long duration of the main shock, suggest raising the magnitude assigned to this earthquake and/or considering these earthquakes a multi-fault sequence.

The seismic activity in the Honduras Depression, the area where a set of grabens have been detected and mapped (Styron *et al.*, 2020), is better documented during the last decades, thus giving the impression

que el 14 de octubre a las 09:15 (hora local) se sintieron varios terremotos. Dos de ellos, mucho más fuertes, precedieron al evento más importante que duró dos minutos. Sutch (1981) informa que los terremotos ocurrieron en Tegucigalpa y Comayagua, ciudades raramente afectadas por la sismicidad, evaluando para ambas ciudades un MM de VI. Este terremoto no se informa en el catálogo global histórico GHEA (Albini *et al.*, 2013), ya que está por debajo de su umbral de magnitud.

El conjunto de datos macrosísmicos de 11 localidades (Fig. 4.54) se ha derivado de tres fuentes, es decir PEMO999 (dado con el código MG39 en la base de datos), Sutch, 1981 (MG58) y un reporte histórico local (MG52). La investigación en los archivos locales, aún está en curso a pesar del profundo vacío (Sánchez¹).

Sutch relaciona este temblor a la zona de depresión de Honduras, mientras PEMO999 asocia la secuencia más precisamente al graben de Comayagua. Según los IDP recolectados hasta ahora, el epicentro propuesto por PEMO999 es conservado, ya que es baricéntrico al daño reportado en las diferentes localidades. Si se confirma, la gran área de daños, y la larga duración del choque principal sugiere elevar la magnitud asignada a este terremoto y/o considerar estos terremotos una secuencia de fallas múltiples.

La actividad sísmica en la depresión de Honduras, el área donde un conjunto de grabens se han contado y mapeado (Styron *et al.*, 2020), está mejor documentada durante las últimas décadas, dando así la impresión de que hay un incremento en la ocurrencia de sismos, que en sí, son producto de la deformación (extensión)

¹ Luis Sánchez (1958-2020) was professor of History at the National Autonomous University of Honduras (UNAH); his main scientific interests focused on the historical geography, innovation and development of virtual education at UNAH. He started collaborating with the RIESCA Seismology Working Group in 2019 and he organised a field trip on the historical traces of the Comayagua 1774 earthquake, to be held during the international meeting planned in March 2020, then partially canceled for the pandemic situation. He passed away for COVID-19 in August 2020.

¹ Luis Sánchez (1958-2020) fue profesor de Historia en la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH); sus principales intereses científicos se centraron en la geografía histórica, innovación y desarrollo de la educación virtual en la UNAH. Comenzó a colaborar con el Grupo de Trabajo de Sismología de RIESCA en 2019, organizó un viaje de campo sobre las huellas históricas del terremoto de Comayagua de 1774, a realizarse durante el encuentro internacional previsto en marzo de 2020, luego cancelado parcialmente por la situación pandémica. Falleció por COVID-19 en Agosto de 2020.

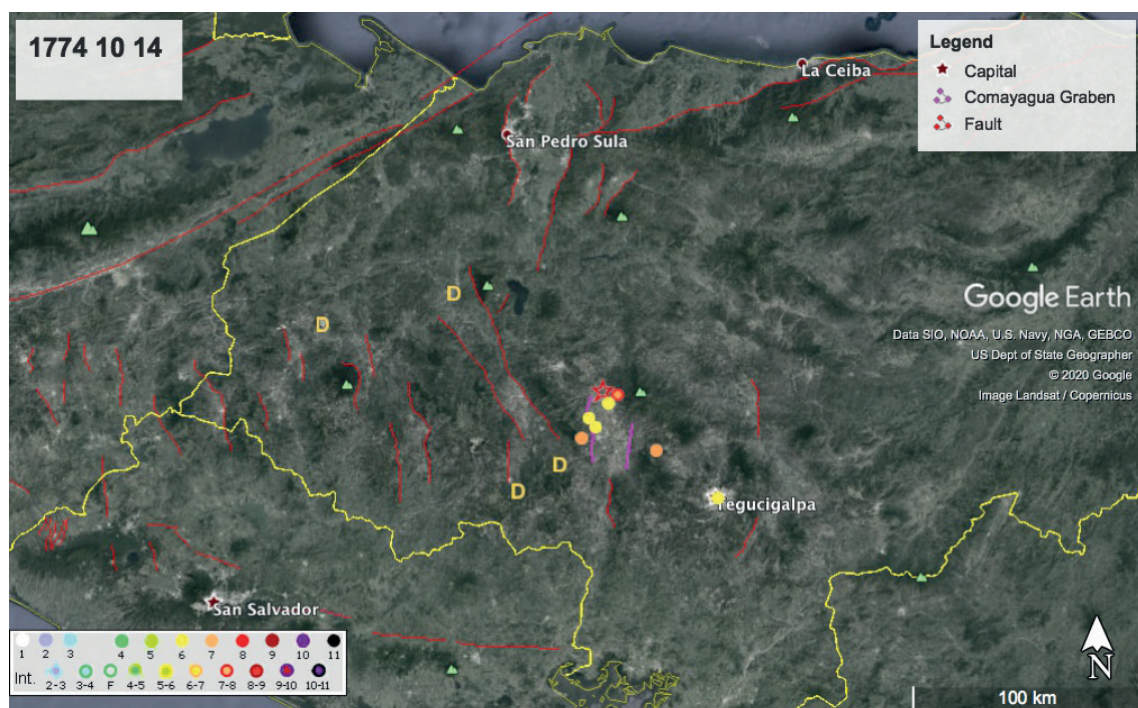


Fig. 4.54 - MDP set for the 14 October 1774 earthquake. The red star shows the location proposed by PEMO999 and retained for the online database.

Fig. 4.54 - Conjunto MDP para el sismo del 14 de octubre de 1774. La estrella roja muestra la ubicación propuesta por PEMO999 y conservado de la base de datos en línea.

that there is an increase in the activity rates. They are believed to occur for the internal deformation of the Caribbean plate. The events are shallow and with magnitudes up to 5.5-6.0: two events occurred near Yoro in 1969, near Comayagua and La Paz in 1971 and 1976, and near Cortes in 2007. Some low magnitude events have been collected in the database, using DYFI questionnaires (events n. 2, 5-9 in Table 4.7). No damage is expected or observed for these earthquakes, but they represent a preliminary attempt to use macroseismic data to distinguish between local and deep earthquakes in the inner part of the country, provided that the instrumental capabilities are still not sufficient. Future analyses will be devoted to compare the felt/damage area of recent and old earthquakes, as a contribution to revising the earthquake catalogue for the area.

interna a lo largo de los grabens que componen esta zona. Los eventos son superficiales y con magnitudes de hasta M 5,5-6,0: dos eventos ocurrieron cerca de Yoro en 1969, cerca de Comayagua y La Paz en 1971 y 1976, y cerca de Cortes en 2007. Algunos eventos de baja magnitud se han recopilado en la base de datos, usando cuestionarios DYFI (eventos n.2, 5-9 en la tabla 4.7). No se esperan ni se observan daños por estos terremotos, pero representan un intento preliminar de usar datos macrosísmicos para discriminar entre terremotos locales y profundos en la parte interior del país, en vista de que las capacidades instrumentales todavía no son suficientes. Futuros análisis se dedicaran a comparar el área con reportes de daño o en donde los eventos recientes como antiguos, han sido sentidos, como una contribución para la revisión del catálogo de terremotos para el área. Para una comparación visual del área de percep-

For a visual comparison of the perception area and epicentral location, as given by the international agency ISC, we would direct the reader to the online database.

The 2009 offshore Honduras earthquake

On 28 May 2009, at 2:24 a.m. local time (08:24 UTC) the most damaging earthquake for Honduras of the last decades occurred, offshore the Honduran Atlantic coast. It was strongly felt in Mexico, El Salvador, and northern Nicaragua, but no major damage was reported in those countries; Guatemala and Belize underwent some damage to the buildings [USGS (2009a) quoted as; MG30 in Appendix 1]. In Honduras, the offshore earthquake damaged or destroyed more than 13,000 buildings across northern Honduras, and major infrastructure, such as port terminals, bridges and levees, were also seriously damaged. The known death toll from the quake stood at 20, and 136 were injured [Comisión Permanente de Contingencias COPECO (2009) cited as MG32]. Most of the damage occurred in the northern area of the country including Atlántida, Cortés, Intibuca, and Santa Bárbara (COPECO, 2009). The seismic event produced liquefaction phenomena as well as sand boils, surface cracks and lateral spreading. The liquefaction effect was observed to cause additional damage to infrastructure including terminals, ports, wharfs, and small buildings located in and near Puerto Cortes and Omoa [Luna (2010) and Belarbi *et al.* (2009), quoted also as Earthquake Engineering Research Institute (2009) and in the following indicated as EERI (2009)].

According to GCMT, the M_w 7.3 earthquake was due to a left-lateral strike-slip fault, within the transform fault zone of the Swan Islands, a branch of the boundary between the North American and Caribbean plates. In this region, the strain rate is es-

ción y ubicación epicentral, como se indica por la agencia internacional ISC; dirigimos al lector directamente a la base de datos en línea.

El sismo de Honduras costa afuera de 2009

El 28 de mayo de 2009, a las 2:24 hora local (08:24 UTC) ocurrió el terremoto que más daño ha ocasionado a Honduras en las últimas décadas, frente a la costa Atlántica Hondureña. Fue sentido fuertemente en México, El Salvador y el Norte de Nicaragua, pero no se reportaron daños mayores en estos países; Guatemala y Belice sufrieron algunos daños a edificios (USGS, 2009a; MG30 en Apéndice 1). En Honduras, el terremoto costa afuera dañó o destruyó más de 13.000 edificios en el norte de Honduras, e infraestructuras importantes, tal como terminales portuarias, puentes y diques, también fueron seriamente dañados. La cifra de personas fallecidas se situó en 20, y 136 resultaron heridas (Comisión Permanente de Contingencias - COPECO, 2009, MG32). La mayoría de los daños ocurrieron en la zona norte del país incluyendo Atlántida, Cortés, Intibucá y Santa Bárbara (COPECO, 2009). El evento sísmico produjo procesos de licuefacción así como volcanes de arena, grietas superficiales y extensión lateral. Se observó que los efectos de licuefacción causaron daños adicionales a la infraestructura incluyendo terminales, puertos, muelles, y edificios pequeños ubicados en y cerca de Puerto Cortés y Omoa (Luna, 2010; Belarbi *et al.*, 2009, también citado como Earthquake Engineering Research Institute, 2009; en adelante identificado como EERI009).

De acuerdo al GCMT, el terremoto M_w 7,3 se debió a la falla de deslizamiento lateral izquierdo, dentro de la zona de falla transformante de las Islas Swan, un segmento del límite entre las placas de Norteamérica y Caribe. En esta región, la tasa de deformación se estima aproximadamente en unos 20 mm/año (EERI009; Graham *et al.*, 2012).

timated at about 20 mm/yr (EERI, 2009; Graham *et al.*, 2012).

Documentation of local site effects were available for La Ceiba, El Progreso, San Pedro Sula, Puerto Cortes, and Roatan. Shulman and Mooney (2009), according to the MM scale, assess VIII degree (one unit higher than DYFI) to the damage recorded in the city of El Progreso, about 160 km away from the epicentre, which was one of the most affected cities.

After the main event, several aftershocks were recorded north of Roatan Island, along the fault, and on the mainland too (see the earthquake list provided in the database); they are considered linked to the reactivation of local minor faults (e.g. Río Viejo, La Ceiba faults) and responsible for the damage caused in La Ceiba and Olanchito [see Tenorio *et al.* (2009), in the database referred to with the code MG7].

We remind the readers that in the past, the onland south-western most continuation of the Swan Islands fault system, namely the Motagua fault, had caused the devastating Guatemala earthquake of 4 February 1976, already described in chapter 4.2.2.

For the 28 May 2009 earthquake, 162 IDPs have been collected from local reports (COPECO, 2009; Tenorio *et al.*, 2009) and from the USGS online macroseismic survey (USGS, 2009a). The data refer to Honduras and El Salvador, while the information available for Guatemala and Nicaragua has not been collected yet. The MDP set (Fig. 4.55b) shows some anomalies in the decrease of the effects as a function of the epicentral distance. Shulman and Mooney (2009) suggest some reasons to explain them, such as for example the damage to infrastructure in some localities along the northern coast (intensities up to VIII, reached in El Progreso and La Ceiba, at 73 km distance), in contrast to what happened on the island of Roatan,

Documentación de los efectos locales de sitio estaban disponibles para La Ceiba, El Progreso, San Pedro Sula, Puerto Cortés y Roatán. Shulman y Mooney (2009), de acuerdo a la escala MM, asignan VIII grados (una unidad más que “Did you feel it”) al daño registrado en la ciudad de El Progreso, unos 160 km de distancia desde el epicentro, siendo una de las ciudades más afectadas.

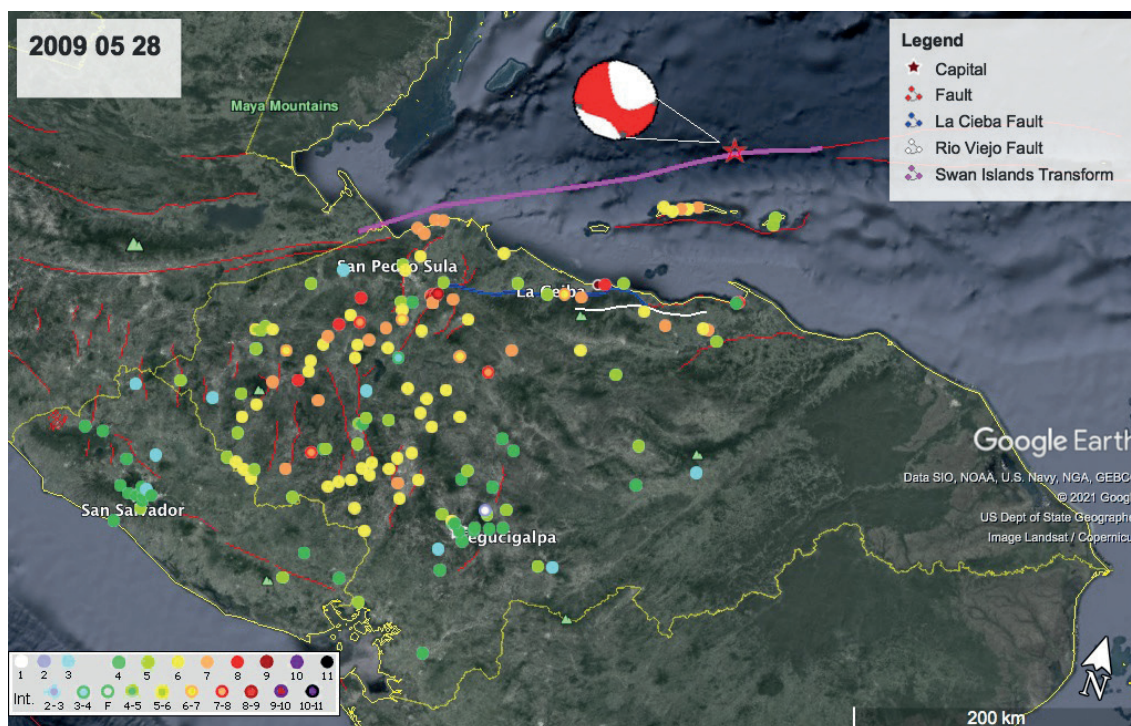
Después del evento principal, se registraron múltiples réplicas al norte de la isla Roatán, a lo largo de la falla, y también en tierra firme (vea la lista de terremotos proporcionada en la base de datos); ellos se consideran vinculados a la reactivación de fallas menores locales (ejem. fallas Río Viejo, La Ceiba) y se cree son responsables del daño causado en La Ceiba y Olanchito (ver Tenorio *et al.*, 2009, en la base de datos referido con el código MG7). Recordamos a los lectores que en el pasado, la continuación continental del sistema de fallas de las Islas Swan, es decir la falla de Motagua, había causado el devastador terremoto de Guatemala del 4 de febrero de 1976, ya descrito en el capítulo 4.2.2.

Para el terremoto del 28 de mayo de 2009, se han recolectado 162 IDP a partir de reportes locales (COPECO, 2009; Tenorio *et al.*, 2009) y de la encuesta macrosísmica en línea del USGS (USGS, 2009a). El conjunto MDP (Fig. 4.55b) muestra algunas anomalías en la disminución de los efectos en función de la distancia epicentral. Shulman y Mooney (2009), sugieren algunas razones para explicarlas, como por ejemplo los daños a infraestructuras en algunas localidades a lo largo de la costa norte (intensidades arriba de VIII, alcanzadas en El Progreso y La Ceiba, a 73 km de distancia), en contraste con lo ocurrido en isla de Roatán ubicada a 30 km del epicentro (donde el daño fue significativamente menor, VI en la escala MM). Estas anomalías en intensidad se deben principalmente a:

- efectos locales de sitio, dentro del valle aluvial de Ulúa el suelo se compone principal-



a)



b)

Fig. 4.55 - The 28 May 2009 earthquake: a) detail of damage to a reinforced concrete building in San Pedro Sula; b) MDP set: the red star shows the location proposed by the ISC019 origin catalogue, the focal mechanism is the solution proposed by GCMT (M_w 7.3); the IDPs have been collected using different sources and macroseismic scales, for Honduras and El Salvador.

Fig. 4.55 - El sismo del 28 de mayo de 2009. a) Detalle de los daños sufridos por un edificio de hormigón armado en San Pedro Sula; b) conjunto MDP: la estrella roja muestra la ubicación propuesta por el catálogo de origen ISC019, el mecanismo focal es la solución propuesta por GCMT (M_w 7.3). Los IDP han sido recogidos usando diferente fuentes y escalas macrosísmicas, para Honduras y El Salvador.

located 30 km away from the epicentre (where the damage was significantly lower, VI on the MM scale). These anomalies in intensity are mainly due to:

- local site effects, within the Ulúa alluvial valley the soil is mainly composed of silty sand, while on the island of Roatán schist and gneiss rocks are prevalent;
- directivity of the source, with the rupture propagation in the SW direction, which focused the energy towards the city of El Progreso.

These effects are probably hindered in some “noisy” data, due to the DYFI reports and to the aftershock sequence too.

It is worth mentioning that after the earthquake of 28 May 2009, some aftershocks led to the activation of more local fault systems inside the continental region (Tenorio *et al.*, 2009); they caused additional damage to buildings and infrastructures already affected by the main event. Among these faults, the La Ceiba fault is located in the northern part of the country, it crosses the departments of Atlántida and Yoro. It is a normal fault, tentatively with a left-lateral component, bordering the coast of Honduras (Rogers and Mann, 2007). Southwards, the Río Viejo fault runs through the departments of Colón and Atlántida: it is interpreted as a left-lateral to normal fault in its western part, and transcurrent toward east (Styron *et al.*, 2020). For these two geological features there are no records of destructive earthquakes over the historic period, but they are considered to have the potential of generating earthquakes of moderate to slight magnitude, at less than 30 km depth.

The 2018 offshore Honduras earthquake

On 10 January 2018 at 8:51 p.m. local time (02:51 UTC) a M_w 7.5 earthquake occurred again, offshore Honduras. According to international agencies (NEIC, ISC), the

mente de arena limosa, mientras en la isla de Roatán predominan esquistos y gneis.

- directividad de la ruptura, propagación de la ruptura en dirección SW por lo que enfocó la energía hacia la ciudad de El Progreso.

Estos efectos probablemente se ven enmascarados en algunos datos “ruidosos”, debido a los reportes DYFI y también a la secuencia de réplicas.

Vale la pena mencionar que después del terremoto del 28 de mayo de 2009, algunas réplicas llevaron a la activación de más sistemas de fallas locales dentro de la región continental (Tenorio *et al.*, 2009); causaron daños adicionales a edificios e infraestructuras ya afectados por el evento principal. Entre estas fallas, la falla La Ceiba se ubica en la parte norte del país, atraviesa los departamentos de Atlántida y Yoro. Es una falla normal, tentativamente con un componente lateral izquierdo, bordeando la costa de Honduras (Rogers y Mann, 2007). Hacia el sur, la falla del Río Viejo atraviesa los departamentos de Colón y Atlántida: se interpreta como falla lateral izquierda normal en su parte occidental, y transcurrente hacia el este (Styron *et al.*, 2020). Para estas dos características geológicas no hay registros de terremotos destructivos durante el período histórico, pero se considera que tienen el potencial de generar terremotos de magnitud moderada a leve, a menos de 30 km de profundidad.

El sismo de Honduras costa afuera de 2018

El 10 de enero de 2018, a las 20:51 hora local (02:51 UTC) ocurrió de nuevo un terremoto M_w 7,5, fuera de la costa de Honduras. Según agencias internacionales (NEIC, ISC), es loca-

earthquake is located off the Atlantic coast of Honduras, 44 km east of Great Swan Island and about 300 km from the mainland coast: it was a shallow event (10-15 km depth) occurring along the Swan Island transform fault approximately 300 km eastwards of the 28 May 2009 earthquake, previously described. It was felt in much of the national territory and in some areas of Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Belize, and Mexico.

In Honduras, the effects were felt mostly in the department of Colón, where only slight damage (fissures/cracks) and no victims are reported. The quake produced some noise and rattles of windows in Tegucigalpa. Minor sea level fluctuations of about 20 cm, were also observed at George Town in Cayman Islands, United Kingdom (Tanioka et al., 2020).

The IDPs available for this event come solely from the DYFI online macroseismic survey [USGS (2018c), quoted as MG34 in the database]. For the purposes of this collection, we selected only the reports referring to 40 sites within the Honduran territory (Fig. 4.56).

It should be noted that DYFI intensities have to be considered *per-se*, and are only proxies of traditional MM/EMS data assigned with extensive surveys. The intensity VIII given for example to the locality of Cusuna, in the department of Colón, has been assigned only by means of a single observation, which is insufficient for the definition of an intensity degree: such a high intensity value is probably due to the severe damage/partial collapse of a single house, without considering its previous status; in support of this interpretation, we checked local newspapers that do not report news on this.

However, the intrinsic utility of such data is in support of the interpretation of historical chronicles that often quote destructive events along the Atlantic coast. This is the

lizado frente a la costa Atlántica de Honduras, 44 km al este de Islas de Swan a unos 300 km de distancia de la costa continental: es un evento superficial (profundidad de 10-15 km) ocurrido a lo largo de la falla transformante de las Islas Swan aproximadamente 300 km al este del terremoto del 28 de mayo de 2009, previamente descrito. Se sintió en gran parte del territorio nacional y en algunas áreas de Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Belice y México.

En Honduras, los efectos se sintieron principalmente en el Departamento de Colón, donde se reportaron daños leves (fisuras/grietas) y sin reporte de víctimas. El sismo produjo algo de ruido y traqueteo de ventanas en Tegucigalpa. También se observaron fluctuaciones menores del nivel del mar de unos 20 cm, en George Town en Islas Caimán, Reino Unido (Tanioka et al., 2020).

Los IDP disponibles para este evento provienen únicamente de la encuesta macrosísmica en línea del (USGS, 2018c, citado como MG34 en la base de datos). Para los propósitos de esta colección, seleccionamos únicamente los informes que se refieren a 40 sitios dentro del territorio de Honduras (Fig. 4.56).

Es necesario remarcar que las intensidades DYFI deben de ser consideradas *per se*, y solo son proxies de los datos tradicionales MM/EMS asignados con extensas encuestas. La intensidad VIII dada por ejemplo para la localidad de Cusuna, en el Departamento de Colón, ha sido asignada solo con una observación, que es en gran medida insuficiente para la definición de un grado de intensidad: un valor de intensidad tan alto probablemente se deba al daño/colapso parcial de una sola casa, sin considerar su estado previo; en apoyo a esta interpretación, verificamos periódicos locales, que no informan noticias al respecto.

Sin embargo, la utilidad intrínseca de tales datos es un apoyo a la interpretación de crónicas históricas, que a menudo citan eventos destructivos a lo largo de la costa Atlántica. Este

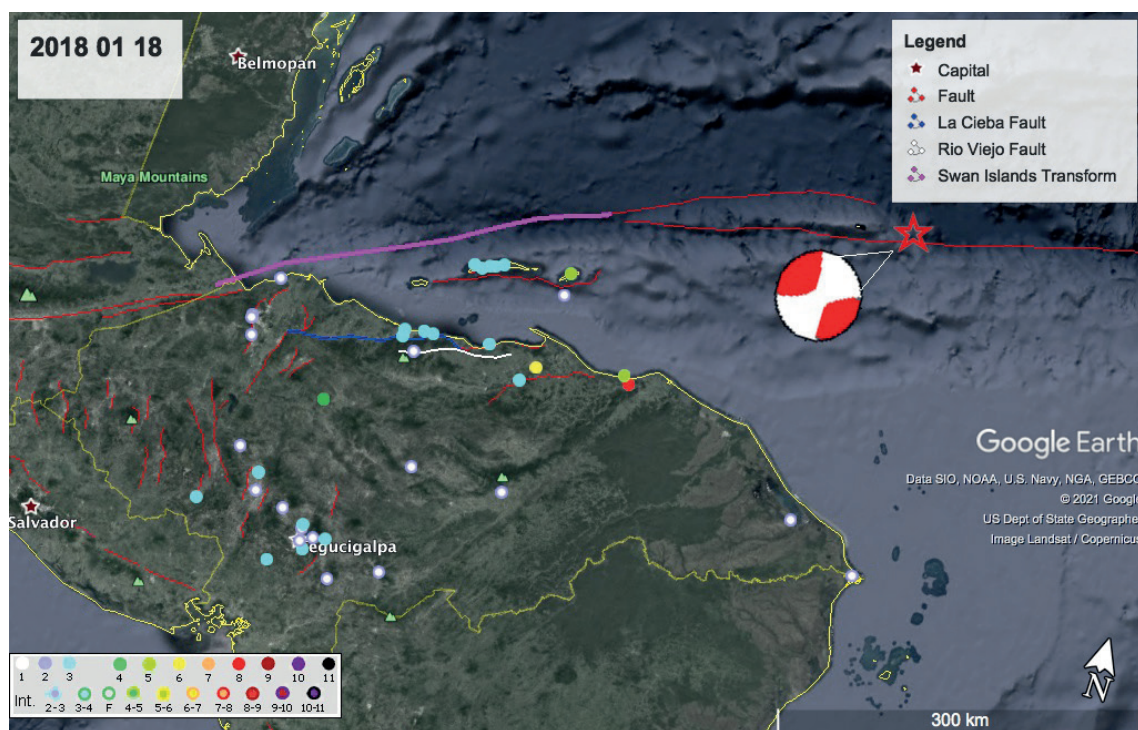


Fig. 4.56 - MDP set for the 10 January 2018 earthquake. The red star shows the location proposed by the international agency NEIC, focal mechanism is taken from GCMT.

Fig. 4.56 - Conjunto MDP para el terremoto del 10 de enero de 2018. La estrella roja muestra la ubicación propuesta por la agencia internacional NEIC, mecanismo focal se toma de GCMT.

case for example of the 1855-1856 earthquakes (two of the only five records referred to Honduras in the GHEA archive, <https://emidius.eu/GEH/map.php>) for which epicentral parameters (location, magnitude) will probably be derived from analogies with recent “twin” earthquakes.

The need for a more extensive search of local testimonies will be addressed in the next chapter too.

4.4.3. Special cases

Historical and instrumental seismic information for Honduras is scarce, with respect to the neighbouring countries involved in the RIESCA Project. In the chronicles, news about earthquakes cover the period 1539-1900 for events felt within the territory and that have caused considerable impact

es el caso por ejemplo para los terremotos de 1855-56 (dos en los únicos cinco registros referidos a Honduras en el archivo GHEA, <https://emidius.eu/GEH/map.php>), para los cuales los parametros epicentrales (ubicación, magnitud) probablemente se derivan por analogía con terremotos “gemelos” recientes.

La necesidad de una búsqueda más extensa de los testimonios locales se abordará en el próximo capítulo.

4.4.3. Casos especiales

La información sísmica histórica e instrumental para Honduras es escasa, con respecto a los países vecinos involucrados en el proyecto RIESCA. En las crónicas, noticias sobre terremotos cubren el periodo 1539-1900 para eventos sentidos dentro del territorio y que han causado un impacto considerable en algunos si-

Table 4.8 - Documental search for macroseismic data referring to the city of Omoa (Cortés department).

Date	Epicentral Area	MM	Description
1773-09-16	OMOA	VI	The 16 September 1773 event was probably linked to the seismic sequence that began in late May 1773. That sequence was characterised by main events localised in different places; the most important occurred on 11 and 12 June, 29 and 30 July (epicentre near the Motagua fault), 13 and 14 December (epicentre near Lake Amatitlan). The city of Santiago de los Caballeros (Antigua), after the major seismic events reported considerable damages (PEMO999). The same authors relate the 16 September 1773, Omoa earthquake, to the eastward migration of seismic activity along the Polochic-Motagua fault system, assessing an intensity of VI degree MM to Omoa.
June 1780 - December 1781	Guatemala	VI-VII	A strong earthquake is documented during a seismic period from June 1780 to December 1781. It caused some damage evaluated between VI and VII MM, to the Omoa city (PEMO999). It was thought that the event was generated by the Motagua fault in its marine extension of the Caribbean Sea (PEMO999).
1820-10-19	Honduras	VIII	The seismic event occurred in the Cortés department (Honduras), causing serious damage in the municipalities of Omoa and San Pedro Sula (ERN-CAPRA, 2009). PEMO999 propose the marine extension of the Motagua fault as seismogenic. They also report the town of San Pedro Sula (VIII MM), as another seriously damaged town.
1856-05-05		VI-VII	Felt in Omoa (Cruz and Zuniga, 1994). Violent shocks at Belize and Omoa: VI-VII MM (Sutch, 1981).
1856-08-04	Honduras - Belize Tsunami	VII-VIII	The seismic event of 4 August 1856 generated an extensive tsunami that hit about 300 km of the Honduran coast. In Omoa, the sea reached a height of 5 m, damaging much of the port (PEMO999). Almost complete ruin of Omoa, complete destination of port due to the tsunami... The sea was elevated 5 m at the base of the fort. The small village of San José was ruined (Such, 1981). On checking the sources PEMO999 assign new intensity values: Omoa VII-VIII, San José VIII MM. PEMO999 assign the event to the Motagua fault system, in the marine extension in the Caribbean Sea.

Table 4.9 - Documental search for macroseismic data referring to the city of Comayagua (Comayagua department). Earthquakes labelled with \$ are provided by a MDP set with more than 3 IDPs.

Fecha	Epicentral Area	MM	Description
1610-03-22	unknown	VI-VII	Some news about the damages undergone by Comayagua for this seismic event have been found in a contemporary manuscript to the event. There are still no references to the epicentral area as well as other affected localities.
\$1774-10-14	Comayagua	VII-VIII	The earthquake affects a fairly defined area of the Honduran territory. Comayagua (VII-VIII MM) and Las Piedras (VII MM) reported serious damage; the event was also felt in Ajuterique (VI MM) and Lejamani (VI MM), (PEMO999). Cruz and Zuniga (1994) and Sutch (1981) estimate the damage in Comayagua VI MM. PEMO999 associated the seismic event with the Comayagua graben.
1809-06-20	Comayagua	VII-VIII	Comayagua reported damage to the most important buildings in the city, to the cathedral and other religious buildings. Cruz and Zuniga (1994) estimate the damage in Comayagua VI MM. PEMO999 re-evaluates the damage estimate in Comayagua, attributing a higher intensity of VII-VIII MM. The seismic event was associated with the Comayagua graben (Cruz and Zuniga 1994; PEMO999).
\$1859-12-08	Guatemala- El Salvador	II-III	Felt in Comayagua (UNHA-IHCTI, 2012). PEMO999 assign an intensity of II-III MM.

Tabla 4.8 - Búsqueda documental de datos macrosísmicos referidos a la ciudad de Omoa (Departamento Cortés).

Fecha	Area Epicentral	MM	Descripción
1773-09-16	OMOA	VI	El 16 de septiembre de 1773 está relacionado probablemente con la secuencia sísmica que comenzó a finales de mayo de 1773. Esa secuencia fue caracterizada por eventos principales localizados en diferentes lugares; el más importante ocurrió el 11 y el 12 de junio, 29 y 30 de julio (epicentro cerca de la falla de Motagua), 13 y 14 de diciembre (epicentro cerca del Lago de Amatitlán), después de los mayores eventos sísmicos se reportaron daños considerables (PEMO999). Los mismo autores relacionan el terremoto de Omoa, del 16 de septiembre de 1773, a la migración hacia el Oeste de la actividad sísmica a lo largo del sistema de fallas Polochic-Motagua, evaluando a Omoa una intensidad de VI grados MM.
Junio 1780 - Dic 1781	Guatemala	VI-VII	Un fuerte terremoto fue documentado durante el período sísmico de junio de 1780 a diciembre de 1781. Causó algún daño evaluado entre VI y VII MM, para la ciudad de Omoa (PEMO999). Se supone que el evento fue generado por la falla de Motagua en su extensión marina del Mar Caribe (PEMO999).
1820-10-19	Honduras	VIII	El evento sísmico ocurrido en el Departamento de Cortés (Honduras), causó serios daños en las municipalidades de Omoa y San Pedro Sula (ERN-CAPRA, 2009). PEMO999 propone la extensión marina de la falla de Motagua como sismogénica. También informa la ciudad de San Pedro Sula (VIII MM), como otra ciudad con serios daños.
1856-05-05		VI-VII	Sentido en Omoa (Cruz y Zuniga, 1994). Choque violento en Belice y Omoa: VI-VII MM (Sutch, 1981).
1856-08-04	Honduras - Belice Tsunami	VII-VIII	El evento sísmico del 4 de agosto de 1856, generó un extenso Tsunami que afectó a unos 300 km de la costa de Honduras. En Omoa, el mar alcanzó una altura de 5 m, dañando gran parte del puerto. (PEMO999). Ruina casi completa de Omoa, completamente destruido el puerto por el Tsunami... El mar se elevó 5 metros en la base de la fortaleza El pequeño pueblo de San José estaba en ruinas (Such 1981). Comprobadas las fuentes, PEMO999 asigna nuevos valores de intensidad: Omoa VII-VIII, San José VIII MM. PEMO999 atribuye el evento al sistema de falla Motagua, en la extensión marina en el Mar Caribe.

Tabla 4.9 - Búsqueda documental de datos macrosísmicos referidos a la ciudad de Comayagua (Departamento Comayagua). Los terremotos etiquetados con \$ son proporcionados por un conjunto de MDP con más de 3 IDP.

Fecha	Area Epicentral	MM	Descripción
1610-03-22	desconocida	VI-VII	Algunas noticias sobre los daños sufridos por Comayagua para este evento sísmico se han encontrado en un manuscrito contemporáneo al evento. Todavía no hay referencias para el área epicentral así como otras localidades afectadas.
\$1774-10-14	Comayagua	VII-VIII	El terremoto afecta una área bastante definida del territorio de Honduras. Comayagua y las Piedras (VI MM) informaron daños graves. El evento también se sintió en Ajuterique (VI MM) y Lejamani (VI MM). Cruz y Zuniga (1994) y Sutch (1981) estiman el daño en Comayagua VI MM. PEMO999 asocia el evento sísmico con el graben de Comayagua.
1809-06-20	Comayagua	VII-VIII	Comayagua informa daños para el más importante edificio en la ciudad, para la catedral y otros edificios religiosos. Cruz y Zuniga (1994) estiman el daño en Comayagua VI MM. El evento sísmico se asoció con el graben de Comayagua (Cruz y Zuniga 1994; PEMO999)
\$1859-12-08	Guatemala-El Salvador	II-III	Sentido en Comayagua UNHA-IHCTI (2012) PEMO999

Table 4.10 - Documental search for macroseismic data referring to the city of Tegucigalpa (Francisco Morazan department). Earthquakes labelled with \$ are provided by a MDP set with more than 3 IDPs.

Date	Epicentral Area	MM	Description
\$1774-10-14	Comayagua	VI	Earthquakes occurred in Tegucigalpa and Comayagua, Honduras, cities which until then were not known for earthquakes (Sutch, 1981).
1851-11-14	Honduras	VII-VIII	PEMO999 citing Montessus de Ballorè (1888) refers to the occurrence of an earthquake that destroyed some houses in Tegucigalpa (VII-VIII MM). Cruz and Zuniga (1994) describe more damage "many houses were destroyed" in Tegucigalpa and assign an intensity value equal to the VIII degree MM.

Table 4.11 - Documental search for macroseismic data referring to the city of Trujillo (Colon department).

Date	Epicentral Area	MM	Description
1764-07	Trujillo (Honduras)	VIII	Much uncertainty about this earthquake in PEMO999. Sutch (1981), according to Montessus de Ballorè (1988), reports that the serious damages to the port of Trujillo (108 houses destroyed) is more likely attributed to a seismic activity and not to a volcanic eruption.
1851-08-8	Honduras	VI	Some earthquakes on August, interpreted as foreshocks of the 14 November 1851 main event, were felt in Trujillo (PEMO999). Sutch (1981) assesses the intensity of V-VI MM. Cruz and Zuniga (1994) assign intensity VI to Trujillo.
1851-08-18	Honduras	VI	Felt in Trujillo. Sutch (1981) assesses the intensity of V-VI MM. Cruz and Zuniga (1994) assign intensity VI MM.
1853-02-09	Guatemala	V	The earthquake caused extensive damage in western Guatemala. It was felt, without damage in El Salvador (V MM) and Trujillo (V MM) (PEMO999). Cruz and Zuniga (1994) insert the locality of Trujillo among the places hit by the earthquake in the Honduras territory and assign an intensity of VIII. Sutch (1981) assesses the intensity of VIII-IX. White and Cifuentes (1988) suggest a subduction event.
1853-08-26		VI	The earthquake was felt in Trujillo (VI MM) (Cruz and Zuniga, 1994). Sutch (1981) assesses the intensity of VI-VII.
1854-04-14	El Salvador	IV?	El Salvador, seismic swarm lasting several months. The earthquake of 14 April was felt in Izabal, Omoa, and Trujillo (PEMO999).
1855-09-25	Trujillo	VI I	PEMO999 believes that the event was generated by the Swan Island fault, with the epicentre located right in front of the Trujillo coast. The earthquake simultaneously generated a tsunami, observed by boats near Trujillo (PEMO999, Montessus de Ballorè, 1888). PEMO999 assess an intensity of VII MM Cruz and Zuniga (1994) assign an intensity of VIII. The village (Trujillo) was heavily damaged: VIII MM (Sutch, 1981).
1882-08-19	Trujillo, Honduras	VII	The earthquake was felt in Honduras and Nicaragua (PEMO999). Cruz and Zuniga (1994) assign an intensity of VII MM in Trujillo.

Tabla 4.10 - Búsqueda documental de datos macrosísmicos referidos a la ciudad de Tegucigalpa (Departamento Francisco Morazán). Los terremotos etiquetados con \$ son proporcionados por un conjunto de MDP con más de 3 IDP.

Fecha	Area Epicentral	MM	Descripción
\$1774-10-14	Comayagua	VI	Terremotos ocurridos en Tegucigalpa y Comayagua, Honduras, ciudades que hasta ahora, no tenían fama de terremotos. Sutch (1981)
1851-11-14	Honduras	VII-VIII	PEMO999 citando a Montessus de Ballore (1888) se refiere a la ocurrencia de un terremoto que destruyó algunas casas en Tegucigalpa (VII-VIII MM). Cruz y Zuniga (1994) describe más daños "muchas casas fueron destruidas" en Tegucigalpa y asigna un valor de intensidad igual a VIII grados MM.

Tabla 4.11 - Búsqueda documental de datos macrosísmicos referidos a la ciudad de Trujillo (Departamento Colón).

Fecha	Area Epicentral	MM	Descripción
1764-07	Trujillo (Honduras)	VIII	Mucha incertidumbre acerca de este terremoto en PEMO999 Sutch (1981), conforme a Montessus de Ballore (1888), informa que los serios daños sufridos en el puerto de Trujillo (ciento ocho casas destruidas) son más atribuidos a actividad sísmica y no a erupciones volcánicas. Cruz y Zuniga (1994)
1851-08-8	Honduras	VI	En Trujillo (PEMO999) se sintieron algunos terremotos del 8 y 18 de agosto, interpretados como presagios del evento principal del 14 de noviembre de 1851. Sutch (1981) evalúa la intensidad de V-VI MM. Cruz y Zuniga (1994) asignan intensidad VI a Trujillo.
1851-08-18	Honduras	VI	Sentido en Trujillo. Sutch (1981) evalúa la intensidad de V-VI MM.
1853-02-09	Guatemala	V	El terremoto causó un extenso daño en el Occidente de Guatemala. Se sintió, sin daños en El Salvador y Trujillo (PEMO999). Cruz y Zuniga (1994) inserta la localidad de Trujillo entre los lugares afectados por el terremoto en el territorio de Honduras y asigna una intensidad de VIII. Sutch (1981) evalúa la intensidad de VIII-IX. White y Cifuentes (1988) sugieren un evento de subducción.
1853-08-26		VI	El terremoto fue sentido en Trujillo (Cruz y Zuniga 1994). Sutch (1981) evalúa la intensidad de VI-VII.
1854-04-14	El Salvador	IV?	El Salvador, el enjambre sísmico duró varios meses. El terremoto del 14 de Abril fue sentido en Izabal, Omoa y Trujillo, PEMO999
1855-09-25	Trujillo	VI I	PEMO999 cree que el evento fue generado por la falla de las Islas del Cisne (Swan), con el epicentro localizado justo enfrente de la costa de Trujillo. El terremoto simultáneamente generó un tsunami, observado por barcos cerca de Trujillo (PEMO999, Montessus de Ballore, 1888). Cruz y Zuniga (1994) asigna una intensidad de VIII. El poblado (Trujillo) fue fuertemente dañado: VIII MM (Sutch, 1981).
1882-08-19	Trujillo, Honduras	VII	El terremoto fue sentido en Honduras y Nicaragua PEMO999. Cruz y Zuniga (1994) asigna una intensidad de VII MM en Trujillo.

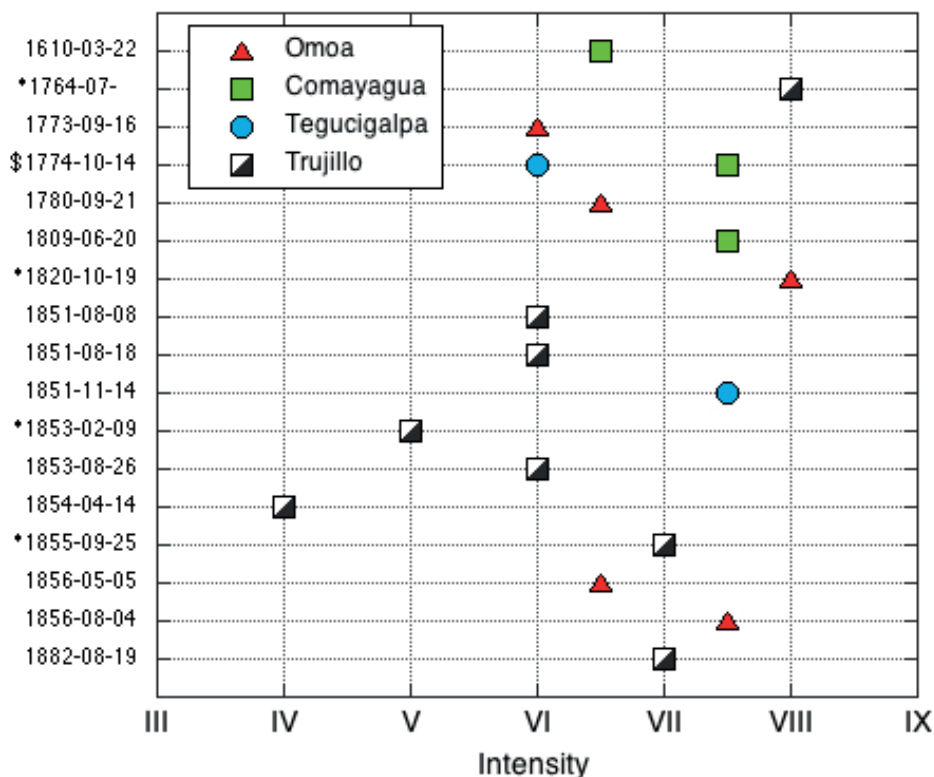


Fig. 4.57 - Additional macroseismic data for some selected sites in Honduras; these IDPs are partially entered in the database (only the earthquakes marked with * or \$), and then in the seismic histories, for the lack of the reference earthquake in the list, or because they need further investigation.

Fig. 4.57 - Datos macrosismicos adicionales para algunos sitios en Honduras; estos IDP están en parte ingresados en la base de datos (los terremotos marcados * y \$), y luego en las historias sísmicas, por la falta del terremoto de referencia en la lista, o porque ellos necesitan más investigación.

on some sites of the country. As previously mentioned for Guatemala, special cases (chapter 4.2.3.2) of seismic site histories are a powerful tool for improving the earthquake catalogues, provided that there are sufficient documental sources; unfortunately for Honduras, this information is rarely capable of depicting the overall picture of an earthquake, i.e. let us have a macroseismic data set. Most of the reported earthquakes have origins in seismotectonic provinces located outside of the Honduras territories. The Motagua-Swan Island system, for example, is responsible for damage mainly in the northern and north-western parts of the country. Local seismicity was observed in

tios del país. Como se mencionó previamente, para casos especiales de Guatemala (capítulo 4.2.3.2) las historias sísmicas de sitios son una herramienta poderosa para mejorar los catálogos de terremotos, siempre que existan suficientes fuentes documentales; desafortunadamente para Honduras, esta información rara vez puede representar la imagen de un terremoto, es decir construir un conjunto de datos macrosísmicos. La mayoría de los reportes de terremotos tienen origen en las provincias sismotectónicas localizadas fuera del territorio de Honduras. El sistema de fallas Motagua - Islas de Swan, por ejemplo, es responsable de daños principalmente en la parte norte y noroeste del país. Sismicidad local fue observada en el área central de Hon-

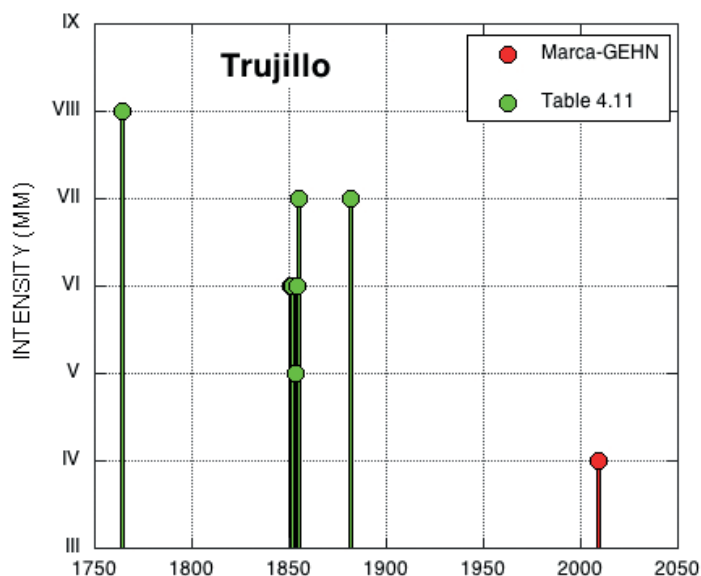


Fig. 4.58 - A tentative seismic history in Trujillo, obtained by integrating the IDPs previously uploaded to the MARCA-GEHN database, with other site information derived from Table 4.11. Most of the earthquakes represented by the green symbols are not listed in the earthquake catalogue and the MDP set is too poorly constrained and needs further studies.

Fig. 4.58 - Una tentativa de historia sísmica en Trujillo, obtenida por integración de IDP cargados previamente a la base de datos MARCA-GEHN, con otra información del sitio derivada de la Tab. 4.11. La mayoría de los terremotos representados por los símbolos verdes no están incluidos en el catálogo de terremotos y el conjunto de MDP está demasiado limitado y necesita más estudios.

the central area of Honduras, with effects that are localised more or less always in the same municipalities.

We have, therefore, started a systematic collection of information about earthquakes for some sites in Honduras, with the aim of involving different expertise in the search, especially historians.

Four names are recurrent in the sources, namely Omoa, Comayagua, Tegucigalpa, and Trujillo. The graph and tables of this chapter represent the data collected to date; they have not been reported/inserted in the database yet, because the reference earthquake is missing in the original list, or because the intensity assessment requires additional controls. The historical documentation of this seismic activity refers mainly to the 18th and 19th centuries, thus filling the gap of the catalogue. Short descriptions of the observations and related references are given in four tables (Tables 4.8 to 4.11), a graphic synoptic representation is plotted in Fig. 4.57. In Fig. 4.58 an example of the “augmented” seismic history in Trujillo is given too.

duras, con efectos que son localizados más o menos siempre en las mismas municipalidades.

Por lo tanto, hemos comenzado una recopilación sistemática de información sobre terremotos para algunos sitios en Honduras, con el objetivo de involucrar a diferentes expertos en la búsqueda, especialmente historiadores.

Cuatro nombres son frecuentes, es decir Omoa, Comayagua, Tegucigalpa y Trujillo. La figura y tablas de este capítulo representan los datos recopilados hasta ahora; aún no han sido reportados/ingresados en la base de datos, por que el terremoto de referencia no está en la lista original, o por que la intensidad asignada requiere controles adicionales. La documentación histórica de esta actividad sísmica se refiere principalmente a los siglos XVIII y XIX, llenando así el vacío del catálogo. Descripciones breves de las observaciones y referencias relacionadas son dadas en cuatro tablas (tablas 4.8-4.11); una representación gráfica sinóptica es trazada en la Fig. 4.57. En la Fig. 4.58 también es dado un ejemplo argumentado de la historia sísmica en Trujillo.

5. First results and discussion

The main result obtained by the SWG in the RIESCA Project is the release of the MARCA-GEHN online platform (available limited to Beta version since May 2019, at the manuscript submission V.1.6, September 2020). The database is publicly available on the Internet, without requiring user registration. For security and flexibility reasons, the website is mirrored at marca-riesca.inogs.it and marca-riesca.unah.hn, and accessible also via the RIESCA website (<https://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>).

The methodology used and the contents have been widely described in the previous chapters. Here we summarise the work done with simple statistical data; then we describe two major outcomes that can be directly obtained from the database. Problems and limitations will be discussed too.

MARCA-GEHN contains an earthquake catalogue of 1082 parametric records, selected with different rules (see chapter 3) from the international public sources. 63 events have been provided by MDP sets, i.e. by a list of IDPs representing the observations gathered, checked and geo-referenced within this study. The total amount of IDPs is 2030, subdivided following the national borders as given in Fig. 5.1a. The IDPs are mainly given in MM intensity scale, but other scales have been used too, depending on the data availability; a pie chart (Fig. 5.1b) shows the percentage of points according to the intensity scales.

The studied earthquakes have not been selected *a priori*, following rules based on time interval, or magnitude thresholds: they have been gathered to accomplish the different needs and interests of the participating Central American countries, and researchers. Original features, with respect to similar macroseismic databases (see e.g.

5. Resultados

El principal resultado obtenido por el Grupo de Trabajo de Sismología en el Proyecto RIESCA es el lanzamiento de la plataforma en línea MARCA-GEHN (disponible de forma restringida en versión Beta desde mayo de 2019 y en la V.1.6, con la presentación del manuscrito en septiembre de 2020). La base de datos está a disposición del público en Internet, sin registro de usuarios. Por razones de seguridad y flexibilidad, el sitio web está registrado en marca-riesca.inogs.it y marca-riesca.unah.hn, y es accesible también a través del sitio web de RIESCA (<https://proyectoriesca.agronomia.ues.edu.sv/>).

La metodología utilizada y los contenidos se han descrito ampliamente en los capítulos anteriores. Aquí resumimos el trabajo realizado con datos estadísticos simples; luego describimos dos resultados principales que pueden obtenerse directamente de la base de datos. También se discutirán los problemas y limitaciones.

MARCA-GEHN contiene un catálogo de terremotos de 1082 registros paramétricos, seleccionados con diferentes reglas (ver capítulo 3) a partir de las fuentes públicas internacionales. 63 eventos han sido proporcionados por conjuntos de datos macrosísmicos, es decir, por una lista de IDP que representan las observaciones recogidas, comprobadas y georeferenciadas dentro de este estudio. La cantidad total de IDP es de 2030, subdividida siguiendo las fronteras nacionales como se muestra en la Fig. 5.1a. Los IDP se expresan principalmente en la escala de intensidad de Mercalli modificada (MM), pero también se han utilizado otras escalas, en función de la disponibilidad de datos. Un gráfico circular (Fig. 5.1b) Muestra el porcentaje de puntos distribuidos según las escalas de intensidad.

Los terremotos estudiados no han sido seleccionados *a priori*, siguiendo reglas basadas en el intervalo de tiempo, o en los umbrales de magnitud; han sido recopilados con las diferentes necesidades e intereses de los países parti-

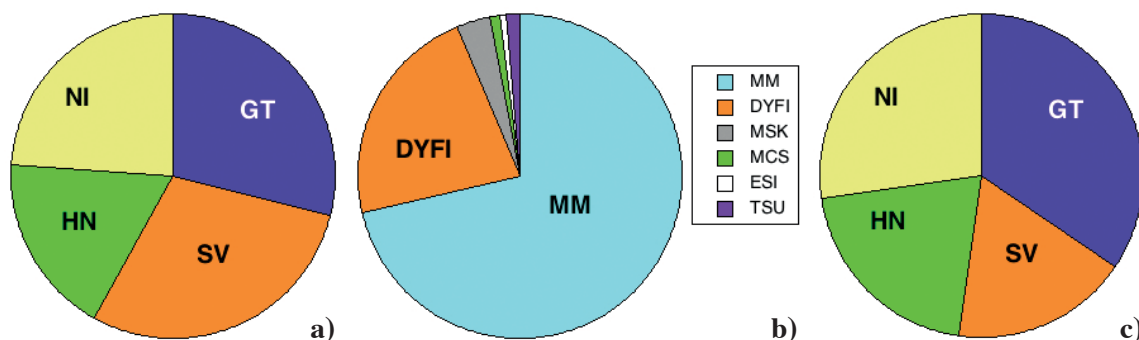


Fig. 5.1 - Content of MARCA-GEHN (Version 1.6, September 2020): a) pie chart of the 2030 IDs according to their epicentral location (reference to national borders: GT=Guatemala; SV=El Salvador; HN=Honduras; NI=Nicaragua; one IDP refers to Costa Rica, not visible in the plot); b) pie chart of the IDs according to the intensity scale used (MM=Modified Mercalli; DYFI=DidYouFeelIt proxy value; MSK=Medvedev-Sponheuer-Karnik; MCS=Mercalli-Cancani-Sieberg; ESI=Environmental Intensity Scale; TSU=Tsunami Intensity, references and details of intensity scales are given in chap. 2); c) pie chart of places by SITEID identifier (country codes as in frame a).

Fig. 5.1 - Contenido de MARCA-GEHN (Versión 1.6, Sept 2020): a) gráfico circular de los IDPs de 2030 según su ubicación (referencia a las fronteras nacionales: GT=Guatemala; SV=El Salvador; HN=Honduras; NI=Nicaragua; un IDP está referido a Costa Rica, no visible en el gráfico); b) gráfico circular de los IDP según la escala de intensidad utilizada (MM=Mercalli modificado; DYFI=Valor sustitutivo de DidYouFeelIt; MSK=Medvedev-Sponheuer-Karnik; MCS=Mercalli-Cancani-Sieberg; ESI=Escala de intensidad ambiental; TSU=Intensidad del tsunami, las referencias y los detalles de las escalas de intensidad se dan en el capítulo 2); c) gráfico circular de lugares por el identificador SITEID (códigos de países como en el marco a).

<https://emidius.eu/MIDOP/examples/>), are the efforts made to compile MDPs at the international scale (no borders), and the collection of intensity values assigned by different scale metrics (e.g. MM, MSK, DYFI) thus including geological and tsunami data. These enhancements represent limits too, for data users that are not sufficiently aware of the differences between macroseismic scales.

The MDPs vary from sets with only a few points (6 earthquakes with less than 4 IDPs each) to well documented events (7 earthquakes with more than 100 IDPs). The minimum threshold selected for magnitude is 5.0, the maximum value is 8.1 (assigned to the 19 December 1862 earthquake, but reduced to 7.7 in our preferred solution); some smaller events (M 3.5-4.6) have been entered too, with their MDP sets; many earthquakes then have null value of magnitude, as it was not given in the origin reference catalogue. Some parametric records

cipantes de CA, y de los investigadores. Una característica particular a destacar, respecto a otras bases de datos macrosísmicas similares (ver <https://emidius.eu/MIDOP/examples/>), es el esfuerzo realizado para compilar MDP a escala internacional (sin fronteras), y la recopilación de valores de intensidad asignados por diferentes métricas de escala (por ejemplo, MM, MSK, DYFI), incluyendo así datos geológicos y de tsunamis. Estas mejoras representan también limitantes-para los usuarios de los datos que no son suficientemente conscientes de las diferencias entre las escalas macrosísmicas.

La composición de los MDP varía desde unos pocos conjuntos de puntos (6 terremotos con menos de 4 IDP cada uno) hasta eventos bien documentados (7 terremotos con más de 100 IDPs). La magnitud mínima seleccionada va desde 5,0 hasta 8,1 (asignada al terremoto del 19 de diciembre de 1862, pero reducida a 7,7 en nuestra solución preferida) también se han introducido algunas eventos más pequeños (M 3.5-4.6), con sus conjuntos de datos; muchos te-

of studied events have been modified in terms of origin time (date, time) epicentral area name, or preferred coordinates, with respect to the catalogue they derive from. In addition, 20 events have been provided by a number of fatalities, even if this datum is often only indicative.

Concerning the functionalities, the queries on MARCA-GEHN are similar to the ones available for the other databases compiled by the MIDOP tool (Locati and Cassera, 2010); it can be interrogated by earthquake and by place, and selection and download tools are available for users. Maps and graphs in kml and png format can, therefore, be exported for further use.

Using the query by earthquake, epicentres can be selected by using the time slicer and drawing tools, and exported in kml format for further use. Similarly, the maps of each individual MDP set can be zoomed, edited with simple additional symbols, downloaded in kml format, or queried concerning the single intensity data point.

Concerning the query by place, 1084 localities have been provided by a unique SITEID identifier: they are subdivided by countries as shown in Fig. 5.1c; we acknowledge that some problems are still not solved, regarding the geographic coordinates and toponyms. Most of the localities (66%) have one single observation, and only 47 sites are documented by more than 5 earthquakes. The most “populated” seismic site history is San Salvador, with 20 site intensity data points. Note that for some earthquakes many intensity points are given within the capital cities, as the datum is sometimes assigned to quarters (barrios) or to single buildings: this is another potential source of misunderstandings that will be commented later on. Site histories are available in graphic format, and by link to the web page. Note that a list of neighbouring

rremotos tienen un valor nulo de magnitud, ya que no se dio en el catálogo de origen. . Algunos registros paramétricos de los eventos estudiados se han modificado en términos de tiempo origen (fecha, hora), nombre del área epicentral, o coordenadas. Además, 20 eventos han sido descritos por una serie de fatalidades, aunque este dato es a menudo sólo orientativo.

En cuanto a las funcionalidades, las consultas en MARCA-GEHN son similares a las disponibles para la otra base de datos compilada por la herramienta MIDOP (Locati y Cassera, 2010); puede ser consultada por terremoto y por lugar, y las herramientas de selección y descarga están disponibles para los usuarios. Por lo tanto, se pueden exportar mapas y gráficos en formato kml y png, para usos posteriores. Mediante la opción de consulta por terremoto, los epicentros pueden ser seleccionados usando una ventana de tiempo y empleando las herramientas de dibujo, y después pueden ser exportados en formato kml para usos adicionales. Similarmente los mapas de cada conjunto MDP individual pueden ser ampliados, editados con simples símbolos adicionales, descargados en formato kml, o bien se puede hacer una consulta sobre un dato puntual de intensidad.

En cuanto a la búsqueda de lugar, 1084 localidades han sido proporcionadas por un identificador único de SITEID y se distribuyen en los países 4 como se muestra en la Fig. 5.1c, si bien reconocemos que algunos problemas aún no están resueltos, en cuanto a la identificación de las coordenadas geográficas y topónimos. La mayoría de las localidades (66%) tienen una sola observación, y sólo 47 sitios están documentados por más de 5 terremotos. El sitio sísmico más “poblado” de la historia en la región es San Salvador, con 20 datos de intensidad de sitio. Nótese que para algunos terremotos se dan muchos datos puntuales de intensidad dentro de las ciudades capitales, de forma que cada dato se asigna a un barrio o edificio individual. Esta puede ser una fuente potencial de interpretación

sites (within 15 km distance) is available too, for additional search and integration of information.

5.1. Site seismic histories

The seismic history at a site is becoming an interesting means to represent and communicate the importance of earthquakes to specialists but to the wider public too. As previously said, we stored in the V.1.6 online database about 2000 IDPs referring to 1084 localities, and about 1/3 of them have more than one observation.

In a site approach to seismic hazard (e.g. Albarello and Mucciarelli, 2002), the probability that during a future time span of length Δt the site under study will be shaken by at least one earthquake with local effects greater than an intensity threshold I_s is obtained in three steps: 1) by building the local history of seismic effects (site seismic history), considering the uncertainty that affects the available intensity data, 2) by evaluating its overall reliability (e.g. completeness, representativeness), and 3) by applying some statistics for computing the seismic hazard at the site. The data stored in MARCA-GEHN up to now are the first bulk for such data-driven investigations, even if by now they are not sufficient for a reliable application to Central America localities.

Here the seismic histories referring to the capitals of the four countries involved in the RIESCA project will be shown and briefly commented on. We acknowledge the problem that a huge metropolitan area is not suitable for a unique value of macroseismic intensity to be assigned to the whole city. In the present release of the database we avoided introducing fictitious data, if the intensity

errónea o malentendido, que se comentará más adelante. Las historias de sitio están disponibles en formato gráfico y por enlace a la página web. Téngase en cuenta que también está disponible una lista de sitios vecinos (dentro de una distancia de 15 km), para una búsqueda adicional e integración de información.

5.1. Historias sísmicas de los sitios

La historia sísmica de un sitio se está convirtiendo en un medio interesante para representar y comunicar la importancia de los terremotos a los especialistas, pero también al público en general. Como se dijo anteriormente, almacenamos en la base de datos en línea V.1.6 cerca de 2000 IDP referidos a 1084 localidades, y alrededor de un tercio de ellos tienen más de una observación.

En un enfoque de la amenaza sísmica por sitios (por ejemplo, Albarello y Mucciarelli, 2002), la probabilidad de que durante un futuro período de tiempo Δt el sitio en estudio sea sacudido por al menos un terremoto con efectos locales superiores a un umbral de intensidad I_s se obtiene en tres pasos: 1) construyendo la historia local de los efectos sísmicos (historia sísmica del sitio), considerando la incertidumbre que afecta a los datos de intensidad disponibles, 2) evaluando su fiabilidad general (por ejemplo, la integridad, la representatividad), y 3) jugando con algunas estadísticas para calcular la amenaza sísmica en el sitio. Los datos almacenados en MARCA-GEHN hasta ahora son la primera pieza de estas investigaciones basadas en datos, aunque por ahora no son suficientes para una aplicación fiable a las localidades de América Central.

Aquí se mostrarán y comentarán brevemente las historias sísmicas referidas a las capitales de los cuatro países que participan en el proyecto RIESCA. Reconocemos el problema de que una gran área metropolitana no es adecuada para asignar un valor único de intensidad macrosísmica a toda la ciudad. En la presente

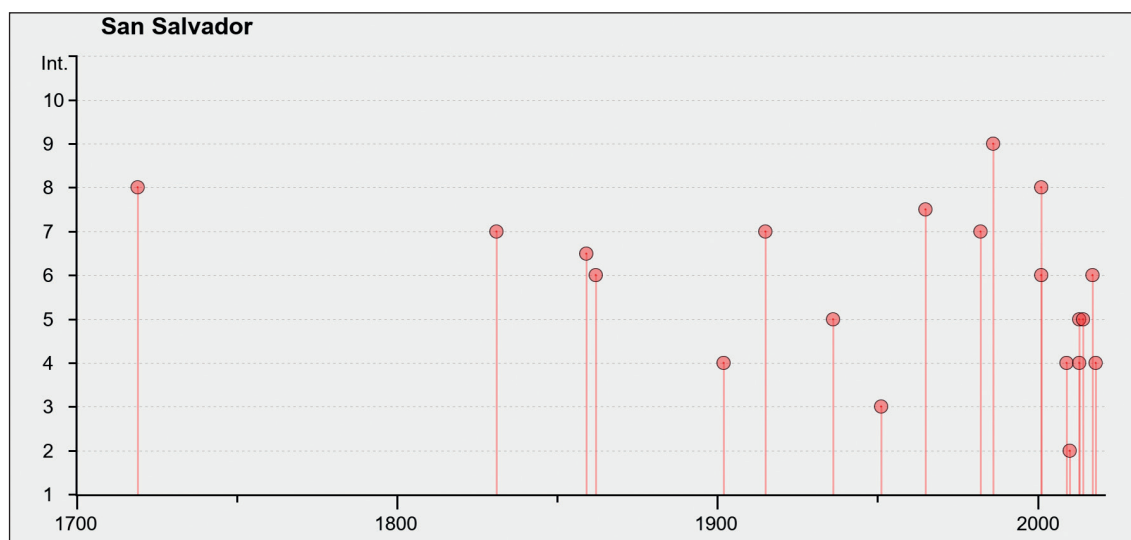


Fig. 5.2 - Site seismic history for San Salvador (SV) available at http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3583361.

Fig. 5.2 - Historia sísmica del sitio de San Salvador (SV) disponible en http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3583361.

value of the original source was given to a specific sector of the capital city: this can result in the lack of data in the site seismic history, as is commented on in the next cases. We will work for a suitable solution in the software package for the next releases.

With its 20 observations (Fig. 5.2), San Salvador is the most represented site seismic history in the actual database (V.1.6). The data collected, still considerably incomplete, covers the beginning of the Hispanic invasion (1719, San Vicente earthquake) until the end of the catalogue (a moderate offshore earthquake in 2018). The highest observed intensity is assigned to the 1986 San Salvador earthquake (IX), followed (VIII) by the January 2001 earthquake and the 1719 one. Note that effects of damage ($\geq VI$) are represented 11 times. If we accept some kind of completeness above first damage condition (intensity VI) in the earthquake records since 1870-1880, the mean frequency of damaging earthquakes in San Salvador is about 1/15 years. We ac-

publicación de la base de datos evitamos introducir datos ficticios, si el valor de intensidad de la fuente original fue dado a un sector específico de la ciudad capital: esto puede resultar en la “falta” de datos en el historial sísmico del sitio, como se comentará en los próximos casos. Trabajaremos para encontrar una solución adecuada en el paquete de software para las próximas versiones.

Con sus 20 observaciones (Fig. 5.2), San Salvador es el sitio de historia sísmica más representado en la base de datos actual (V.1.6). Los datos recopilados, todavía muy incompletos, abarcan desde el comienzo de la invasión hispana (1719, el terremoto de San Vicente) hasta el final del catálogo (un terremoto moderado en la costa en 2018). La mayor intensidad observada se asigna al terremoto de San Salvador de 1986 (IX), seguido por el de enero de 2001 y el de 1719 (VIII en ambos casos). Nótese que los efectos de los daños correspondientes a $I_s \geq VI$ están representados 11 veces. Si aceptamos algún tipo de completitud en los registros de terremotos desde 1870-1880, la frecuencia media

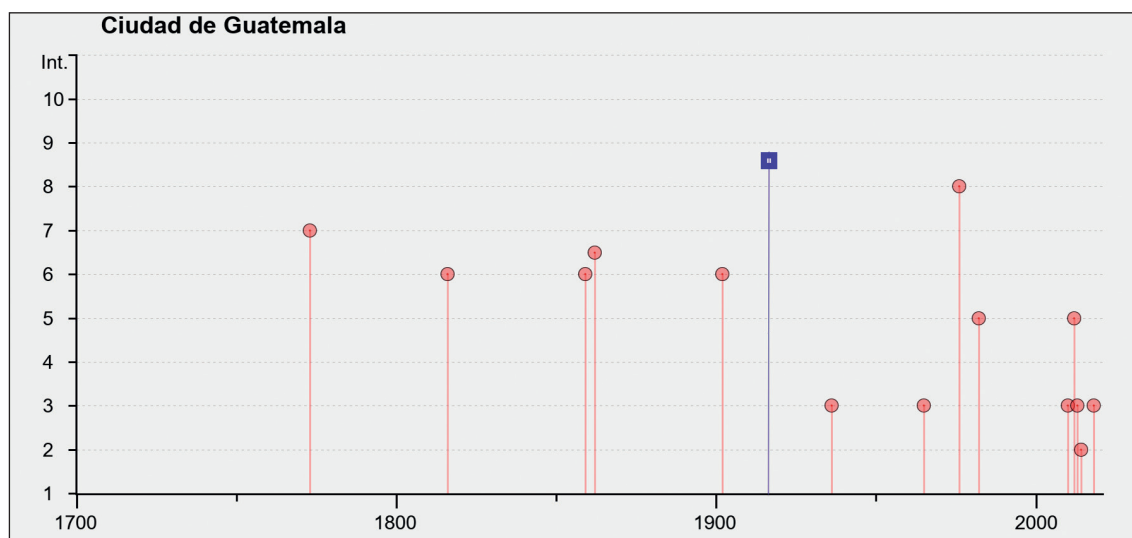


Fig. 5.3 - Site seismic history for Guatemala City (GT) available at http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=359813. A square symbol has been added to represent the 1917 earthquake.

Fig. 5.3 - Historia sísmica del sitio para la Ciudad de Guatemala (GT) disponible en http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=359813. Se ha agregado un símbolo cuadrado para representar el terremoto de 1917.

knowledge that the intensities obtained by the DYFI survey should be considered with care, as damaging conditions are often supported by few questionnaire compilations.

With regard to Guatemala, it is known that the seismic history of the country includes many destructive earthquakes, and its capital has been moved at least three times from the original position because of earthquake damage. Currently, Guatemala City has an area of 228 km², with a population of approximately three million people, it is the most populous city in Central America. It is, therefore, very difficult to consider it as a single locality, as has technically been done by the MIDOP engine. In this release, the site seismic history for Guatemala City is given by 14 earthquakes, spanning from the 1773 Santa Maria de Santiago earthquake, to the moderate offshore El Salvador event of 3 January 2018. Note that the capital was moved from Antigua Guatemala to the actual location in 1776, after the 1773 earthquake, thus explaining why there are no

de los terremotos dañinos en San Salvador es de aproximadamente 1/15 años. Reconocemos que las intensidades obtenidas por la encuesta DYFI deben ser consideradas por separado.

En cuanto a Guatemala, se sabe que la historia sísmica del país incluye muchos terremotos destructivos, y su capital ha sido desplazada de su posición original al menos tres veces debido a los daños causados por los terremotos. Actualmente la Ciudad de Guatemala abarca 228 km², con una población de aproximadamente tres millones de personas, siendo la ciudad más poblada de América Central. Por lo tanto, es muy difícil considerarla como una sola localidad, como lo hace técnicamente el sistema MIDOP. La historia sísmica de la ciudad de Guatemala está dada por 14 terremotos, desde el de Santa María de Santiago en 1773 hasta el moderado de El Salvador del 3 de enero de 2018. Nótese que la Capital ha sido trasladada desde Antigua Guatemala a la ubicación actual en 1776, después del terremoto de 1773, explicando así por qué no hay terremotos anteriores a esta fecha. Nótese también que la secuencia sísmica de

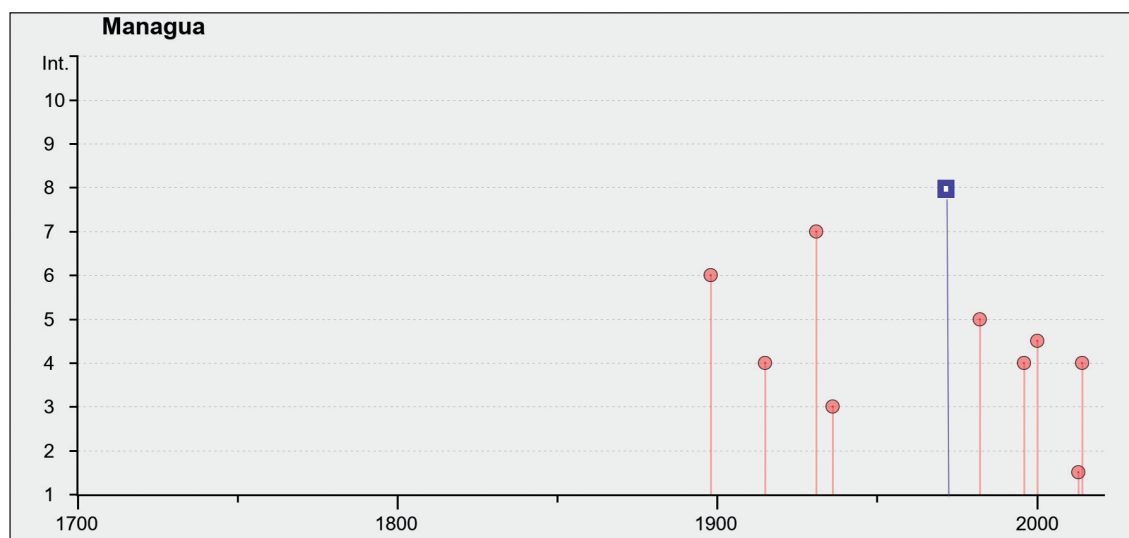


Fig. 5.4 - Site seismic history for Managua (NI) available at http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3617763. A square symbol has been added to represent the 1972 earthquake.

Fig. 5.4 - Historia sísmica del sitio de Managua (NI) disponible en http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3617763. Se ha agregado un símbolo cuadrado para representar el terremoto de 1972.

earthquakes prior to this date; note also that the 1917-1918 seismic sequence, represented by the MDP set of 26 December 1917 with 71 IDPs all located in the vast area of the city, does not exist in the original graph of Fig. 5.3. This is a typical case where the assessment of intensity at a more detailed scale than the municipality causes the lack of a synthetic evaluation of the effects of an earthquake at the basic administrative level. If we accept that on average the intensity of the 1917 event in Guatemala City can be estimated as high as VIII-IX, it will result in the highest observed value, exceeding the one given for the 1976 devastating earthquake; this value has been manually added to the graph in Fig. 5.3, with a different symbol. For further details, we invite the readers to surf on the list of the closest localities (within 15 km distance) that appear below the time graph, at the link indicated in the caption of Fig. 5.3.

Less represented (9 observations), and with a similar problem to the previous case,

1917-1918, representada por el conjunto MDP del 26 de diciembre de 1917 con 71 IDP, todos ubicados en la vasta área de la ciudad, no existe en la gráfica original de la Fig. 5.3. Se trata de un caso típico en el que la evaluación de la intensidad a una escala más detallada provoca la falta de una evaluación sintética de los efectos de un terremoto a nivel administrativo básico. Si aceptamos que, en promedio, la intensidad del evento de 1917 en la Ciudad de Guatemala puede alcanzar hasta un valor VIII-IX, éste resultará el valor más alto observado, superando el dado para el devastador terremoto de 1976; este valor se ha agregado manualmente al gráfico de la Fig. 5.3, con un símbolo diferente. Para más detalles, invitamos a los lectores a navegar por la lista de las localidades más cercanas (a menos de 15 km de distancia) que aparecen debajo del gráfico de tiempo, en el enlace indicado en la leyenda de la Fig. 5.3.

Menos representado (9 observaciones, Fig. 5.4), y con un problema similar al del caso anterior es el caso de la capital de Nicaragua, Managua. El terremoto más relevante y recién-

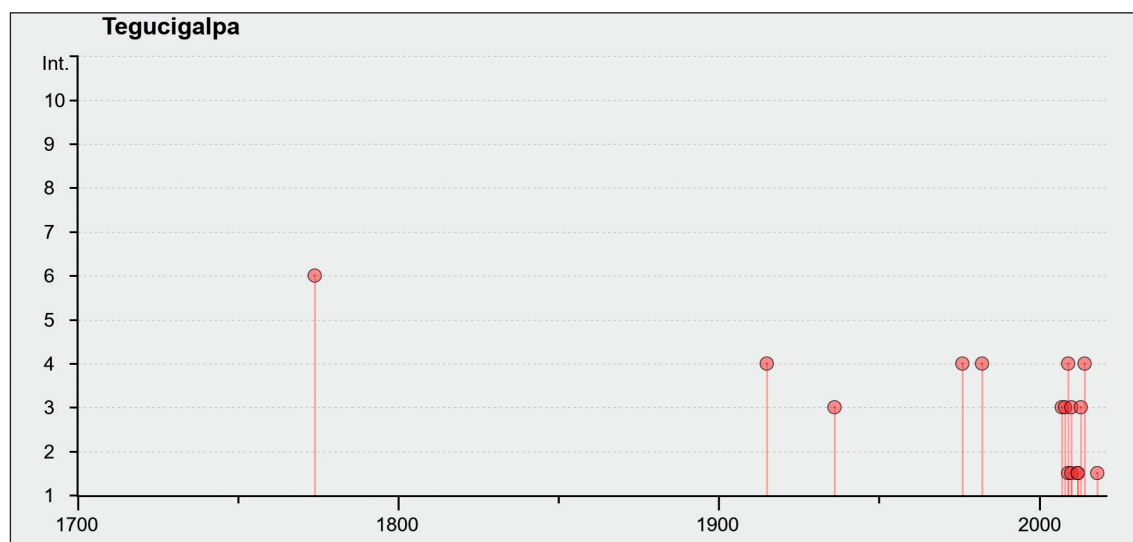


Fig. 5.5 - Site seismic history for Tegucigalpa (HN) available at http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3600949.

Fig. 5.5 - Historia sísmica del sitio de Tegucigalpa (HN) disponible en http://marca-riesca.inogs.it/query_place/places/./call_place.htm?place=3600949.

is the site seismic history of Managua (Fig. 5.4). The most relevant and recent earthquake for the capital of Nicaragua, the 23 December 1972 earthquake, is not plotted in the original plot of Fig. 5.4, as the IDPs have been assigned to partial sectors of the city. The lateral variability of damage conditions, in this case, is due to the presence of strong local site response amplifications, and permanent deformations at the surface, due to the causative fault. The 1972 earthquake, however, is on average about one degree of intensity greater than the maximum value plotted in the graph, referring to another moderate shallow earthquake in 1931; we added this value manually to Fig. 5.4, with a different symbol. We will see in the next chapter how these problems of spatial representativeness can be fixed by other graphic output.

Finally, in Tegucigalpa the site seismic history shows the lesser extent of the seismic problem for the city (Fig. 5.5); first damage conditions have been reached only

te ocurrió el 23 de diciembre de 1972, que no está representado en el gráfico original de la Fig. 5.4, ya que los IDP han sido asignados a sectores parciales de la ciudad. La variabilidad lateral de las condiciones de los daños, en este caso, se debe a la presencia de fuertes amplificaciones locales de respuesta del sitio, y a las deformaciones permanentes en la superficie, debido a la falla causante. El terremoto de 1972, sin embargo, es en promedio alrededor de un grado de intensidad mayor que el valor referido a otro terremoto moderado y poco profundo en 1931; se ha agregado manualmente al gráfico de la Fig. 5.4, con un símbolo diferente. Veremos en el próximo capítulo cómo estos problemas de representatividad espacial pueden ser arreglados por otros gráficos.

Finalmente, en Tegucigalpa la historia sísmica del sitio muestra la menor relevancia del problema sísmico para la ciudad (Fig. 5.5). Las condiciones de los mayores daños ($I=VI$) se han alcanzado sólo una vez, en 1774, mientras que terremotos pequeños se sienten con bastante frecuencia (grados III y IV). Téngase en

once, in 1774, while more or less distant earthquakes are quite frequently felt (degrees III and IV): consider that most of the data for Honduras derives from DYFI questionnaires, with their pros and cons. Note also that the maximum intensity assigned to the city (VII-VIII in 1851, see Fig. 4.57) is not reported in this graph, as the reference earthquake was not present in the MARCA-GEHN catalogue; this is because we have decided that a single-point MDP is not sufficient to enter a new record in the parametric catalogue. We acknowledge that important efforts in basic research of historical documental sources are needed to establish the reliability of intensity assessment of these oldest events.

5.2. Maximum observed intensity map

Another result, or by-product, of a macroseismic intensity database is a map of the maximum observed values, given within or without time frames. This representation appears at the entry page of the query by place (http://marca-riesca.inogs.it/query_place/) before selecting the site one is interested in on the alphabetic list, or using the search tools. The following figures show the spatial distribution of the maximum intensities collected in this work; the values are colour-coded on the administration borders of municipalities (Fig. 5.6). We plotted the macroseismic intensities given in the MM/MSK/MCS/DYFI-proxy scales, thus leaving aside only the information collected from geological and tsunami intensities, - as previously mentioned, respectively 10 IDPs in the ESI scale (Michetti *et al.*, 2007), 27 IDPs given in TSU scale (Papadopoulos and Imamura, 2001), that cannot be treated jointly, even if all the scales are set in a 12-degrees range. To be rigorous, any merging of data of different macroseismic scale (e.g. MM with MSK) is acceptable, as

cuenta que la mayoría de los datos derivan de los cuestionarios DYFI, con sus pros y contras. Obsérvese también que la intensidad máxima asignada a la ciudad (VII-VIII en 1851, véase la Fig. 4.57) no se indica en este gráfico, ya que el terremoto de referencia no estaba presente en el catálogo de MARCA-GEHN; esto se debe a que hemos considerado que un MDP de un solo punto no es suficiente para introducir un nuevo registro en el catálogo paramétrico. Reconocemos que se necesitan importantes esfuerzos en la investigación básica de las fuentes documentales históricas para establecer la fiabilidad de la evaluación de la intensidad de estos eventos más antiguos.

5.2. Mapa de intensidad máxima observada

Otro subproducto de una base de datos macrosísmica de intensidad es un mapa de los valores máximos observados, dados dentro o fuera de un marco temporal. Esa representación aparece en la página de entrada de la consulta por lugar (http://marca-riesca.inogs.it/query_place/) antes de seleccionar el sitio de interés en la lista alfabética, o mediante las herramientas de búsqueda. Las siguientes figuras muestran la distribución espacial de las intensidades máximas recopiladas en este trabajo, con los valores codificados por colores en los límites de la administración de los municipios (Fig. 5.6). Hemos graficado las intensidades macrosísmicas dadas en las escalas MM/MSK/MCS/DYFI-proxy, omitiendo así sólo la información recopilada de las intensidades geológicas y de los tsunamis - como se mencionó anteriormente, respectivamente 10 IDP en la escala ESI (Michetti *et al.*, 2007), 27 IDP dados en la escala TSU (Papadopoulos e Imamura, 2001), que no pueden ser tratados conjuntamente, incluso si todas las escalas se establecen en un rango de 12 grados. Para ser rigurosos, cualquier fusión de datos de diferentes escalas macrosísmicas (por ejemplo, MM con MSK) es

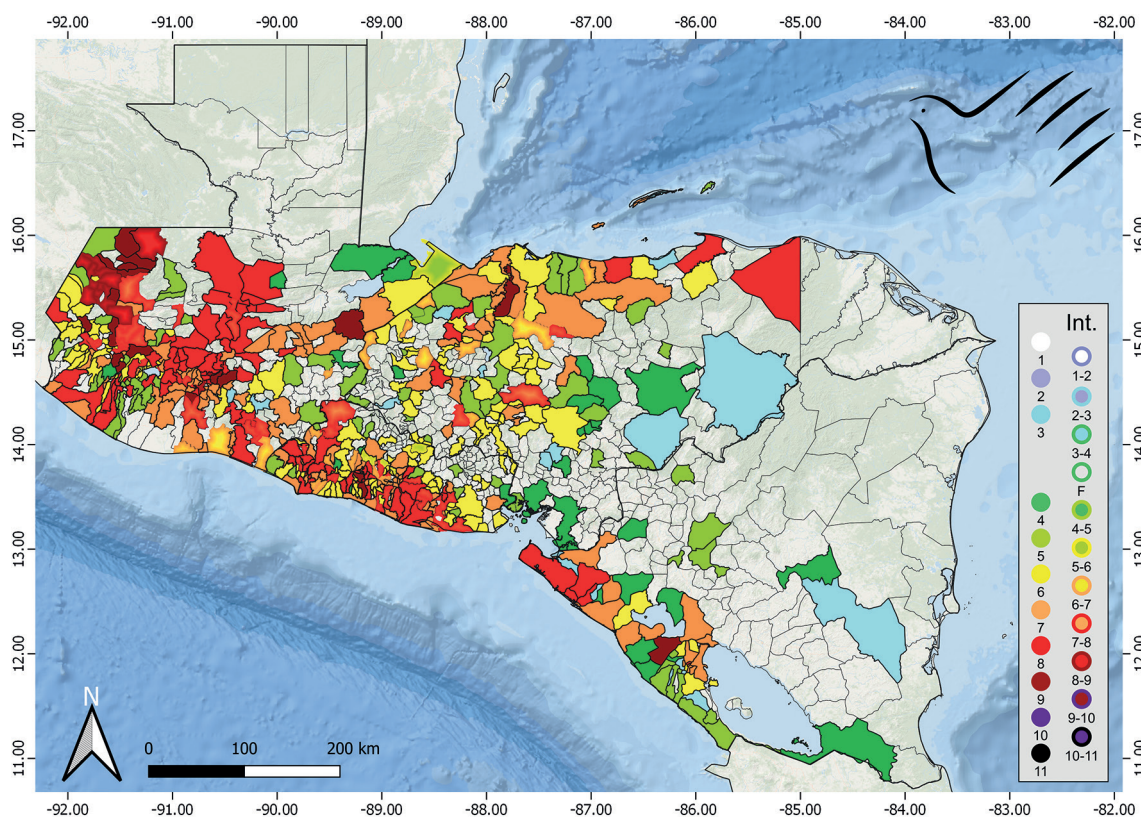


Fig. 5.6 - Maximum observed intensities as reported in MARCA-GEHN (V.1.6) for the Central America countries of Guatemala, El Salvador, Honduras, and Nicaragua: representation of municipalities with I_{max} above the perception threshold ($I_{max} \geq III$). The colour code according to the legend on the right side of the picture represents the maximum observed value within the municipality. Note that intensities represent different macroseismic scales (namely, MM, MSK, MCS, DYFI see glossary in Appendix 1). In grey the municipalities with no data available.

Fig. 5.6 - Intensidades máximas observadas reportadas en MARCA-GEHN (V,1.6) para los países centroamericanos de Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua. Representación de municipios con I_{max} por encima del umbral de percepción municipios ($I_{max} \geq III$). El código de color según la leyenda del lado derecho de la imagen representa el valor máximo observado dentro del municipio. Tenga en cuenta que las intensidades representan diferentes escalas macrosísmicas (a saber, MM, MSK, MCS, DYFI ver glosario en el Apéndice 1). En gris los municipios sin datos disponibles.

is discussed in the next section, but for the demonstrative purpose of this exercise we adopted this simplification.

The maximum intensities follow the most important fault systems in the countries, with a nearly continuous “red” stripe (corresponding to intensity VIII and above) along the volcanic belt of the Pacific coast, from the Mexican border of Guatemala to Managua, in Nicaragua; a similar but more fragmented image of damaged sites (intensities VI and above) follows the trans-

acceptable, como se discutirá en la próxima sección, pero para el propósito demostrativo de este ejercicio adoptamos esta simplificación.

Las intensidades máximas siguen los sistemas de fallas más importantes de los países, con una franja “roja” casi continua (correspondiente a la intensidad VIII y superior) a lo largo del cinturón volcánico de la costa del Pacífico, desde la frontera mexicana de Guatemala hasta Managua, en Nicaragua; una imagen similar pero más fragmentada de los sitios dañados (intensidades VI y superiores) sigue el sistema de

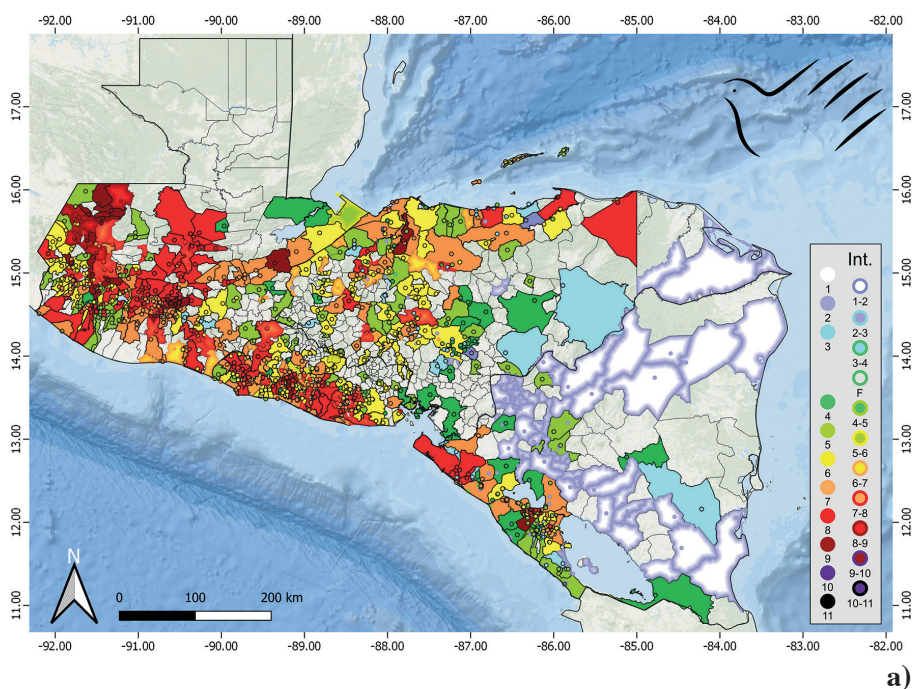
form fault system in front of the Honduras Atlantic coast. Note the areas of municipalities range from a few square kilometres in the most inhabited areas, to huge parts of the territory in the wildest regions of Guatemala, Honduras, and Nicaragua.

Note also that some municipalities are not represented by IDPs, even if they are near severely damaged areas. This is the case for example of some localities along the Pacific coast in Guatemala SW of the capital: we argue that it is mainly due to unequal population density and/or economic and cultural relevance at the time of the major earthquakes, as reports, especially for historical earthquakes, usually refer to the most important sites.

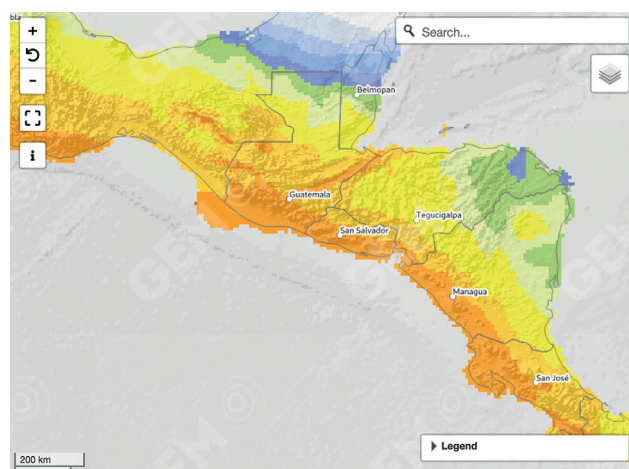
We consider the representation of maximum intensities a very preliminary but potentially relevant result of this work, as it may be a benchmark for a first comparison of seismic hazard assessments of the region. Following Muir-Wood (1993) that defines five generations of the seismic hazard assessment, an *Imax* map fits the criteria of the first generation, the historical determinism, where the hazard assessment is supported by the availability of direct observations. In Fig. 5.7 we put the results obtained by this work side by side with the latest results recently released by GEM (Pagani *et al.*, 2018), that are referred to the so-called third generation of seismic hazard assessment (seismotectonic probabilism). The shaking measures (respectively, macroseismic intensity and peak ground acceleration *PGA*) represent different phenomena, and cannot be converted to each other with trivial, uncalibrated relationships. Nonetheless, the colour patterns direct our attention in reckoning similarities and differences in their spatial distributions, and in reasoning about the causes of discrepancies. We argue that perhaps in the future they may also help ad-

fallas transformantes frente a la costa atlántica de Honduras. Obsérvese la extensión de los municipios, que abarca desde unos pocos kilómetros cuadrados en las zonas más habitadas, hasta enormes partes del territorio en las regiones más remotas de Guatemala, Honduras y Nicaragua.

Nótese también que algunos municipios no están representados por puntos de intensidad, aunque estén cerca de zonas gravemente dañadas. Este es el caso, por ejemplo, de algunas localidades a lo largo de la costa del Pacífico en Guatemala, Suroeste de la capital: sostenemos que se debe principalmente a la desigual densidad de población y/o a la relevancia económica y cultural en el momento de los grandes terremotos, ya que los informes, especialmente para los terremotos históricos, suelen referirse a los sitios más importantes. Consideramos que la representación de las intensidades máximas es un resultado muy preliminar pero potencialmente relevante de este trabajo, ya que puede ser un punto de referencia para una primera comparación de las evaluaciones del peligro sísmico de la región. Siguiendo a Muir-Wood (1993), que define cinco “generaciones” de la evaluación de la peligrosidad sísmica, un mapa *Imax* se ajusta a los criterios de la primera generación, el determinismo histórico, en el que la evaluación de la peligrosidad se apoya en la disponibilidad de observaciones directas. En la Fig. 5.7 se representan por separado los resultados obtenidos por este trabajo de los últimos resultados publicados recientemente por el GEM (Pagani *et al.*, 2018), que se refieren a la llamada tercera generación de evaluación de la peligrosidad sísmica (probabilismo sismotectónico). En ambos mapas se representan medidas de la sacudida en términos de diferentes parámetros, intensidad macrosísmica y aceleración pico, y aunque a veces se han utilizado correlaciones para la conversión de estos parámetros, no creemos conveniente hacerlo con relaciones triviales no calibradas. No obstante, los patrones de color dirigen nuestra atención al análisis en el cálculo de las similitudes y dife-



a)



b)

Fig. 5.7 - Seismic hazard generations by comparison: a) maximum intensity map, ascribed to the historical determinism method, obtained by all the data available in the V.1.6 release of MARCA-GEHN database (this work); the representation as in Fig. 5.6, small dots show all the localities represented inside each municipality. Note the lack of reddish patterns along the Pacific coastal area of southern Nicaragua and locally in Guatemala; b) the most recent results ascribed to the seismotectonic probabilism method: *PGA* at 10% probability of exceedance in 50 years, rock site condition, taken from Pagni *et al.* (2018); note the nearly uniform values of *PGA* predicted in the Honduran depression area with respect to the adjacent areas.

Fig. 5.7 - Generaciones de riesgo sísmico en comparación: a) mapa de intensidad máxima, atribuido al método de determinismo histórico, obtenido por todos los datos disponibles en la versión V.1.6 de la base de datos MARCA-GEHN (este trabajo); la representación como en la Fig. 5.6, los puntos pequeños muestran todas las localidades representadas dentro de cada municipio. Nótese la falta de patrones rojizos a lo largo de la zona costera del Pacífico del sur de Nicaragua y localmente en Guatemala; b) mapa probabilista de amenaza sísmica, representando el movimiento esperado en términos de aceleración pico, *PGA*, para 10% de probabilidad de excedencia en 50 años, en condiciones de roca, tomado de Pagni *et al.* (2018). Nótese los valores casi uniformes de *PGA* predichos en el área de la Depresión de Honduras con respecto a las áreas adyacentes.

dress the areas where additional studies are particularly urgent, to fill the gap of knowledge about the seismic sources (e.g. the Honduras Depression zone, not distinguishable in the GEM map), or when the documental testimonies about the earthquakes effects are particularly scarce (e.g. southern Nicaragua, Guatemala Pacific coastal stripe).

5.3. Limitations and perspectives

The major limitation of this database is completeness, as the first bulk of events collected so far were selected without predefined time or magnitude thresholds. The MDPs are representative of the most damaging event occurring during the instrumental period, accomplishing the co-existence of deep/surface, offshore/inland earthquake sources; some special cases are focussed on the local seismic site response, or on the geological (landslide) and tsunami effects. Finally, the searches done on the site seismic history at some municipalities, even if necessary to promote alternative methods of hazard assessment, have produced single point macroseismic fields, partially integrated in the database.

A second main limitation of the database is homogeneity in intensity assessment. We have previously addressed the co-existence of several intensity scales, in the IDPs stored in this archive, and the care needed in handling different data sets. Differently from other macroseismic databases, this study has collected and archived mostly pre-existing analyses of earthquakes, done in different epochs by researchers with different backgrounds (e.g. geographers, naturalists, geologists, engineers); sometimes the data are obtained by online question-

naires in their spatial distributions, trying to reason about the causes of the discrepancies. We sustain that perhaps in the future they can help to address the spheres in which it is particularly urgent to carry out additional studies, to fill the gap of knowledge about the seismic sources (for example, the zone of the Honduras Depression, which is not distinguished in the GEM map), or the documental testimonies about the effects of earthquakes are particularly scarce (for example, the south of Nicaragua, the coastal fringe of the Pacific of Guatemala).

5.3. Limitaciones y perspectivas

La principal limitación de esta base de datos es la falta de completitud, ya que el primer grupo de sucesos recogidos hasta ahora se seleccionaron sin límites de tiempo o magnitud predefinidos. Los MDP son representativos del evento más destructivo ocurrido durante el período instrumental, logrando la coexistencia de fuentes de terremotos profundos/superficiales o costa afuera/interiores. Algunos casos especiales se centran en la respuesta local del sitio, o en los efectos geológicos y de tsunamis. Por último, las búsquedas realizadas en el historial sísmico del sitio en algunos municipios, incluso si es necesario para promover métodos alternativos de evaluación de riesgos, han producido algunos campos macrosísmicos con un único dato, parcialmente integrados en la base de datos.

Una segunda limitante importante de esta base de datos, es la falta de homogeneidad en la evaluación de la intensidad. Anteriormente hemos abordado la coexistencia de varias escalas de intensidad, en los IDP almacenados en este archivo, y el cuidado que se debe de tener al manejar diferentes conjuntos de datos. A diferencia de otras bases de datos macrosísmicas, este estudio ha coleccionado y archivado en su mayoría resultados de análisis preexistentes de terremotos, desarrollados en diferentes épocas por investigadores con diferentes antecedentes (ejemplo geógrafos, naturalistas, geólogos, in-

naires compiled by non-professionals. With the exceptions of a few cases where the original descriptions given by the sources have been re-interpreted and intensity values assigned *ex-novo*, the reliability and uniformity in intensity values bounces back on the reliability of the quoted source. Note that the MIDOP tool is not designed to differentiate intensities of various scales, for example, with different symbols on a map, or on a time history. In addition, in several cases, the MDP set is obtained by more than one single reference study. The flexibility of MIDOP tool has allowed us to add to each IDP in the event list (bottom left panel in the query-by-earthquake) an intensity scale code (ISCA) and a reference code (RefID), to track these data.

Other more specific problems are linked to the site representation, and earthquake parametric records, as discussed in the following.

5.3.1. Site identification and coding

A problem emerging during the data preparation is the size of the area represented by a SITEID, i.e. a numerical code linked to the geographical coordinates of a point. By adopting MIDOP (Locati and Cassera, 2001), since it is “*a tool that does not require any third party product for easily transforming macroseismic intensity data tables into interactive maps*”, we adopt the rank of territorial levels that MIDOP has defined, namely country, region, province, municipality, and locality. The sampling of sites can be done at one level only: thus, if a locality is defined within a municipality, the two “objects” are handled separately. In the 1976 earthquake, for example, the locality where “damage” is referred to was Cofradia, namely a locality

genieros). A veces los datos son obtenidos por cuestionarios en línea compilados, en su mayoría, por personas que son ajenas al campo de las ciencias de la tierra. Con las excepciones de pocos casos donde las descripciones originales dadas por las fuentes tienen que ser re-interpretadas y los valores de intensidad asignados de nuevo, la fiabilidad y uniformidad en los valores de intensidad se ciñen a la confiabilidad de la fuente citada. Téngase en cuenta que la herramienta MIDOP no está diseñada para diferenciar intensidades de varias escalas, por ejemplo, con diferentes símbolos en un mapa, o en un historial de tiempo. Adicionalmente, en varios casos, los conjuntos MDP son obtenidos por más de un estudio de referencia. La flexibilidad de la herramienta MIDOP nos permite agregar a cada IDP en la lista de eventos (panel inferior izquierdo en la consulta por terremoto) un código de escala (ISCA) y un código de referencia (RefID), para rastrear estos datos.

Otros problemas más específicos están relacionados a la representación de sitio y registro paramétrico de terremotos, como se discute a continuación.

5.3.1. Identificación y codificación del sitio

Un problema que ha surgido durante la preparación de los datos es el tamaño del área representada por un SITEID, es decir, un código numérico vinculado a las coordenadas geográficas de un punto. Al adoptar el MIDOP (Locati y Cassera, 2001), por ser “*un instrumento que no requiere ningún producto de terceros para transformar fácilmente las tablas de datos de intensidad macrosísmica en mapas interactivos*”, adoptamos el rango de niveles territoriales que el MIDOP ha definido, a saber, país, región, provincia, municipio y localidad. El muestreo de los sitios puede hacerse en un solo nivel: así, si se define una localidad dentro de un municipio, los dos “objetos” se manejan por separado. En el terremoto de 1976, por ejemplo, la localidad a la que se refiere el “daño” fue

(suburb, district) within the municipality of San Pedro Sula (Honduras). The seismic history of San Pedro Sula does not show the 1976 intensity, except that we add another IDP, referring to the whole municipality. The questions “Is it acceptable that this datum is extended to the whole city? What is the degree of detail? Which scale do we want to represent in a site seismic history?” do not have unique answers.

It is clear that the macroseismic intensity assessment is inappropriate both in the case of a single/small group of buildings and in the case of a metropolis, with millions of inhabitants.

In addition, there are cases of different sets of coordinates given to a municipality, as they derive from different sources of information. The data extracted from the DYFI questionnaires, for example, come with their own geographical coordinates for each locality, that usually do not correspond to the geo-reference rules we adopted (use of “gazetteer” with a site code identifiers and univocal coordinates). This is the reason why sometimes a SITEID has multiple coordinates, or does not match the location of the inhabited area.

These problems have been partially fixed in the current release of MARCA-GEHN, but they will be a priority for future releases.

5.3.2. Origin and “preferred” earthquake parameters

The final aim of the collection of intensity data for representing an earthquake is a more precise identification of the earthquake source, both in terms of location and energy released. In this sense, even the relatively simple assignment of an origin time (given in UTC time) represents a big step in earthquake qualification. Concerning epicentral location and magnitude assessment, the changes proposed in this work

Cofradía, es decir, una localidad (suburbio, distrito) dentro del municipio de San Pedro Sula (HN). La historia sísmica de San Pedro Sula no muestra la intensidad de 1976, excepto si añadimos otro IDP, refiriéndonos al municipio. Las preguntas - ¿Es aceptable que este dato se extienda a toda la ciudad? ¿Cuál es el grado de detalle? ¿Qué escala queremos representar en la historia sísmica de un sitio? - no tengo respuestas únicas.

Además, existen casos de diferentes coordenadas dadas a un municipio, ya que derivan de diferentes fuentes de información. Los datos extraídos de los cuestionarios DYFI, por ejemplo, vienen con sus propias coordenadas para cada localidad, que usualmente no corresponde con las reglas de georreferencia que adoptamos (uso de “gazetteer” con identificadores de código de sitio y coordenadas unívocas). Esta es la razón por que a veces un SITEID tiene múltiples coordenadas, o no coincide con la ubicación del área habitada.

Estos problemas se han solucionado parcialmente en la versión actual de MARCA-GEHN, pero será una prioridad para versiones futuras.

5.3.2. Parámetros de terremotos originales y “preferidos”

El objetivo final de la recopilación de datos de intensidad para representar un terremoto ocurrido en la era pre-instrumental es la identificación más precisa de la fuente del terremoto, en términos de ubicación y energía liberada. En este sentido, incluso la asignación relativamente simple de un tiempo origen (dado en tiempo UTC) representa un gran paso en la calificación de terremotos. Sobre la ubicación epicentral y asignación de magnitud, los cambios propues-

are limited to a few cases, mainly referring to El Salvador earthquakes. We acknowledge that the tools commonly used in Italy, for example, to compute an epicentral location and a magnitude proxy on the basis of the distribution of the intensity data points (i.e. Gasperini *et al.*, 1999, 2010) cannot be used without a “tuning” procedure in the Central American earthquakes, and this is because:

- 1) the MDP set for Central America usually has few points;
- 2) there is a cumulation of effects during long lasting seismic sequences;
- 3) both shallow, crustal and volcanic, and deep sources affect the same areas;
- 4) many strong earthquakes are located off-shore.

New “preferred” parameters have been set mainly by means of analogies, or comparison with recent events whose location and magnitude is sufficiently well constrained.

We acknowledge that the identification of earthquakes using, if possible, the EVENTID code of the catalogue from which the earthquake record has been taken is a powerful method to explore the data quality and quantity that has been used to derive the initial location.

On perspectives, completeness and homogeneity, certain limits can be overcome:

- by dedicating human resources to a more systematic search of documentary sources, and by putting together transdisciplinary teams (geoscientists, historians, geographers, seismic engineers);
- by enhancing the availability of technical unpublished reports;
- by encouraging the practices of experienced personnel in post-earthquake surveys, thus filling the gap in macroseismic data of the most recent events;
- by modifying the tool used to archive

tos en este trabajo se limitan a unos pocos casos principalmente referidos a terremotos en El Salvador. Reconocemos que las herramientas comúnmente usadas en Italia, por ejemplo, para calcular una ubicación epicentral y un proxy de magnitud con base en la distribución de los puntos de intensidad (es decir, Gasperini *et al.*, 1999, 2010) no pueden ser usados sin un procedimiento de “ajuste” en los terremotos de CA, y esto es porque:

- 1) los conjuntos MDP en CA usualmente tienen pocos puntos;
- 2) hay acumulación de efectos durante secuencias sísmicas de larga duración;
- 3) a la vez existen fuentes superficiales, corticales y volcánicas, y profundas en las mismas áreas;
- 4) muchos terremotos fuertes están ubicados costa afuera.

Nuevos parámetros “preferidos” se han establecido principalmente por analogías o comparaciones con eventos recientes cuya ubicación y magnitud está suficientemente bien restringida.

Reconocemos que la identificación de terremotos usando, si es posible, el código EVENTID del catálogo del que se ha tomado el registro de terremotos, es un método poderoso para explorar la calidad y la cantidad de los datos que han sido usados para derivar la ubicación inicial.

Sobre perspectivas, limitaciones de completitud y homogeneidad, estos se pueden superar:

- dedicando recursos humanos para una búsqueda más sistemática de fuentes documentales, y formando equipos transdisciplinarios (geocientíficos, historiadores, geógrafos, ingenieros sísmicos);
- mejorando la disponibilidad de informes técnicos no publicados;
- fomentando las prácticas de personal experimentado en estudios posteriores al terremoto, llenando así la falta de datos macrosísmicos de los eventos más recientes;
- modificando la herramienta usada para el archivo y representación de la base de datos

and represent the database (MIDOP), in agreement with the new features;

- by adopting more diffuse measurements of the shakings, using low-cost instruments too, to overcome or better constrain the intensity's proxies (e.g. ShakeMap or data derived from online questionnaires).

The RIESCA Project, in these aspects, represents a turning point for the involved countries, and the transfer of knowledge has been extraordinary, during its activity.

6. Conclusions

The Macroseismic ARchive for Central America countries - Guatemala, El Salvador, Honduras and Nicaragua (MARCA-GEHN) - has been developed in the years 2017-2020, in the frame of the RIESCA Project, funded by the Italian Agency for Development Corporation. The first objective, agreed among all the participant countries, is to adopt the best European practices in the field of macroseismology, to release an online and publicly available database of macroseismic observations; the second, but no less important aim, is to strengthen international cooperation, with full respect for the local scientific communities.

The data collection has sought to deal with the particular conditions of the Central America countries involved in the project that are exposed to a variety of seismogenic processes, different levels of ground shakings, non-uniform instrumental and historical seismic data availability. In addition, the local reference institutions have sometimes to face limitations in human and material resources, and, in general, the research in macroseismology is not perceived as important as instrumental seismology.

The RIESCA Project has adopted inno-

(MIDOP), de acuerdo con las nuevas características;

- adoptando medidas más difusas de los temblores, usando también instrumentos de bajo costo, para superar o restringir mejor los proxies de intensidad (por ejemplo, ShakeMap o datos derivados de cuestionarios en línea).

El proyecto RIESCA, en estos aspectos, representa un punto de inflexión para los países involucrados, y la transferencia de conocimiento ha sido extraordinaria durante su actividad.

6. Conclusion

El Archivo Macrosísmico para los países de América Central - Guatemala, El Salvador, Honduras y Nicaragua (MARCA-GEHN) - se ha desarrollado en los años 2017-20, en el marco del Proyecto RIESCA, financiado por la Agencia Italiana para la Cooperación al Desarrollo. El primer objetivo, acordado entre todos los países participantes, es adaptar las mejores prácticas europeas en la esfera de la macrosismología, para publicar una base de datos macrosísmicos en línea, de acceso público, de observaciones macrosísmicas; el segundo objetivo, pero no menos importante, es fortalecer la cooperación internacional, en el respeto de las comunidades científicas locales.

La recopilación de datos se ha enfrentado a las singularidades de los 4 países de América Central que participan en el Proyecto, que están expuestos a una variedad de procesos sismogénicos con diferentes niveles de sacudida sísmica, y con disponibilidad no uniforme de datos sísmicos instrumentales e históricos. Además, las instituciones de referencia locales a veces tienen que hacer frente a limitaciones en cuanto a recursos humanos y materiales y, en general, la investigación en macrosismología no se considera tan importante como la sismología instrumental.

vative solutions to fix the problems related to the gathering, sharing, and checking of data, and the distance working of researchers, a theme exacerbated by the COVID-19 emergency, occurred during the very final phases of the work. Another distinctive aspect is that MARCA-GEHN has tried to solve the common problems that occur at the borders of neighbouring countries, when the studies are pivoted on a national scale.

We acknowledge that the seismic catalogues available for Central America countries, up to now, have some limitations, which hinder the “best” seismic hazard assessment. The RIESCA Project acts in the perspective of filling this gap, by supporting the realisation of the first macroseismic database for four Central America countries. The major limitations are related to the discontinuous site intensity (IDP) collection, non-uniform usage of the intensity scales, incomplete inventory of primary sources. But most of the devastating earthquakes ($I_0 > VIII$) of the last century have been studied with some detail; the geologic deformation in the area is so fast that many different seismic sources have been active, during the two last centuries, and have been sampled by this prototypal collection of macroseismic data sets.

The increase of attention in handling macroseismic data by the local institutions, the interoperability of the tools developed for data collection and mapping, and the share of literature and primary sources among scientific and civil defence communities, have been constant results that we hope will be progressively extended to neighbouring countries.

Acknowledgements. The MARCA-GEHN V.1.6 archive has been realised with a Beta2-2019 release of MIDOP: for more details about the tool, the reader can refer to the manual. We

El Proyecto RIESCA ha adoptado soluciones innovadoras para resolver los problemas relacionados con la recopilación, intercambio y comprobación de datos, así como con el trabajo a distancia de los investigadores, tema que se vio exacerbado durante la última fase del proyecto, producto de la emergencia por COVID-19. Otro aspecto distintivo es que MARCA-GEHN ha tratado de resolver los problemas comunes que se producen en las fronteras de los países vecinos, cuando los estudios giran a escala nacional.

Los catálogos sísmicos disponibles para los países de América Central, hasta ahora, tienen algunas limitantes que dificultan la “mejor” evaluación de la peligrosidad sísmica. El Proyecto RIESCA actúa en la perspectiva de llenar este vacío, apoyando la realización de la primera base de datos macrosísmica para cuatro países de América Central. Las principales limitaciones están relacionadas con la recolección discontinua de la intensidad del sitio (IDP), el uso no uniforme de las escalas de intensidad y el inventario incompleto de las fuentes primarias de información. Pero la mayoría de los terremotos destructivos ($I_0 > VIII$) del siglo pasado han sido estudiados con cierto detalle; la deformación geológica en el área es tan rápida que muchas fuentes sísmicas diferentes han estado activas, durante los dos últimos siglos, y han sido muestreadas por esta colección prototípica de conjuntos de datos macrosísmicos.

El aumento de la atención en el manejo de los datos macrosísmicos por parte de las instituciones locales, la interoperabilidad de las herramientas desarrolladas para la recopilación de datos, la cartografía, y el intercambio de literatura y fuentes primarias entre las comunidades científicas y de defensa civil son resultados persistentes que esperamos se extiendan progresivamente a los países vecinos.

Agradecimientos. El archivo MARCA-GEHN V.1.6 se realizó con una versión Beta2-2019 de MIDOP: para obtener más detalles sobre la herramienta, el lector puede consultar el manual. Agradecemos a Mario

acknowledge Mario Locati for his constant and precious help. We acknowledge the patient and detailed work of the reviewers, Maria Belen Benito and Marino Protti, of the editor Dario Slejko, and journal staff (Giancarlo Renner and Stephen Conway for English revision). The work has been done in the frame of the Project RIESCA (“Escenarios de Riesgo en Centro America” 2016-2020), funded by the AICS-Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo, coordinated by UNIPA, University of Palermo (Scientific Coordinator Giuseppe Giunta).

We dedicate this work to the memory of our dear colleague and friend Rubén Eduardo Gutiérrez, supervisor of the Working Group of Volcanology in the RIESCA Project, representing El Salvador. A volcanologist and passionate about Earth Sciences, Eduardo played a very important role in this project, not only for the volcanology area but for all the thematic tables and especially for the finalisation of the present work. He provided major contributions during his visit to Italy in 2017, recognising the value and reliably supporting the initiative of data collection by the Seismology Working Group. He was truly an exemplary figure, with his dedication, highly professional level, passion for science and academia, but not least for his tireless human qualities. Eduardo passed away in 2020, leaving a deep void in the RIESCA group, in his working and social environment, and sadly among his own family. We wish to keep him alive in our memories by dedicating this scientific work to his name. We will always remember him by his favourite phrase: “*Caminante no hay camino, se hace camino al andar*” (Walker, there is no road; you make your own path as you go).

Locati por su constante y valiosa ayuda. Reconocemos el trabajo paciente y detallado de los revisores, Maria Belen Benito y Marino Protti, del editor Dario Slejko, y del personal de la revista (Giancarlo Renner y Stephen Conway para la revisión en inglés).

El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto RIESCA (“Escenarios de Riesgo en Centro America” 2016-2020), financiado por la AICS- Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo, coordinado por la UNIPA-Universidad de Palermo (Coordinador Científico Giuseppe Giunta).

Dedicamos este trabajo a la memoria de nuestro querido colega y amigo Rubén Eduardo Gutiérrez, responsable de la Mesa Temática de Vulcanología en el Proyecto RIESCA en representación de El Salvador. Vulcanólogo, apasionado por las Ciencias de la Tierra, Eduardo jugó un papel muy importante dentro de este Proyecto, no solo para el área de vulcanología sino para todas las mesas temáticas y en especial para la finalización del presente trabajo por el cual realizó fuertes aportes durante las visitas en Italia en 2017, reconociendo el valor y apoyando fehacientemente la iniciativa de la recopilación de datos por el grupo de Sismología. Nos regaló un gran ejemplo de vida con su entrega, alto nivel profesional, pasión por la ciencia y la academia pero además por su enorme e incansable calidad humana. Eduardo falleció en 2020, dejando un enorme vacío en la Familia RIESCA, en su entorno familiar, laboral y social. Sin embargo queremos mantenerle vivo en nuestras memorias, dedicando este esfuerzo científico en su nombre y le recordaremos siempre con su frase favorita: “*Caminante no hay camino, se hace camino al andar*”.

REFERENCES - REFERENCIAS

- Abe K.; 1994: *Characteristic properties of the 1992 Nicaragua tsunami*. In: Tanaka S. and Noguchi K. (eds), Proceedings of the 3rd UJNR Tsunami Workshop, PWRI Technical Memorandum, n. 3315, Tsukuba, Japan, pp. 57-76.
- Abe K., Abe K., Tsuji Y., Imamura F., Katao H., Ito Y., Satake K., Bourgeois J., Noguera E. and Estrada F.; 1993: *Field survey of the Nicaraguan earthquake and tsunami of September 2, 1992*. Bull. Earthquake Res. Inst., University of Tokyo, 68, 23-70, in Japanese.
- Acosta A., Bodán M., Guzmán C., Hernández Z., Morales A., Segura F., Strauch W., Tenorio V. and Urbina C.; 1996: *Sismos de Nicaragua Abril 1996*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Dirección General de Geología y Geofísica, Managua, Nicaragua. <webserver2.ineter.gob.ni/boletin/1996/04/sismos-abril19604.htm>.
- Acosta A., Bodán M., Guzmán C., Morales A., Segura F., Strauch W., Talavera E. and Tenorio V.; 2000: *Boletín sísmico, vulcanológico y geológico mensual: sismos y volcanes de Nicaragua - julio 2000*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Dirección General de Geología y Geofísica, Managua, Nicaragua. <webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2000/07/index0007.htm>.

- Acosta A., Guzmán C., Guzmán J.C., Herrera M., Morales A., Sánchez J. and González I.; 2014: *Boletín mensual sismos y volcanes de Nicaragua abril 2014*. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, Dirección General de Geología y Geofísica, Managua, Nicaragua, 128 pp.
- Albarello D. and Mucciarelli M.; 2002: *Seismic hazard estimates using Ill-defined macroseismic data at site*. Pure Appl. Geophys., 159, 1289-1304, doi: 10.1007/s00024-002-8682-2.
- Albini P., Musson R.M.W., Gomez Capera A.A., Locati M., Rovida A., Stucchi M. and Viganò D.; 2013: *Global historical earthquake archive and catalogue (1000-1903)*. GEM Foundation, Pavia, Italy, Technical Report 2013-01 V1.0.0, 202 pp.
- Albini P., Musson R.M.W., Rovida A., Locati M., Gomez Capera A.A. and Viganò D.; 2014: *The global earthquake history*. Earthquake Spectra, 30, 607-624, doi: 10.1193/122013EQS297.
- Alfaro C.S., Kiremidjian A.S. and White R.A.; 1990: *Seismic zoning and ground motion parameters for El Salvador*. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, USA, Report n. 93, 163 pp.
- Algermissen S.T., Dewey J.W., Langer C.J. and Dillinger W.H.; 1974: *The Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972: location, focal mechanism, and intensity distribution*. Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 993-1004.
- Alvarado D., DeMets C., Tikoff B., Hernandez D., Wawrzyniec T.F., Pullinger C., Mattioli G., Turner H.L., Rodriguez M. and Correa-Mora F.; 2011: *Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observations*. Lithos., 3, 3-21, doi: 10.1130/L108.1.
- Alvarez L., Rodriguez A.M., Gonzalez O.L., Moreno B. and Cabrera A.; 2018: *Seismotectonics of the Nicaraguan depression from recent seismicity*. J. Geol. Geophys., 7, 446, 13 pp., doi: 10.4172/2381-8719.1000446.
- Álvarez-Gómez J.; 2009: *Tectónica activa y geodinámica en el norte de centroamérica*. PH.D. Tesis en Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Spain, 241 pp.
- Álvarez-Gómez J.A., Meijer P.T., Martínez-Díaz J.J. and Capote R.; 2008: *Constraints from finite element modeling on the active tectonics of northern Central America and the Middle America Trench*. Tectonics, 27, TC1008, 12 pp., doi: 10.1029/2007TC002162.
- Ambraseys N.N. and Adams R.D.; 1996: *Large-magnitude Central American earthquakes, 1898-1994*. Geophys. J. Int., 127, 665-692, doi: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb04046.x.
- Ambraseys N.N. and Adams R.D.; 2001: *The seismicity of Central America. A descriptive catalogue 1898-1995*. Imperial College, London, UK, ISBN: 978-1-84816-011-8.
- Ambraseys N.N., Bommer J.J., Buforn E. and Udias A.; 2001: *The earthquake sequence of May 1951 at Jucuapa, El Salvador*. J. Seismol., 5, 23-39, doi: 10.1023/A:1009883313414.
- Anderson R.W.; 1987: *The San Salvador earthquake of October 10, 1986 - Review of building damage*. Earthquake Spectra, 3, 497-541, doi: 10.1193/1.1585444.
- Arcos N., Dunbar P., Stroker K. and Kong L.; 2017: *The legacy of the 1992 Nicaragua tsunami*. Eos, 98, doi: 10.1029/2017EO080845.
- Atkinson G.M. and Wald D.J.; 2007: *"Did You Feel It?" intensity data: a surprisingly good measure of earthquake ground motion*. Seismol. Res. Lett., 78, 362-368, doi: 10.1785/gssrl.78.3.362.
- Authemayou C., Brocard G., Teysier C., Suski B., Cosenza B., Morán-Ical S., González-Véliz C.W., Aguilar-Hengstenberg M.A. and Holliger K.; 2012: *Quaternary seismo-tectonic activity of the Polochic fault, Guatemala*. J. Geophys. Res.: Solid Earth, 117, B7, doi: 10.1029/2012JB009444.
- Baptista A.M., Priest G.R. and Murty T.S.; 1993: *Field survey of the 1992 Nicaragua tsunami*. Mar. Geod., 16, 169-203, doi: 10.1080/15210609309379687.
- Basili R., Kastelic V., Demircioglu M.B., Garcia Moreno D., Nemser E.S., Petricca P., Sboras S.P., Besana-Ostman G.M., Cabral J., Camelbeeck T., Caputo R., Danciu L., Domac H., Fonseca J., García-Mayordomo J., Giardini D., Glavatovic B., Gulen L., Ince Y., Pavlides S., Sesetyan K., Tarabusi G., Tiberti M.M., Utkucu M., Valensise G., Vanneste K., Vilanova S. and Wössner J.; 2013: *The European Database of Seismogenic Faults (EDSF) compiled in the framework of the project SHARE*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma, Italy, doi: 10.6092/INGV.IT-SHARE-EDSF. <dlss.rm.ingv.it/share-edsf/>.
- Baum R.L., Crone A.J., Escobar D., Harp E.L., Major J.J., Martinez M., Pullinger C. and Smith M.E.; 2001: *Assessment of landslide hazards resulting from the February 13, 2001, El Salvador earthquake*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Open-File Report 01-119, 20 pp. <pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0119/>.
- BCN; 2018: *Anuario de estadísticas macroeconómicas - Macroeconomic statistics yearbook 2018*. Banco Central de Nicaragua, Managua, Nicaragua, ISSN 2410-8340. <www.bcn.gob.ni/publicaciones/periodicidad/anual/anuario_estadistico/anuario_estadistico_2018.pdf>.
- Beaulac W.; 1931: *Managua earthquake: official report of the relief work in Nicaragua after the earthquake of March 31, 1931*. The American National Red Cross, U.S. Red Cross Circle, ARC 903, Washington, D.C., USA, 43 pp.
- Belarbi A., Luna R., Applegate K., Calderon H., Rivera O., Lopez L.A. and Rodriguez R.; 2009: *The M 7.3 Honduras earthquake of May 28, 2009*. Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA, USA, Special Earthquake Report, pp. 1-4.

- Benito M.B. and Torres Y. (eds); 2009: *Amenaza sísmica en América Central*. Entimema, Madrid, Spain, 371 pp.
- Benito B., Cepeda J.M. and Martínez Díaz J.J.; 2004: *Analysis of the spatial and temporal distribution of the 2001 earthquakes in El Salvador*. Geol. Soc. Am., Special Paper 375, 18 pp.
- Benito M.B., Lindholm C., Camacho E., Climent A., Marroquín G., Molina E., Rojas W., Escobar J.J., Talavera E., Alvarado G.E. and Torres Y.; 2012: *A new evaluation of seismic hazard for the Central America region*. Bull. Seismol. Soc. Am., 102, 504-523, doi: 10.1785/0120110015.
- Bommer J.; 2001: *The El Salvador earthquake of 13th January 2001*. The Society for Earthquake and Civil Engineering Dynamics (SECED), 15, 1-7, ISSN 0967-859x.
- Bommer J. and Ledbetter S.; 1987: *The San Salvador earthquake of 10th October 1986*. Disasters, 11, 83-95, doi: 10.1111/j.1467-7717.1987.tb00620.x.
- Bommer J. and Rodríguez C.E.; 2002: *Earthquake-induced landslides in Central America*. Eng. Geol., 63, 189-220, doi: 10.1016/S0013-7952(01)00081-3.
- Bommer J., Benito B., Ciudad-Real M., Lemoine A., López-Menjívar M., Madariaga R., Mankelov J., Mendez-Hasbun P., Murphy W., Nieto-Lovo M., Rodríguez-Pineda C. and Rosa H.; 2002: *The El Salvador earthquakes of January and February 2001: context, characteristics and implications for seismic risk*. Soil Dyn. Earthquake Eng., 22, 389-418, doi: 10.1016/S0267-7261(02)00024-6.
- Bossu R., Roussel F., Fallou L., Landès M., Steed R., Mazet-Roux G., Dupont A., Frobert L. and Petersen L.; 2018: *LastQuake: from rapid information to global seismic risk reduction*. Int. J. Disaster Risk Reduction, 28, 32-42, doi: 10.1016/j.ijdrr.2018.02.024, ISSN 2212-4209. <www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420918302097>.
- Brizuela B., Armigliato A. and Tinti S.; 2014: *Assessment of tsunami hazards for the Central American Pacific coast from southern Mexico to northern Peru*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 14, 1889-1903, doi: 10.5194/nhess-14-1889-2014.
- Brown R.D., Ward P.L. and Plafker G.; 1973: *Geologic and seismologic aspects of the Managua, Nicaragua, earthquakes of December 23, 1972*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Professional paper, Report 838, 34 pp., doi: 10.3133/pp838. <pubs.er.usgs.gov/publication/pp838>.
- Bucknam R.C., Plafker G. and Sharp R.V.; 1978: *Fault movement (afterslip) following the Guatemala earthquake of February 4, 1976*. Geol., 6, 170-173, doi: 10.1130/0091-7613(1978)6<170:FMAFTG>2.0.CO;2.
- Bufoern E., Tavera H. and Udías A.; 1997: *Mecanismo focal de los terremotos en el eje volcánico de El Salvador*. Memorias Seminario sobre Evaluación y Mitigación del Riesgo Sísmico en el área Centroamericana. Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", El Salvador.
- Burbach G., Frohlich C., Pennington W.D. and Matumoto T.; 1984: *Seismicity and tectonics of the subducted Cocos Plate*. J. Geophys. Res., 89, 7719-7735, doi: 10.1029/JB089iB09p07719.
- Cáceres D. and Kulhánek O.; 2000: *Seismic hazard of Honduras*. Nat. Hazards, 22, 49-69, doi: 10.1023/A:1008134030510.
- Camacho E.; 1994: *El tsunami del 22 de Abril de 1991 en Bocas del Toro, Panamá*. Universidad de Costa Rica, Revista Geológica América Central, Vol. Especial - Terremoto de Limón, pp. 61-64, doi: 10.15517/rgac.v0i0.13422.
- Canora C., Martínez-Díaz J.J., Villamor P., Berryman K., Álvarez-Gómez J.A., Pullinger C. and Capote R.; 2010: *Geological and seismological analysis of the 13 February 2001 M_w 6.6 El Salvador earthquake: evidence for surface rupture and implications for seismic hazard*. Bull. Seismol. Soc. Am., 100, 2873-2890, doi: 10.1785/0120090377.
- Canora C., Martínez-Díaz J.J., Insua-Arévalo J.M., Álvarez-Gómez J.A., Villamor P., Alonso-Henar J. and Capote-Villar R.; 2014: *The 1719 El Salvador earthquake: an $M > 7.0$ event in the Central American Volcanic Arc?*. Seismol. Res. Lett., 85, 784-793, doi: 10.1785/0220130150.
- Carr M. and Stoiber R.; 1977: *Geologic setting of some destructive earthquakes in Central America*. Geol. Soc. Am. Bull., 88, 151-156, doi: 10.1130/0016-7606(1977)88<151:GSOSDE>2.0.CO;2.
- Cepeda J.M., Benito M.B. and Burgos E.A.; 2004: *Strong-motion characteristics of January and February 2001 earthquakes in El Salvador*. In: Rose W.I., Bommer J.J., López D.L., Carr M.J. and Major J.J. (eds), Natural hazards in El Salvador, Geological Society of America, Special Paper 375, pp. 405-421, doi: 10.1130/0-8137-2375-2.405.
- Comisión Permanente de Contingencias (COPECO); 2009: *Informe ejecutivo de daños ocasionados por el sismo del día 28 de mayo*. Tegucigalpa, Honduras, 3 pp.
- Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED); 2012: *Informe situación terremoto 7.2*. Secretaría Ejecutiva, Ciudad de Guatemala, Guatemala, 20 pp.
- Cowan H., Prentice C., Pantosti D., Martini P.D., Strauch W. and Participants W.; 2002: *Late Holocene earthquakes on the Aeropuerto fault, Managua, Nicaragua*. Bull. Seismol. Soc. Am., 92, 1694-1707, doi: 10.1785/0120010100.
- Cruz G. and Zuniga M.A.; 1994: *Resumen sobre los terremotos históricos de Honduras y resultados preliminares sobre la red sísmológica de la UNAH*. In: Rabinowitz N., Earthquake monitoring and seismic hazard assessment in Central America project - Final report, pp. 72-99.
- D'Amico V. and Albarello D.; 2008: *SASHA: a computer program to assess seismic hazard from intensity data*. Seismol. Res. Lett., 79, 663-671, doi: 10.1785/gssrl.79.5.663.
- Decanini L.D., Gavarini C. and Pedregal J.M.; 1988: *Notas y observaciones sobre el terremoto de El Salvador del 10 octubre 1986*. CNR, Roma, Italy, Internal Report, 106 pp.

- Demets C.; 2001: *A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: implications for slip along the Central America volcanic arc*. Geophys. Res. Lett., 28, 4043-4046, doi: 10.1029/2001GL013518.
- Dengo G., Fiedler G., Knudsen C.F., Lomnitz C. and Rosenblueth E.; 1965: *El Salvador: misión de reconocimiento sísmológico, informe preliminar*. UNESCO, Paris, France, WS/0665.131 AVS, 26 pp.
- Dewey J.W. and Algermissen S.T.; 1974: *Seismicity of the Middle America Arch Trench system near Managua, Nicaragua*. Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1033-1048.
- Dewey J., Reagor B., Dengler L. and Moley K.; 1995: *Intensity and isoseismal maps for the Northridge, California, earthquake of January 17, 1994*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Open File Report 95-92, 35 pp., doi: 10.3133/ofr9592.
- Dewey J.W., White R.A. and Hernández D.A.; 2004: *Seismicity and tectonics of El Salvador*. In: Rose W.I., Bommer J.J., López D.L., Carr M.J. and Major J.J. (eds), *Natural Hazards in El Salvador*, Geological Society of America, Special Paper 375, pp. 363-378, doi: 10.1130/0-8137-2375-2.363.
- Diario de Centro América; 1918: *Diario de Centro América, miércoles 2 de enero de 1918*. La Unión, Guatemala City, Año XXXVIII, 10, 552.
- Diario La Hora; 2017: *Terremotos en Guatemala*. <lahora.gt/terremotos-en-guatemala/>.
- Duke M.C.; 1973: *Impact of Managua on earthquake engineering*. In: Proc., Earthquake Engineering Research Institute Conference, "Managua, Nicaragua, Earthquake of December 23, 1972", San Francisco, CA, USA, Vol. I, pp. 1-7. <play.google.com/books/reader?id=Mj9RAAAAMAAJ&pg=GBS.PP5>.
- Dunlop R.G.; 1847: *Travels in Central America*. Longman, Brown, Green, and Longmans, London, UK, 358 pp. <books.google.hk/books?id=ET7HAQAACAAJ>.
- Durham H.W.; 1931: *Managua earthquake of 1931*. Engineering News Record, Apr. 22, pp. 696-700.
- Dziewonski A.M., Chou T.A. and Woodhouse J.H.; 1981: *Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity*. J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, doi: 10.1029/JB086iB04p02825.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI); 2001: *Preliminary observations on the El Salvador earthquakes of January 13 and February 13, 2001*. Learning from Earthquakes, EERI, Special Earthquake Report, 12 pp.
- Earthquake Engineering Research Institute (EERI); 2009: *The M 7.3 Honduras earthquake of May 28, 2009*. Learning from Earthquakes, EERI, Special Earthquake Report, 4 pp.
- Eisen G.; 1903: *The earthquake and volcanic eruption in Guatemala in 1902*. Bull. Am. Geog. Soc., 35, 325-352.
- Engdahl E.R. and Villaseñor A.; 2002: *Global seismicity: 1900-1999*. In: Lee W.H.K., Kanamori H., Jennings P.C. and Kisslinger C. (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, Part A*, Academic Press, San Diego, CA, USA, pp. 665-690.
- ERN-CAPRA; 2009: *Amenazas y Riesgos Naturales de Nicaragua*. <www.ecapra.org>.
- Escobar Figueroa J.J. (ed); 2008: *Evaluación de la amenaza sísmica en Honduras*. Proyecto RESIS II, 59 pp.
- Espinosa A.F. (ed); 1976: *The Guatemalan earthquake of February 4, 1976, a preliminary report*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Professional Paper 1002, 90 pp., doi: 10.3133/pp1002.
- Espinosa A.F., Husid R. and Quesada A.; 1976: *Intensity distribution and source parameters from field observations*. In: Espinosa A.F. (ed), U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Professional Paper 1002, pp. 52-66. <pubs.er.usgs.gov/publication/pp1002>.
- Esposito E.; 2019: *Macroseismic evaluation of the damage produced by the 1917-18 earthquakes in Guatemala City, by photos, before and after the seismic sequence*. Project RIESCA, Napoli, Italy, Internal Report, 105 pp.
- Esposito E.; 2020: *The 1992 Sept 2nd offshore Nicaragua earthquake: study for the assessment of intensity using the tsunami intensity macroseismic scale*. Project RIESCA, Napoli, Italy, Internal Report, 5 pp.
- Feldman L.; 1988: *Guatemalan temblores y terremotos, a catalogue*. Academia de Geografía e Historia de Guatemala, Guatemala City, Guatemala, 85 pp.
- Fernández M.; 2002: *Daños, efectos Y amenaza de tsunamis en América Central*. Revista Geológica de América Central, 26, 71-83, doi: 10.15517/RGAC.VOI26.8532.
- Fernández M. and Ortiz M.; 2012: *Earthquake triggered tsunamis*. In: Bundschuh J. and Alvarado G. (eds), *Central America: geology, resources and hazards*, 1 ed., (two volume set), CRC Press, London, UK, pp. 1257-1266, doi: 10.1201/9780203947043.
- Fernández M., Peraldo-Huertas G., Flores-Fallas R. and Rojas-Quesada W.; 1993: *Tsunamis en Centroamérica*. Revista Tecnología en Marcha, 12, 17-30.
- Fernández M., Molina E., Havskov J. and Atakan K.; 2000: *Tsunamis and tsunami hazards in Central America*. Nat. Hazards, 22, 91-116, doi: 10.1023/A:1008102600622.
- Fernández M., Ortiz-Figueroa M. and Mora-Amador R.; 2004: *Tsunami hazards in El Salvador*. Geol. Soc. of Am., Special Paper 375, pp. 337-446, doi: 10.1130/0-8137-2375-2.435.

- Fernández M., Strauch W., Molina E., Toral J. and Marroquin G.; 2012: *Seismic monitoring*. In: Bundschuh J. and Alvarado G. (eds), *Central America: geology, resources and hazards*, 1 ed., (two volume set), CRC Press, London, UK, pp. 1119-1128, doi: 10.1201/9780203947043.
- Ferrari G. and Guidoboni E.; 2000: *Seismic scenarios and assessment of intensity: some criteria for the use of the MCS scale*. *Ann. Geof.*, 43, 707-720.
- Franco A., Lasserre C., Lyon-Caen H., Kostoglodov V., Molina E., Guzman-Speziale M., Monterosso D., Robles V., Figueroa C., Amaya W., Barrier E., Chiquin L., Moran S., Flores O., Romero J., Santiago J.A., Manea M. and Manea V.C.; 2012: *Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador*. *Geophys. J. Int.*, 189, 1223-1236, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05390.x.
- Freeman J.R.; 1932: *Earthquake damage and earthquake insurance*. McGraw-Hill Book Co., New York, NY, USA, 917 pp.
- Freundt A., Hartmann A., Kutterolf S. and Strauch W.; 2010: *Volcaniclastic stratigraphy of the Tiscapa maar crater walls (Managua, Nicaragua): implications for volcanic and seismic hazards and Holocene climate changes*. *Int. J. Earth Sci.*, 99, 1453-1470, doi: 10.1007/s00531-009-0469-6. <search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=52898016& site=ehost-live>.
- García-Florez I. and Tsige M.; 2013: *Geological and structural control of earthquake-induced landslides in El Salvador*. Margottini C., Canuti and Sassa K. (eds), *Landslide Science and Practice*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, Germany, Vol. 5, pp. 287-293, doi: 10.1007/978-3-642-31427-8_37.
- Garduño-Monroy V.H.; 2015: *A proposed scale of intensities of historical events, based on the symbolism of the codex Telleriano Remensis, Mexico*. In: Proc., 6th INIQUA - International Workshop on Active Tectonics Paleoseismology and Archaeoseismology, Pescina (AQ), Italy, ARC_06, <www.isprambiente.gov.it/files/fucino-2015/FUCINO2015PROGRAMME.pdf>.
- Garduño-Monroy V.H.; 2016: *Una propuesta de escala de intensidad sísmica obtenida del código náhuatl telleriano remensis*. *Arqueología Iberoamericana*, 31, 9-19, doi: 10.5281/zenodo.1318345.
- Garofalo D. and Wobber F.J.; 1972: *The Nicaragua earthquake aerial photography to disaster assessment and damage*. Photographic Applications in Science, Technology and Medicine, pp. 114-118.
- Gasperini P., Bernardini F., Valensise G. and Boschi E.; 1999: *Defining seismogenic sources from historical earthquake felt reports*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 94-110.
- Gasperini P., Vannucci G., Tripone D. and Boschi E.; 2010: *The location and sizing of historical earthquakes using the attenuation of macroseismic intensity with distance*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2035-2066.
- Globe and Mail; 1992: *Tidal waves hit Nicaragua in aftermath of earthquake more than 200 dead or missing as Pacific coast is ravaged*. Globe and Mail, Toronto, Canada, 3 Sept.
- Graham S.E., DeMets C., DeShon H.R., Rogers R., Maradiaga M.R., Strauch W., Wiese K. and Hernandez D.; 2012: *GPS and seismic constraints on the M = 7.3 2009 Swan Islands earthquake: implications for stress changes along the Motagua fault and other nearby faults*. *Geophys. J. Int.*, 190, 1625-1639, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05560.x.
- Grases J.; 1974: *Sismicidad de la región centroamericana asociada a la cadena volcánica del Cuaternario*. UCV-OEA, Vol. II, 253 pp.
- Griffin J., Nguyen N., Cummins P. and Cipta A.; 2018: *Historical earthquakes of the eastern Sunda arc: source mechanisms and intensity-based testing of Indonesia's national seismic hazard assessment*. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 109, 43-65, doi: 10.1785/0120180085.
- Grimaz S. and Malisan P.; 2017: *How could cumulative damage affect the macroseismic assessment?*. *Bull. Earthquake Eng.*, 15, 2465-2481, doi: 10.1007/s10518-016-0016-3.
- Grünthal G. (ed); 1998: *European Macroseismic Scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 7, 99 pp.
- Guevara L.T.; 2002a: *Efectos de los sismos de 2001 en el patrimonio cultural en El Salvador*. In: Proc., *Memorias de las III Jornadas Latinoamericanas de Arquitectura y Urbanismo*, Institut CATALA de Cooperació Iberoamericana (ICCI), Barcelona, Spain, pp. 105-120.
- Guevara L.T.; 2002b: *Terremotos en El Salvador 2001*. Crónicas de Desastres, Pan American Health Organization (PAHO)/Organización Panamericana de la Salud (OPS) - WHO - OMS, Washington, D.C., USA, n. 11, 224 pp. <www.paho.org/spanish/ped/ELS_2001.htm>.
- Guzmán-Speziale M.; 2001: *Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary*. *Tectonophysics*, 337, 39-51, doi: 10.1016/S0040-1951(01)00110-X.
- Guzmán-Speziale, M.; 2010: *Beyond the Motagua and Polochic faults: active strike-slip faulting along the western North America-Caribbean plate boundary zone*. *Tectonophysics*, 496, 17-27, doi: 10.1016/j.tecto.2010.10.002.
- Hardy S.; 2009: *Modificar la definición del riesgo para que la investigación sea verdaderamente aplicable. Demostración a partir del caso de Managua*. *Trace*, 56, 57-75. <www.cemca.org.mx>.

- Harlow D.H. and White R.A.; 1985: *Shallow earthquakes along the volcanic chain in Central America: evidence for oblique subduction*. Earthquake notes, 55, 28 pp.
- Harlow D.H., White R.A., Rymer M.J. and Alvarez Gomez S.; 1993: *The San Salvador earthquake of 10 October 1986 and its historical context*. Bull. Seismol. Soc. Am., 83, 1143-1154.
- Harp E., Vallance J. and Rodriguez W.; 2001: *Damaging landslides in Central America - Earthquake of January 13*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Field report.
- Hayes G.P., Myers E.K., Dewey J.W., Briggs R.W., Earle P.S., Benz H.M., Smoczyk G.M., Flamme H.E., Barnhart W.D., Gold R.D. and Furlong K.P.; 2016: *Tectonic summaries of magnitude 7 and greater earthquakes from 2000 to 2015*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Open-File Report 2016-1192, 148 pp., doi: 10.3133/ofr20161192.
- Hernández-Moreno C.; 2011: *Análisis morfotectónico de las deformaciones Cuaternarias de la Cordillera de Jucuarán-Intipuca (El Salvador)*. Tesis para optar al grado de Máster en Geología Ambiental y Recursos Geológicos, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 54 pp.
- Hough S.E.; 2014: *Earthquake intensity distributions: a new view*. Bull. Earthquake Eng., 12, 135-155, doi: 10.1007/s10518-013-9573-x.
- Ide S., Imamura F., Yoshida Y. and Abe K.; 1993: *Source characteristics of the Nicaraguan tsunami earthquake of September 2, 1992*. Geophys. Res. Lett., 20, 863-866, doi: 10.1029/93GL00683.
- Ihmlé P.F.; 1996: *Frequency-dependent relocation of the 1992 Nicaragua slow earthquake: an empirical Green's function approach*. Geophys. J. Int., 127, 75-85, doi: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb01536.x.
- Imamura F., Shuto N., Ide S., Yoshida Y. and Abe K.; 1993: *Estimate of the tsunami source of the 1992 Nicaraguan earthquake from tsunami data*. Geophys. Res. Lett., 20, 1515-1518, doi: 10.1029/93GL01396.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH); 2014: *Informe técnico final del sismo de M_w 7.4 del 7 de noviembre del año 2012*. Ciudad de Guatemala, Guatemala, 13 pp.
- Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER); 2020: *Boletín mensual sismos y volcanes de Nicaragua*. Managua, Nicaragua. <webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2020/03/boletin-0320.pdf>.
- International Seismological Centre (ISC); 2019: *ISC-GEM Earthquake Catalogue V.6.0*. Thatcham, UK, doi: 10.31905/d808b825. <www.isc.ac.uk/iscgem/overview.php>.
- International Seismological Centre (ISC); 2021: *On-line bulletin*. Thatcham, UK, doi: 10.31905/D808B830. <www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/>.
- Japan Society of Civil Engineers; 2001: *The January 13, 2001 off the coast of El Salvador earthquake*. Tokyo, Japan, 18 pp.
- Jibson R.W. and Crone A.J.; 2001: *Observations and recommendations regarding landslide hazards related to the January 13, 2001 M-7.6 El Salvador earthquake*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Open-File Report, on-line edition, 01-141, 19 pp. <pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0141>.
- Jordan J.K. and Martinez M.; 1980: *Seismic history of El Salvador*. Centro de investigaciones Geotécnicas, Departamento de Sismología, San Salvador.
- Kanamori H. and Kikuchi M.; 1993: *The 1992 Nicaragua earthquake: a slow tsunami earthquake associated with subducted sediments*. Nature, 361, 714-716.
- Kânoğlu U., Tanioka Y., Okal E.A., Baptista M.A. and Rabinovich A.B.; 2020: *Introduction to "Twenty five years of modern tsunami science following the 1992 Nicaragua and Flores Island Tsunamis, Volume II"*. Pure Appl. Geophys., 177, 1183-1191, doi: 10.1007/s00024-020-02451-x.
- Kelleher J., Sykes L.R. and Oliver J.; 1973: *Possible criteria for predicting earthquakes location and their application to Major Plate boundaries of the Pacific and Caribbean*. J. Geophys. Res., 78, 2547-2585, doi: 10.1029/JB078i014p02547.
- Kikuchi M. and Kanamori H.; 1995: *Source characteristics of the 1992 Nicaragua tsunami earthquake inferred from teleseismic body waves*. Pure Appl. Geophys., 144, 441-453, doi: 10.1007/978-3-0348-7279-9_5.
- Kiremidjian A.S., Shah H.C. and Lubetkin L.; 1977: *Seismic hazard mapping for Guatemala*. Department of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, USA, Report n. 26, 211 pp.
- Kiremidjian A.S., Sutch P. and Shah H.C.; 1979: *Seismic hazard analysis of Honduras*. The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA, USA, Report n. 38, 301 pp.
- Konagai K., Johansson J., Mayorca P., Yamamoto T., Miyajima M., Uzuoka R., Pulido N.E., Duran F.C., Sassa K. and Fukuoka H.; 2002: *Las Colinas landslide caused by the January 13, 2001 off the coast of El Salvador earthquake*. J. Jpn. Assoc. Earthquake Eng., 2, 1-15.
- La Femina P.C., Dixon T.H. and Strauch W.; 2002: *Bookshelf faulting in Nicaragua*. Geol. Soc. Am., 30, 751-754, doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0751:BFIN>2.0.CO;2.
- La Prensa; 1992: *02/10/1992. Ola asesina sorprendió en la noche*. <www.laprensa.com.ni/2017/09/01/nacionales/2288739-maremoto-nicaragua-1992>.

- Lander J.F., Whiteside L.S. and Lockridge P.A.; 2003: *Two decades of global tsunamis 1982-2002*. Sci. Tsunami Hazards, 21, 3-88.
- Langer C.J. and Bollinger G.A.; 1979: *Secondary faulting near the terminus of a seismogenic strike-slip fault: aftershocks of the 1976 Guatemala earthquake*. Bull. Seismol. Soc. Am., 69, 427-444.
- Lardé J.; 1916: *El terremoto del 6 de Septiembre de 1915 y los demás terremotos de El Salvador*. Imprenta nacional, Edición de la Revista de la Enseñanza, San Salvador, El Salvador, 76 pp.
- Lardé J.; 1952: *El terremoto de 1878*. An. Museo Natl. "David J. Guzmán", San Salvador Cuzcatlán, El Salvador, III, 10, 93-94.
- Lardé J.; 1953: *El volcán de Izalco*. An. Museo Natl. "David J. Guzmán", San Salvador Cuzcatlán, El Salvador, IV, 13, 9-74.
- Lardé J.; 1960: *Obras completas*. Publ. Ministerio de Cultura, San Salvador, El Salvador, 597 pp.
- Larios D.; 1979: *Seismicity and earthquake focal mechanisms of El Salvador*. MS. Thesis in Physics Sciences, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 92 pp.
- Larsson T. and Mattson C.; 1987: *Nicaragua earthquake records 1975-1983. Seismic hazard analysis in Nicaragua*. Institute for Jord-Och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sweden, pp. 127-145.
- Ledbetter S.R. and Bommer J.J.; 1987: *The San Salvador earthquake of 10 October 1986. A field report by EEFIT*. Rendel Palmer and Tritton, London, UK, 99 pp.
- Leeds D.J.; 1974: *Catalogue of Nicaraguan earthquakes*. Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1135-1158.
- Leeds D.J. and Moore D.; 1973: *Destructive earthquakes of Nicaragua*. In: Proc., Earthquake Engineering Research Institute Conference, "Managua, Nicaragua, earthquake of December 23, 1972", San Francisco, CA, USA, Vol. I, pp. 26-51. <play.google.com/books/reader?id=Mj9RAAAAMAAJ&pg=GBS.PP5>.
- Levin B.S.; 1940: *The Salvador earthquake of December, 1936*. Bull. Seismol. Soc. Am., 27, 377-407.
- Lindholm C., Strauch W. and Fernández M.; 2017: *Tsunami hazard in Central America; history and future*. In: Scourse E.M., Chapman N.A., Tappin D.R. and Wallis S.R. (eds), *Tsunamis: Geology, Hazards and Risks*. Geological Society, London, UK, Special Publications n. 456, pp. 91-104, doi: 10.1144/SP456.2.
- Locati M. and Cassera A.; 2010: *MIDOP: Macroseismic Intensity Data Online Publisher*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma, Italy, Rapporti Tecnici n. 123, 92 pp.
- Locati M., Rovida A., Albini P. and Stucchi M.; 2014: *The AHEAD portal: a gateway to European historical earthquake data*. Seismol. Res. Lett., 85, 727-734, doi: 10.1785/0220130113.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. and Antonucci A.; 2019: *Database macrosismico Italiano (DBMI15), versione 2.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Roma, Italy, doi: 10.13127/DBMI/DBMI15.2.
- Lomnitz C. and Schulz R.; 1966: *The San Salvador earthquake of May 3, 1965*. Bull. Seismol. Soc. Am., 56, 561-575.
- Luna R.; 2010: *Reconnaissance report of the May 28, 2009 Honduras earthquake, M 7.3*. In: Proc., 5th International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, CA, USA, Paper n. EQ6, 13 pp.
- Lund L.V. and Sepponen C.; 2002: *Lifeline performance of El Salvador earthquakes of January 13 and February 13, 2001*. Council on Disaster Reduction and Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering (TCLEE), American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, Monograph n. 24, 182 pp.
- Mak S. and Schorlemmer D.; 2016: *What makes people respond to "Did you feel it?"?* Seismol. Res. Lett., 87, 119-131, doi: 10.1785/0220150056.
- Martínez-Díaz J.J., Álvarez-Gómez J.A., Benito B. and Hernández D.; 2004: *Triggering of destructive earthquakes in El Salvador*. Geol., 32, 65-68, doi: 10.1130/G20089.1.
- Medvedev S., Sponheuer W. and Karník V.; 1964: *Neue seismische skala intensity scale of earthquakes, 7. Tagung der Europäischen seismologischen kommission vom 24.9. bis 30.9.1962*. In: Jena, Veröff. Institut für Bodendynamik und Erdbebenforschung in Jena, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Vol. 77, pp. 69-76.
- Meyer-Abich H.; 1952: *Terremoto de Jucuapa en El Salvador (América Central), 6-7 de Mayo de 1951*. Comunicaciones, Instituto Tropical de Investigaciones Científicas, Universidad de El Salvador, 1, 1-24.
- Michetti A.M., Esposito E., Guerrieri L., Porfido S., Serva L., Tatevossian R., Vittori E., Audemard F., Azuma T., Clague J., Comerci V., Gürpınar A., McCalpin J., Mohammadioun B., Mörner N.-A., Ota Y. and Roghazin E.; 2007: *La scala di intensità ESI 2007*. Memorie descrittive della carta geologica d'Italia, APAT, Roma, Italy, LXXIV, 53 pp.
- Milenio; 2013: *Noticias 03/01/13*. <archive.vn/20130103204531>, <www.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/a9662747c48c8d3b6218fe1afc9a8cc1#selection-240.0-245.26>.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN); 2017: *Informe nacional del estado de los riesgos y vulnerabilidades*. Online Report, 164 pp. <rcc.marn.gov.sv/xmlui/handle/123456789/9>.

- Molina E.; 1997: *Tsunami catalogue for Central América 1539-1996*. Institute of Solid Earth Physics, University Bergen, Norway, Technical Report n. II 1-04, 87 pp.
- Molnar P. and Sykes L.R.; 1969: *Tectonics of the Caribbean and Middle America region from local mechanism and seismicity*. Bull. Geol. Soc. Am., 80, 1639-1684.
- Monachesi G. and Stucchi M. (eds); 1997: *DOM4.1, un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno. An intensity database of damaging earthquakes in the Italian area*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano, Italy, <emidius.mi.ingv.it/DOM/>.
- Montessus de Ballore F.; 1888: *Tremblements de Terre et eruptions volcaniques au Centre-Amerique*. Societe de sciences naturelles de Saone-et-Loire, Dijon, France, 293 pp.
- Muir-Wood R.; 1993: *From global seismotectonics to global seismic hazard*. Ann. Geof., 36, 153-168.
- Murty T.S., Baptista A.M. and Priest G.R.; 1995: *Post-tsunami survey (Nov. 2-7, 1992) of runoff and inundation in the coast of Nicaragua*. Report to Intergovernmental Oceanographic Commission (of UNESCO), Paris, France, 16 pp., 3 app.
- Musson R.M.W.; 2000: *Intensity-based seismic risk assessment*. Soil Dyn. Earthquake Eng., 20, 353-360, doi: 10.1016/S0267-7261(00)00083-X.
- Musson R.M.W. and Ceci  I.; 2012: *Intensity and intensity scales*. In: Bormann P. (ed), *New Annual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, Germany, Chapter 12, pp. 1-41, doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch12.
- Musson R.M.W., Grünthal G. and Stucchi M.; 2010: *The comparison of macroseismic intensity scales*. J. Seismol., 14, 413-428, doi: 10.1007/s10950-009-9172-0.
- Naciones Unidas - Consejo Económico y Social - Comisión Económica Para América Latina (CEPAL); 1976: *Danos causados por el terremoto de Guatemala y sus repercusiones sobre el desarrollo económico y social del país*. CEPAL/MEX/76/Guat.1, 76-3-407-300, 52 pp.
- Pagani M., García-Pelaez J., Gee R., Johnson K., Poggi V., Styron R., Weatherill G., Simionato M., Vigan  D., Danciu L. and Monelli D.; 2018: *Global Earthquake Model (GEM) Global seismic hazard map (version 2018.1)*. doi: 10.13117/GEM-GLOBAL-SEISMIC-HAZARD-MAP-2018.1.
- Papadopoulos G. and Imamura F.; 2001: *A proposal for a new tsunami intensity scale*. In: Proc., International Tsunami Symposium (ITS) 2001, Seattle, WA, USA, n. 5-1, pp. 569-577.
- Peraldo G. and Montero W.; 1996: *La secuencia sísmica de Agosto a Octubre de 1717 en Guatemala. Efectos y respuestas sociales*. In: Virginia García Acosta (coord.), *Historia y Desastres en América Latina, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, Vol. 1*, pp. 227-250.
- Peraldo G. and Montero W.; 1999: *Sismología histórica de América Central*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México, 346 pp.
- Perrey A.; 1847: *Note sur les tremblements de terre en Alg rie et dans l’Afrique Septentrionale*. Mémoire de l’Academie des Sciences, Arts et Belles-Lettres de Dijon, 323 pp.
- Piatanesi A., Tinti S. and Gavagni I.; 1996: *The slip distribution of the 1992 Nicaragua earthquake from tsunami run  up data*. Geophys. Res. Lett., 23, 37-49, doi: 10.1029/95GL03606.
- Pinillos H.; 2018: *Estudio de la actividad sísmica tipo enjambre registrada durante el período 1979 al 2013 en el departamento de Santa Rosa*. Tesis pregrado, Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de San Carlos de Guatemala, La Nueva Guatemala de la Asunción, Guatemala, 183 pp.
- Plafker G.; 1976: *Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976*. Sci., 193, 4259, 1201-1208, doi: 10.1126/science.193.4259.1201.
- Plafker G. and Brown R.D.; 1973: *Surface geological effects of the Managua earthquake of December 23, 1972*. In: Proc., Earthquake Engineering Research Institute Conference, “Managua, Nicaragua, Earthquake of December 23, 1972”, San Francisco, CA, USA, Vol. I, pp. 115-142. <play.google.com/books/reader?id=Mj9RAAAAMAAJ&pg=GBS.PP5>.
- Prensa Libre; 2017: *1917-18: Guatemala devastada por una serie de fuertes temblores*. Hemeroteca PL, Guatemala. <www.prensalibre.com/hemeroteca/terremoto-en-guatemala-1917-18/>.
- Preuss J.; 1994: *Field report: investigation of September 2, 1992 Nicaragua tsunami*. Florida Mental Health Institute (FMHI) Publications, 21 pp. <scholarcommons.usf.edu/fmhi_pub/21>.
- Protti M., Guendel F. and McNally K.; 1995: *Correlation between the age of the subducting Coco’s plate and the geometry of the Wadati-Benioff zone under Nicaragua and Costa Rica*. In: Mann P. (ed), *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in southern Central America*, Geological Society of America, Boulder, CO, USA, Special Paper, pp. 309-326.
- Quintero C.Y. and Pérez N.J.; 2001: *Misiones de asistencia técnica para la evaluación de los efectos de los terremotos de enero y febrero de 2001 en El Salvador. Informe preliminar*. Southwestern Seismological Observatory - The Coordinating Centre for the Prevention of Natural Disasters in Central America - The Latin American Network of Social Studies in Disaster Prevention (OSSO-CEDEPRENAC-LA RED), Santiago de Cali, Columbia, 25 pp.

- Recinos A.; 1922: *La Ciudad de Guatemala, crónica histórica desde su fundación hasta los terremotos de 1917-1918*. Guatemala.
- Richter C.F.; 1958: *Elementary seismology*. W.H. Freeman, San Francisco, CA, USA, 768 pp.
- Rockstroh E.; 1902: *Earthquake in Guatemala*. Nature, 66, 150, doi: 10.1038/066150a0.
- Rodriguez C.E., Torres A.T. and Leon E.A.; 2006: *Landslide hazard in El Salvador*. In: Proc., Geohazards, Engineering Conferences International, Lillehammer, Norway, 9 pp. <www.dc.engcon_ntl.org/geohazards/6>.
- Rodriguez Garcia F.E.; 2019: *Press selection from Honduras on Guatemala earthquake 1976-02-04*. Project RIESCA, Internal Report, Tegucigalpa, Honduras, 13 pp.
- Rogers R.D. and Mann P.; 2007: *Transtensional deformation of the western Caribbean–North America plate boundary zone*. Geological Society of America Special Papers, Geological Society of America, 428, 37-64, [https://doi.org/10.1130/2007.2428\(03\)](https://doi.org/10.1130/2007.2428(03)).
- Rojas W., Bungum H. and Lindholm C.; 1993: *Historical and recent earthquakes in Central America*. Rev. Geol. Am. Central, 16, 5-22.
- Rose W.I., Bommer J.J., Lopez D.L., Carr M.J. and Major J.J.; 2004: *Natural hazards in El Salvador*. Geol. Soc. Am., Special Paper 375, 502 pp., doi: 10.1130/SPE375.
- Rosenblueth E. and Prince J.; 1965: *El temblor de San Salvador, 3 de mayo 1965: ingeniería sísmica*. Ingeniería, 36, 31-58.
- Salazar W., Madrid K., Monero G. and Saracay P.; 1998: *Una reseña histórica sobre los terremotos destructores en El Salvador en el siglo XX*. Desde la Ciencia, 1, 25-34.
- Satake K.; 1994: *Mechanism of the 1992 Nicaragua tsunami earthquake*. Geophys. Res. Lett., 21, 2519-2522, doi: 10.1029/94GL02338.
- Satake K.; 1995: *Linear and nonlinear computations of the 1992 Nicaragua earthquake tsunami*. Pure Appl. Geophys., 144, 455-470.
- Satake K., Bourgeois J., Abe K., Abe K., Tsuji Y., Imamura F., Lio Y., Katao H., Noguera E. and Estrada F.; 1993: *Tsunami field survey of the 1992 Nicaragua earthquake*. Eos, 74, 145-157, doi: 10.1029/93EO00271.
- Saville M.H.; 1919: *The Guatemala earthquake of December, 1917, and January, 1918*. Geograph. Rev., 5, 459-469. <www.jstor.org/stable/207805>.
- Secretaría de Planificación y Programación - Segeplan; 2014: *Evaluación del impacto del terremoto del 7 de noviembre de 2012 en Guatemala*. República de Guatemala, GT TF, Marco para la Recuperación y Evaluación de Daños por el Terremoto de 7.2, Reporte n. AUS4306, Doc. 1, 75 pp.
- Segura F.; 2018: *Summary of seismicity in Nicaragua with emphasis on the Nicaraguan depression*. Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), Managua, Nicaragua, 256 pp.
- Seismological Society of America; 1915: *Seismological notes*. Bull. Seismol. Soc. Am., 5, 155-162.
- Shulman D. and Mooney W.D.; 2009: *Rupture directivity and local site effects: the M 7.3 Honduras earthquake of May 28, 2009*. In: Abstract, Fall Meeting 2009, American Geophysical Union San Francisco, CA, USA, n. S43A-1978, pp. 62-63.
- Sieberg A.; 1930: *Scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) di intensità del terremoto*. Geologie der Erdbeben, Handbuch der Geophysik, 2, 550-555.
- Sieberg A.; 1932: *Die erdbeben*. In: Gutenberg B. (ed), Handbuch der Geophysik, Vol. IV (Erdbeben), Sect. V (Gebrüder Bornträger), Berlin, Germany, pp. 527-686.
- Silva P.G., Michetti A.M. and Guerrieri L.; 2015: *Intensity scale ESI 2007 for assessing earthquake intensities*. In: Beer M., Kougioumtzoglou I.A., Patelli E. and Au S-K (eds), Encyclopedia of Earthquake Engineering, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 20 pp., doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_31-1.
- Soloviev S.L. and Go C.N.; 1984: *A catalogue of tsunamis on the eastern shore of the Pacific Ocean (1513-1968)*. Nauka Publishing House, Moscow, 204 pp.
- Spinden H.; 1919: *Shattered capitals of Central America*. Nat. Geogr. Magaz., XXXV, n. 3, pp. 185-212.
- Staller A., Martínez-Díaz J.J., Benito B., Alonso-Henar J., Hernández D., Hernández-Rey R. and Díaz M.; 2016: *Present-day crustal deformation along the El Salvador fault zone from ZFESNet GPS network*. Tectonophys., 670, 66-81, doi: 10.1016/j.tecto.2015.12.017.
- Storchak D.A., Giacomo D.D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P. and Villaseñor A.; 2015: *The ISC-GEM Global instrumental earthquake catalogue (1900-2009): introduction*. Phys. Earth Planet. Inter., 239, 48-63, doi: 10.1016/j.pepi.2014.06.009, ISSN 0031-9201.
- Stuart E.; 1918: *Guatemala earthquakes destroyed all masonry buildings*. American Red Cross Guatemala Relief Commission, Cambridge, Massachusetts, USA.

- Stucchi M., Rovida A., Gómez A., Alexandre P., Camelbeek T., Demircioglu M., Gasperini P., Kouskouna V., Musson R., Radulian M., Sesetyan K., Vilanova S., Baumont D., Bungum H., Fäh D., Lenhardt W., Makropoulos K., Solares J.M., Scotti O., Živčić M., Albini P., Batllo J., Papaioannou C., Tatevossian R., Locati M., Meletti C., Viganò C. and Giardini D.; 2013: *The SHARE European Earthquake Catalogue (SHEEC) 1000-1899*. J. Seismol., 17, 523-544, doi: 10.1007/s10950-012-9335-2.
- Styron R., García-Pelaez J. and Pagani M.; 2020: *CCAF-DB: the Caribbean and Central American Active Fault DataBase*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 831-857, doi: 10.5194/nhess-2019-46.
- Sultan D.I.; 1931: *The Managua earthquake*. Military Engineer, 23, 354-361.
- Sutch P.; 1981: *Estimated intensities and probable tectonic source of historic (pre-1898) Honduran earthquakes*. Bull. Seismol. Soc. Am., 71, 865-881.
- Tanioka Y., Arguello Miranda G.J., Gusman A.R. and Fujii Y.; 2017: *Method to determine appropriate source models of large earthquakes including tsunami earthquakes for tsunami early warning in Central America*. Pure Appl. Geophys., 174, 3237-3248, doi: 10.1007/s00024-017-1630-y.
- Tanioka Y., Cabrera A.G., Arguello G.J. and Yamanaka Y.; 2020: *Tsunami hazard in the Caribbean coast of Honduras due to large earthquakes occurred along the Cayman Trough at the northwest boundary of Caribbean plate*. Coastal Eng. J., 62, 405-412, doi: 10.1080/21664250.2020.1744061.
- Tanner J.G. and Shepherd J.B.; 1997: *Seismic hazard in Latin America and the Caribbean*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Vol. 1, 144 pp.
- Taracena Flores A.; 1970: *Los terremotos de Guatemala*. Álbum Gráfico conmemorativo del Cincuentenario (1917/1918-1968), Tipografía Nacional, Guatemala, Impreso n. 4971, 244 pp.
- Tenorio V., Morales A. and Strauch W.; 2009: *Apoyo a Honduras en la Emergencia por el terremoto destructivo de magnitud 7.3 ocurrido el 28 de mayo, 2009*. <webserver2.ineter.gob.ni/boletin/2009/06/encuesta-macro-hon0906.htm>.
- Tosi P., Sbarra P., De Rubeis V. and Ferrari C.; 2015: *Macroseismic intensity assessment method for web-questionnaires*. Seismol. Res. Lett., 86, 985-990, doi: 10.1785/0220140229.
- United Nations Department of Humanitarian Affairs (UNDHA); 1992: *Nicaragua earthquake/tsunami*. DHA-UNDRO, UNDRO 92/0621, 92/0623, 92/0628, 92/0635, 92/0641, 92/0648, 92/0681, Situation Reports n. 1-7, <reliefweb.int/report/nicaragua/nicaragua-earthquakesunامي-sep-1992-un-dha-situation-reports-1-7>.
- USGS; 1972: *M 6.3 Nicaragua 1972-12-23 06:29:44 (UTC)*. ShakeMap Atlas. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/iscgem766571/executive>.
- USGS; 1976: *M 7.5 - Guatemala 1976-02-04 09:01:43 (UTC)*. Shakemap Atlas. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000ex3/shakemap/intensity>.
- USGS; 2007: *M 5.3 - Honduras 2007-09-15 17:59:41 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000fnc9/dyfi/responses>.
- USGS; 2009a: *M 7.3 - offshore Honduras 2009-05-28 08:24:46 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxxj/dyfi/responses>.
- USGS; 2009b: *M 5.0 - offshore Honduras 2009-06-06 04:37:37 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxx0/dyfi/responses>.
- USGS; 2009c: *M 5.0 - offshore Honduras 2009-06-30 16:22:33 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxx0/dyfi/responses>.
- USGS; 2010a: *M 5.1 - Guatemala 2010-01-11 23:30:44 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000h5z8/dyfi/responses>.
- USGS; 2010b: *M 4.8 - Honduras 2010-02-11 17:43:02 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000h76g/dyfi/responses>.
- USGS; 2012a: *M 4.4 - Honduras 2012-02-06 10:30:26 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jekb/dyfi/responses>.
- USGS; 2012b: *M 4.5 - Honduras 2012-02-07 16:16:42 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jen7/dyfi/responses>.
- USGS; 2012c: *M 4.6 - Honduras 2012-08-02 15:36:33 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jpss/dyfi/responses>.
- USGS; 2013a: *M 5.4 - 5 km S of San Juan Pueblo, Honduras 2013-04-10 19:14:01 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000g4a2/dyfi/responses>.
- USGS; 2013b: *M 5.7 - 31 km SSW of El Rosario, El Salvador 2013-07-08 02:52:42 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000i8nx#dyfi>
- USGS; 2013c: *M 5.6 - 40 km S of El Rosario, El Salvador 2013-12-13 04:45:11 (UTC)*. "Did you feel it?". <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000ljv7/dyfi/responses>.

- USGS; 2014: *M 7.3 - 74 km S of Intipuca, El Salvador 2014-10-14 03:51:34 (UTC)*. “Did you feel it?”. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000slwn#dyfi>.
- USGS; 2017: *M 4.8 - 3 km N of Soyapango, El Salvador 2017-04-10 23:53:58 (UTC)*. “Did you feel it?”. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10008ge2#dyfi>.
- USGS; 2018a: *M 5.4 - 10 km S of Intipuca, El Salvador 2018-05-06 19:02:22 (UTC)*. “Did you feel it?”. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000dzgr/dyfi/responses>.
- USGS; 2018b: *M 5.2 - 32 km S of La Libertad, El Salvador 2018-01-03 13:38:40 (UTC)*. “Did you feel it?”. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000bzb5#dyfi>.
- USGS; 2018c: *M 7.5 - 44 km E of Great Swan Island, Honduras 2018-01-10 02:51:33 (UTC)*. “Did you feel it?”. <earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000c2zy/dyfi/responses>.
- Vassaux P.J.; 1969: *Cincuenta años de sismología en Guatemala*. Observatorio Nacional, Guatemala City, Guatemala, pp. 85-98.
- Velasco A.A., Ammon C.J., Lay T. and Zhang J.; 1994: *Imaging a slow bilateral rupture with broadband seismic waves: the September 2, 1992 Nicaraguan tsunami earthquake*. Geophys. Res. Lett., 21, 2629-2632.
- Villagran M., Lindholm C., Dahle A., Cowan H. and Bungum H.; 1997: *Seismic hazard assessment for Guatemala City*. Nat. Hazards, 14, 189-205.
- Ward P.L., Gibbs J., Harlow D. and Aburto Q.A.; 1974: *Aftershocks of the Managua, Nicaragua, earthquake and the tectonic significance of the Tiscapa Fault*. Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1017-1029.
- White R.A.; 1984: *Catalog of historic seismicity in the vicinity of the Chixoy-Polochic and Motagua Faults, Guatemala*. U.S. Geological Survey, Reston, VA, USA, Open-File Report 84-88, 26 pp.
- White R.A.; 1985: *The Guatemala earthquake of 1816 on the Chixoy-Polochic Fault*. Bull. Seismol. Soc. Am., 75, 445-473.
- White R.A. and Cifuentes Q.; 1988: *Seismic history of the Middle America trench spanning the Guatemala triple junction and an earthquake forecast for western El Salvador*, Vol. 1, 24 pp., (Unpublished report).
- White R.A. and Harlow D.H.; 1993: *Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900*. Bull. Seismol. Soc. Am., 83, 1115-1142.
- White R.A., Harlow D.H. and Alvarez S.; 1987: *The San Salvador earthquake of October 10, 1986 - Seismological aspects and other recent local seismicity*. Earthquake Spectra, 3, 419-434.
- White R.A., Ligorría J.P. and Cifuentes I.L.; 2004: *Seismic history of the Middle America subduction zone along El Salvador, Guatemala, and Chiapas, Mexico: 1526-2000*. In: Rose W.I., Bommer J.J., Lopez D.L., Carr M.J. and Major J.J. (eds), Natural hazards in El Salvador, Geological Society of America, Boulder, Colorado, Special Paper 375, pp. 379-396, doi: 10.1130/SPE375.
- Wilhelm Prince of Sweden; 1922: *Between two continents, notes from a journey in Central America, 1920*. E. Nash and Grayson, London, UK, 220 pp. <www.archive.org/stream/journeycentral00wilhrich>.
- Williams S.N. and Self S.; 1983: *The October 1902 plinian eruption of Santa Maria volcano, Guatemala*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 16, 33-56.
- Wood H.O. and Neumann F.; 1931: *Modified Mercalli intensity scale of 1931*. Bull. Seismol. Soc. Am., 21, 277-283.
- Wyllie L., Wright R., Sozen M., Degenkolb H., Steinbrugge K. and Kramer S.; 1974: *Effects on structures of the Managua earthquake of December 23, 1972*. Bull. Seismol. Soc. Am., 64, 1069-1133.
- Yoshida S.; 1995: *Waveform inversion methods for the earthquake source*. J. Phys. Earth, 43, 183-209, doi: 10.4294/jpe1952.43.183.
- Yoshimura K. and Kuroki M.; 2001: *Damage to masonry building structures caused by the El Salvador earthquake of January 13, 2001*. J. Nat. Disaster Sci., 23, 53-63. <www.jsnds.org/jnds/23_2_1.pdf>.
- Young C.J., Lay T. and Lynnes C.S.; 1989: *Rupture of the 4 February 1976 Guatemalan earthquake*. Bull. Seismol. Soc. Am., 79, 670-689.
- Zúñiga R., Suárez G., Ordaz M. and García-Acosta V.; 1997: *Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, Capítulo 2: Mexico*. Pan American Institute of Geography and History (PAIGH), Reporte final, 82 pp.

Corresponding author: Laura Peruzza
 Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale
 Borgo Grotta Gigante 42c, 34010 Sgonico (TS), Italy
 Phone: +39 2140244; e-mail: lperuzza@inogs.it

Appendix 1 - Acronyms used in the text.

Apéndice 1 - Siglas utilizadas en el texto.

CODE	Description/Reference Descripción/Referencia
AHEAD	European Archive of Historical Earthquake Data Archivo Europeo de Datos Históricos de Terremotos
AMAD001	Ambraseys and Adams, 2001
AMAD996	same as MG17; Ambraseys and Adams, 1996
AMSS	Metropolitan area of San Salvador Área Metropolitana de San Salvador
BEal012	Benito <i>et al.</i> , 2012
C.A. or CA	Central America
CCARA	Caribbean and Central America earthquake Risk Assessment Project; http://ccara.openquake.org/
CIG	Centre for Geotechnical Investigation, San Salvador Centro de Investigaciones Geotécnicas, San Salvador
DOM4.1	First release of the Italian Macroseismic Database; https://emidius.mi.ingv.it/DOM/ Base de Datos de Observaciones Macrosísmicas Italiana (primera versión)
DBMI15	Last release of the Italian Macroseismic Database; https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/ Base de Datos Macrosísmica Italiana (versión actualizada)
DYFI	Did You Feel It? Online macroseismic questionnaire realized in the USA Lo Sentiste? Cuestionario macrosísmico en línea realizado en los Estados Unidos
EEE	Earthquake Environmental Effects Efectos Ambientales del Terremoto
EERI009	Belarbi <i>et al.</i> , 2009
EMS-98	European Macroseismic Scale (release 1998) Escala Macrosísmica Europea (versión de 1998)
ESC	European Seismological Commission Comisión Sismológica Europea
ESI	Environmental Intensity Scale; Michetti <i>et al.</i> , 2007 Escala de Intensidad Ambiental
EVENTID	Earthquake unique identifier Código de identificación del evento
GCMT	Global Centroid Moment Tensor Project; http://www.globalcmt.org
GEM	Global Earthquake Model Foundation; http://www.globalquakemodel.org
GHEA	Global Historical Earthquake Archive Archivo Histórico Global de Terremotos
GHEC	Global Historical Earthquake Catalogue Catálogo Histórico Global de Terremotos
IDP	Intensity Data Point Datos puntuales de Intensidad
IMAX	Maximum Intensity Intensidad Máxima
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales
ISC019	Same as ISC-GEM
ISCA	Code to indentify the macroseismic scale adopted Código identificador de escala

ISC-GEM	Global Instrumental Earthquake Catalogue: International Seismological Centre, 2019 Catálogo Global Instrumental de Terremotos; International Seismological Centre, 2019
ISCxx	On-line Bulletin: International Seismological Centre, 2021 Note that the consultation of the online Bulletin has been done at different times, during the Project and that the data currently available may differ. Boletín en línea: Centro Sismológico Internacional, 2021 Tenga en cuenta que la consulta del Boletín en línea se ha realizado en diferentes momentos durante el Proyecto y que los datos actualmente disponibles pueden diferir.
MARCA-GEHN	Acronym of the macroseismic online database setup in this study Acrónimo de la base de datos macrosísmica en línea creado en este estudio
MARN	National Agency authoritative for earthquakes in El Salvador Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MCS	Mercalli-Cancani-Sieberg Scale; Sieberg, 1930; 1932 Escala de Mercalli-Cancani-Sieberg; Sieberg, 1930; 1932
MDP	Macroseismic Data Point set Conjunto de datos puntuales Macrosísmicos
MDPid	Macroseismic Datapoint Identifier, unique code for the macroseismic dataset Identificador de datos puntuales macrosísmicos, Código unívoco para el conjunto de datos macrosísmico
MIDOP	Macroseismic Intensity Data Online Publisher; Locati and Cassera, 2010 Editor en línea de datos de intensidad macrosísmica; Locati y Cassera, 2010
MG1	Ministerio de Obras Públicas (MOP), 1987
MG10	Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED), 2012; https://silo.tips/download/informe-situacion-terremoto-72
MG13	Meyer-Abich, 1952
MG14	Rosenblueth and Prince, 1965
MG15	Dengo <i>et al.</i> , 1965
MG16	Salazar <i>et al.</i> , 1998
MG17	Ambraseys and Adams, 1996
MG19	Bommer and Ledbetter, 1987
MG2	Ministerio de Obras Públicas (MOP), 1982
MG20	Local website: https://www.elsalvadorsismipais.com/sismo-en-el-salvador-13-10-14
MG21	Eisen, 1903
MG22	Rockstroh, 1902
MG23	Canora <i>et al.</i> , 2014
MG24	Lardé, 1952
MG25	USGS, 2013b: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000i8nx#dyfi
MG26	USGS, 2017: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10008ge2#dyfi
MG27	USGS, 2018b: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000bzb5#dyfi
MG28	USGS, 2014: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000slwn#dyfi
MG29	USGS, 2013c: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usc000ljv7/dyfi/responses
MG3	USGS, 1972: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/iscgem766571/executive
MG30	USGS, 2009a: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxxj/dyfi/responses
MG31	Flores, 1970
MG32	Comisión Permanente de Contingencias (COPECO), 2009; https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/DB30D2ECE0B39306C12575C500354135-Informe_completo.pdf
MG33	Rodríguez García, 2019

MG34	USGS, 2018c: Did you feel it? USGS National Earthquake information center. M 7.5 - 44km E of Great Swan Island, Honduras 2018-01-10 02:51:33 (UTC) https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000c2zy/dyfi/responses
MG35	USGS, 2018a: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us1000dzgr/dyfi/responses
MG36	USGS, 2013a: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usb000g4a2/dyfi/responses
MG37	USGS, 1976: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0000ex3/shakemap/intensity
MG38	Lardé, 1916
MG39	Peraldo and Montero, 1999
MG4	Lomnitz and Schulz, 1966
MG40	Sultan, 1931
MG41	White <i>et al.</i> , 2004
MG43	White, 1985
MG44	USGS, 2007: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000fnc9/dyfi/responses
MG45	USGS, 2009b: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxx0/dyfi/response
MG46	USGS, 2009c: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gxx0/dyfi/responses
MG47	USGS, 2010a: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000h5z8/dyfi/responses
MG48	USGS, 2010b: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000h76g/dyfi/responses
MG49	USGS, 2012a: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jekb/dyfi/responses
MG5	Acosta <i>et al.</i> , 1996
MG50	USGS, 2012b: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jen7/dyfi/responses
MG51	USGS, 2012c: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000jpss/dyfi/responses
MG52	https://munlejamani.es.tl/Nuestra-Historia.htm
MG53	Japan Society of Civil Engineers, 2001
MG54	Quintero and Pérez, 2001
MG55	Peraldo and Montero, 1996
MG56	Levin, 1940
MG57	Espinosa <i>et al.</i> , 1976
MG58	Sutch, 1981
MG6	Acosta <i>et al.</i> , 2000
MG60	Benito and Torres, 2009
MG61	Lardé, 1953
MG62	Fernandez and Ortiz, 2012
MG7	Tenorio <i>et al.</i> , 2009
MG70	Fernández, 2002
MG71	Soloviet and Go, 1984
MG8	INSIVUMEH; 2014
MG80	Konagai <i>et al.</i> , 2002
MG81	Bommer <i>et al.</i> , 2002
MG82	Baum <i>et al.</i> , 2001
MG83	Rodriguez <i>et al.</i> , 2006
MG9	Acosta <i>et al.</i> , 2014
MG90	Esposito, 2020

MG91	Cruz and Zuniga, 1994
MM	Modified Mercalli Intensity Scale; Wood and Neumann, 1931 Escala de Intensidad de Mercalli Modificada; Wood and Neumann, 1931
MSK	Medvédev-Sponheuer-Kárnik Scale Escala Medvédev-Sponheuer-Kárnik
NEIC	National Earthquake Information Center Centro Nacional de Información de Terremotos
PEMO999	same as MG39; Peraldo and Montero, 1999
RefID	Reference code for the IDP Código de referencia
RIESCA	Acronym of the project this work belongs to Acónimo del proyecto al que pertenece este trabajo
SITEID	Unique identifier of a locality in the database Identificador único de una localidad en la base de datos
SWG	Seismology Working Group Grupo de Trabajo de Sismología
TASH997	Tanner and Shepherd, 1997
TMA	Middle America Trench Trinchera Mesoamericana
TSU	Tsunami Intensity Scale; Papadopoulos and Imamura, 2001 Escala de Intensidad de Tsunami; Papadopoulos and Imamura, 2001
UTC	Universal Time Coordinated (previously called Greenwich Mean Time - GMT) Tiempo Universal Coordinado (previamente llamado Tiempo Medio de Greenwich - GMT)
USGS	United States Geological Survey Servicio Geológico de Estados Unidos
WHa1984	White <i>et al.</i> , 1984
WHa1004	White <i>et al.</i> , 2004
WHHA993	White and Harlow, 1993
WITH984	White, 1984
ZFES	El Salvador Fault Zone Zona de Falla de El Salvador