



El contenido de este informe es dedicado a las víctimas del Terremoto que afectó la Región Sur del Perú el 23 de junio del 2001.

Esperamos que esta pequeña contribución en el conocimiento de la génesis de los Terremotos en el Perú ayude en el futuro a disminuir los efectos y daños que ellos causan.

Es importante reducir el número de víctimas que ocasiona este tipo de fenómeno natural que siempre nos acompañará por se el Perú, parte del Cinturón de Fuego del Pacífico.

Indice

Presentación

Introducción

Sismología y Sismotectónica

Historia de un terremoto anunciado para la región Sur de Perú

Hernando Tavera

El terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001: Aspectos Sismológicos

Hernando Tavera, Henry Salas, Cesar Jimenez, Yanet Antayhua, Efraín Fernández, Luis Vilcapoma, Jose Millones, Isabel Bernal, Yolanda Zamudio, Julia Carpio, Consuelo Agüero, Ivonne Perez-Pacheco, Simeon Rodríguez y Hector Aleman

Estimación del tamaño del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Isabel Bernal

Intensidades regionales asociadas al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Hernando Tavera, Efraín Fernández, Luis Vilcapoma, Yanet Antayhua e Ivonne Pérez-Pacheco

Análisis espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 a partir de datos de una red sísmica local (Resultados preliminares)

Yanet Antayhua, Henry Salas, Isabel Bernal, Simeon Rodríguez, Jose Millones, Cesar Jimenez, Ivonne Pérez-Pacheco, David Portugal, Adolfo Inza y Yolanda Zamudio

Análisis del Terremoto del Sur del Perú, 23 de Junio 2001, Mw=8.4 utilizando datos locales

Diana Comte, Rubén Boroschek, Hernando Tavera, Louis Dorbath, David Portugal Michel Frogneux, Henri Haessler, Hernán Montes, Isabel Bernal, Yanet Antayhua Henry Salas, Adolfo Inza, Simeón Rodríguez, Bianca Glass, Eduardo Correa Carlos Meneses, Iván Balmaceda y Alicia Cruz

Mecanismo focal del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Hernando Tavera

Proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus replicas de magnitud mayor (resultados preliminares)

Hernando Tavera

Características Espacio-Tiempo del proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001 (Región Sur de Perú)

Hernando Tavera

Orientación de la fuente del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de algunas replicas importantes

Hernando Tavera y Simeón Rodríguez

Parámetros del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus réplicas de magnitud mayor deducidos del análisis espectral de ondas de volumen

Hernando Tavera y Yanet Antayhua

Algunas notas sobre las aceleraciones máximas producidas por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Hernando Tavera y Henry Salas

Evaluación de la respuesta del suelo en Camaná, Atico y Chala a partir de las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Luis Vulcapoma y Henry Salas

Características generales del tsunami asociado al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (Mw=8.2)

Julia Carpio, Yolanda Zamudio y Henry Salas

Grandes terremotos y áreas de ruptura en la región sur de Perú: Terremoto de Arequipa del 23/06/2001

Hernando Tavera, Isabel Bernal

Anomalías del valor de b y el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Hernan Heras y Hernando Tavera

Educación y Prevención

Isabel Bernal

Geología y Geodinámica

Efectos geológicos asociados al sismo del 23 de Junio del 2001 en el Sur de Perú

Juan Carlos Gómez, Frank Audemard y José Quijano

Efectos Geológicos Asociados al sismo de Arequipa del 23 de Junio de 2001, Departamento de Arequipa, Perú Meridional

Frank Audemard, Juan Carlos Gómez y José Quijano

Intensidades Macrosísmicas

Intensidades macrosísmicas en las áreas Urbanas de las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna. Localidades de Corire, Aplao, Chuquibamba, Mollendo, Punta de Bombón (Arequipa) e Ilo (Moquegua)

Efraín Fernández, Consuelo Agüero, Freddy Ccallo, Hernan Heras, Julia Carpio y Abel Julca

Evaluación de las intensidades macrosísmicas en las provincias de Caravelí y Camaná (Arequipa) debidas al terremoto del 23 de Junio de 2001

Yolanda Zamudio y Igor Valdivia

Estadística de daños ocasionados por el terremoto de Arequipa del 23-06-2001 en Iglesias Coloniales, Monumentos Históricos y Calles de la ciudad de Arequipa y sus provincias

Victor Aguilar y Eduardo Farfan

Efectos de Sitio

El terremoto de Arequipa, Perú del 23 de Junio de 2001 (Mw=8.4). Observaciones Sismológicas, Atenuación Sísmica y Efectos de Sitio en las Ciudades de Arequipa, Camaná, Moquegua, Ilo y Tacna.

Javier Lermo, Fernando Lazares y Julio Cuenca

Características Ingenieriles del terremoto de Ocoña del 23 de Junio de 2001

Rubén Boroschek¹, Diana Comte² Alexis Morales¹

Agradecimientos

Anexos

A 30 días del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001: Preguntas y Respuestas.

Hernando Tavera

Poster

CNDG

Fotos de efectos y daños causados por el terremoto del 23 de Junio de 2001 en la Región Sur de Perú

Efrain Fernández y Consuelo Agüero

Presentación

El terremoto ocurrido en la región Sur de Perú el día 23 de Junio de 2001, ha permitido al personal que integra la Dirección del Centro Nacional de Datos Geofísicos y Areas Afines del Instituto Geofísico del Perú (CNDG-IGP), tomar la responsabilidad de ejecutar los trabajos de campo y posterior análisis y evaluación de los datos recolectados, a fin de estudiar la génesis, proceso, daños y efectos causados por el terremoto. Es importante considerar, que el terremoto del 23 de Junio se constituye como el más grande de los ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica en los últimos 133 años.

El trabajo programado por el CNDG fue desarrollado por cinco grupos que asumieron la responsabilidad de instalar estaciones sísmicas alrededor del epicentro del terremoto, evaluación *in situ* de los daños y efectos causados por el terremoto en toda la región Sur, así como del tsunami de carácter local que afectó a la localidad de Camaná (Arequipa). Por otro lado, la rápida disponibilidad de información permitió que el CNDG en 48 horas incluyera en su *website* un informe preliminar detallado de las características del terremoto y la edición de un póster que resumía los resultados obtenidos. Asimismo, los resultados de los estudios preliminares fueron aceptados para su publicación en la revista científica *Journal of Seismology* (actualmente en impresión) y en la reunión de la AGU (American Geophysical Union) realizada en la ciudad de San Francisco, USA en Diciembre de 2001. Además, la información disponible sobre el terremoto del 23 de Junio ha sido tema de varias exposiciones en el ámbito nacional en las cuales el CNDG ha representado al Instituto Geofísico del Perú.

Después de aproximadamente diez meses de ocurrido el terremoto del 23 de Junio, el CNDG concluye con parte de los estudios programados y procede a editar el presente Informe Final a fin de dar a conocer e informar a la comunidad científica, autoridades y público en general sobre la génesis, proceso y efectos causados por el

terremoto El presente informe consta de 24 trabajos de investigación estructurados a manera de artículos, los mismos que han sido elaborados por investigadores del CNDG y Areas Afines, además de los presentados por investigadores de la Universidad Autónoma de México y de la Universidad de Chile abarcando diversos aspectos del terremoto a fin de que el lector tenga una idea clara de las principales características sismotectónicas, geológicas y de los mayores efectos que produjo el terremoto del 23 de Junio en toda la región Sur. Sin embargo, se debe indicar que se han iniciado otros estudios a fin de que los resultados que se obtengan sean publicados en revistas especializadas en cada tema. Acompañan al presente informe, una sección de fotografías que muestra ejemplos de los daños causados por el terremoto en los distintos tipos de viviendas existentes en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, un listado de preguntas y respuestas que fue puesto en nuestro *website* a 30 días de ocurrido el terremoto del 23 de Junio a fin de disipar las dudas e incertidumbre existente en la población; además, del Poster elaborado por el CNDG con los resultados obtenidos de manera preliminar sobre las características del terremoto.

El presente Informe Final tiene como título “El Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001” y esperamos que la serie de artículos que se presenta cumplan el objetivo de mejorar nuestro conocimiento sobre uno de los mayores peligros a los cuales estamos expuestos, los *TERREMOTOS*.

Hernando Tavera
Director CNDG-IGP

Introducción

El día 23 de Junio de 2001, a horas 15 y 33 minutos (Hora Local), el Perú fue nuevamente testigo de la fuerza con que la naturaleza nos indica que la Tierra, sobre la cual habitamos, es dinámicamente activa. Ese día, la región sur de Perú soportó la ocurrencia de un terremoto de magnitud 8.2 Mw que produjo muerte y destrucción principalmente en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna en Perú, Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. Las intensidades máximas en algunas localidades y ciudades, próximas a la costa, llegaron a VII-VIII en la escala Mercalli Modificada. Este terremoto se constituye como el más grande ocurrido en esta región desde el año de 1868.

A la fecha, el Instituto de Defensa Civil (INDECI) ha informado de las estadísticas que deja este sismo en la región Sur: 74 muertos, 2689 heridos, 217495 damnificados, 64 desaparecidos, 35601 viviendas afectadas y 17584 viviendas destruidas.

A pesar que hoy en día, existe un avance importante en el conocimiento de la génesis de los terremotos, la globalización de la información, los medios y métodos para mitigar los efectos de los desastres, el sismo ocurrido el 23 de Junio nos deja muchas preguntas sin respuesta y estas, nos sugieren los caminos a seguir para no ser nuevamente sorprendidos y afectados por este tipo de peligro.

La ocurrencia continúa de terremotos en el Perú ha permitido conocer con bastante precisión y a la vez identificar las características de las dos fuentes de mayor potencial sísmico, la primera y más importante se encuentra frente a la línea de costa y tiene su origen en la convergencia de las placas de Nazca (oceánica) y Sudamericana (continental), permitiendo que la primera, más densa, se introduzca por debajo de la

segunda dando origen al proceso conocido como subducción. Esto significa que en algún momento en el tiempo, cualquier departamento desde Tumbes hasta Tacna será afectado en diferente grado por un terremoto con origen es este proceso. La historia sísmica permite traer a la memoria los terremotos de 1619, 1746, 1868, 1940, 1942, 1966, 1970, 1974, 1996 entre los que produjeron mayor daño, destrucción y muerte a lo largo de la costa de Perú. La segunda fuente sismogénica esta relacionada con los más importantes sistemas de fallas distribuidas en el interior del continente, siendo las más conocidas las fallas de la Cordillera Blanca, Quiches, Moyobamba, Rioja, Satipo, Huaytapallana, Ayacucho y Tambomachay entre las principales. La ubicación geográfica de estas fallas nos sugiere las ciudades que pueden ser mayormente afectadas por los terremotos. En general, el proceso de subducción es el causante de más del 80% de toda la energía liberada en forma de sismos por estas dos fuentes.

La globalización de la información permitió que el público en general disponga en corto tiempo, a través de internet, de buena parte de la información existente sobre el terremoto de Arequipa, llevando a muchos a realizar diversas interpretaciones debido a un posible desconocimiento de este campo de la ciencia. Por lo tanto, es necesario que el público tenga un mayor conocimiento de este tipo de fenómeno y del significado de cada uno de los parámetros físicos que permiten identificarlo. Por ejemplo, muchas de las personas desconocen totalmente de la existencia de diversos procedimientos para medir la magnitud de los sismos, los mismos que dependen del tipo de información que se utiliza y de la distancia a la cual se obtiene dicha información. De ahí que para el terremoto de Arequipa existieran diferencias importantes en el valor de la magnitud proporcionada por una u otra institución. Se debe tener en cuenta que la denominada “escala de Richter” será pronto remplazada totalmente por la llamada “magnitud momento, M_w ” debido a que esta permite cuantificar mejor el tamaño de los terremotos.

La tarea de mitigación, ante la ocurrencia de este tipo de fenómeno, conlleva a realizar una continua educación de la población a todos los niveles a los cuales sea posible (hogares, colegios, universidades, empresas, instituciones publicas, asentamientos humanos, urbanizaciones, distritos, provincias, departamentos) y realizar campañas de difusión a nivel local y nacional. Asimismo, es importante realizar un control adecuado sobre la expansión urbana para que no se desarrolle en zonas

geológicamente inestables o se utilice materiales inadecuados. Evidentemente, la tarea de mitigar el desastre es la que mejor se viene desarrollando; sin embargo, debemos suponer que aun falta mucho que aprender y solo la práctica con fenómenos reales nos permitirá corregir errores y mejorar nuestros procedimientos.

Cabe recalcar el esfuerzo de las diferentes instituciones nacionales e internacionales, tanto de la empresa privada como pública para realizar estudios del terremoto de Arequipa dentro del campo de su competencia, información importante para los fines de desarrollo científico y socio-económico del país; sin embargo, frecuentemente se suele duplicar esfuerzos y se llegan a conclusiones diferentes en la forma pero similares en el fondo, debido a que no se correlaciona la información con otras especialidades. El terremoto ocurrido en la región Sur de Perú debe ser el punto de partida para que instituciones, ONGS y universidades que desarrollan investigación en Ciencias de la Tierra unan esfuerzos para realizar los estudios multidisciplinarios correspondientes.

Ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de Junio, la Dirección del Centro Nacional de Datos (CNDG) del Instituto Geofísico del Perú realiza las coordinaciones necesarias a fin de atender, desde el punto de vista de la investigación científica, la emergencia producida por el terremoto en la región sur de Perú. Así, el CNDG procedió a organizar los grupos de intervención para obtener la mayor cantidad de información necesaria para evaluar y analizar todo el proceso sismotectónico que acompañó al terremoto, así como los daños y efectos que este produjo en superficie. Esta información permitirá en el futuro tener un mayor conocimiento de la génesis de los terremotos en el Perú. Uno de los grupos estuvo encargado de realizar la instalación de 8 estaciones sísmicas y 5 acelerógrafos alrededor del epicentro del terremoto a fin de registrar el mayor número de replicas que permitan conocer en detalle la evolución temporal de toda el área de ruptura. Días después, en cooperación con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile se realiza la instalación de 10 estaciones sísmicas adicionales en los departamentos de Moquegua, Tacna y Arequipa. Un segundo grupo, el mayor en cuanto al número de personas, procede a realizar la evaluación in situ de los efectos del terremoto en las áreas urbanas de las principales ciudades y localidades de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, además de los efectos causados por el

tsunami en las localidades de Camaná y Matarani. Paralelamente, un tercer grupo procede a realizar la evaluación de los efectos geológicos del terremoto a lo largo de la costa entre las ciudades de Ica y Tacna. Finalmente, un cuarto grupo permaneció en la sede central del IGP a fin de proceder al análisis y procesamiento de la información sísmica preliminar. Esta información fue puesta en el *website* del CNDG después de 48 horas de ocurrido el terremoto. Paralelamente, el CNDG editó un Póster con información que resumía las características más importantes del terremoto del 23 de Junio de 2001.

El programa de intervención post-sísmica desarrollado por el CNDG contó con el apoyo externo de la Fundación Venezolana de Investigación Sísmica que permitió la participación del Dr. Frank Audemard para los estudios geológicos. Asimismo, la Dra. Diana Comte del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile realizó la instalación de diez estaciones sísmicas y participa actualmente en los estudios sísmológicos. En el trabajo de campo, instalación y operación de las estaciones sísmicas participaron los Ing. David Portugal, Adolfo Inza y el Sr. Henry Salas. Las actividades logísticas estuvieron a cargo del Ing. Jorge Espinoza (Jefe de Redes Geofísicas), Sr. Edmundo Vila y de la CPC Rosa Ibañez.

Introduction

On June 23, 2001, at 15:33 (local time), Peru was once more witness to the strength with which Nature reminds us that the planet we inhabit is dynamically active. On that day, the southern region of Peru was shaken by an earthquake of magnitude 8.2 Mw that caused death and destruction mainly in Arequipa, Ayacucho, Moquegua, and Tacna in Peru; Arica and Iquique in Chile; and La Paz in Bolivia. The maximum intensities observed in settlements and cities close to the coast reached VII-VIII in the modified Mercalli scale (MM). This earthquake is the largest in this region since 1868.

INDECI (*Instituto Nacional de Defensa Civil*) has reported the following statistics left by the seismic event: 74 dead; 2,689 injured; 217,495 victims; 35,601 homes affected; and 17,584 homes destroyed.

Even though nowadays there are important advances in the area of earthquake genesis, as globalization of information and methods to mitigate the effects of disasters, the seismic event of June 23 leaves many questions unanswered suggestions the path we should follow to avoid being affected by such a disaster again.

The frequent occurrence of earthquakes in Peru has enabled researchers to identify, with considerable precision, the characteristics of the major potential seismic sources. The first and most important is located off the coastline and has its origin in the convergence of the Nazca plate (oceanic) with the South American plate (continental), where the first, more dense, is gradually buried under the second, originating the process known as subduction. This means that at some point in time, any place from Tumbes to Tacna will be affected to a different extent by an earthquake. Seismic history reminds us about the earthquakes of 1619, 1746, 1868, 1940, 1942, 1966, 1970, 1974, 1996, among those that caused the greatest damage, destruction and death along the coast of Peru. The subduction process is the responsible for the release of over 80% of all the seismic energy. The second seismogenic source is related to the most important fault systems

distributed in the interior of the continent. The best known faults being Cordillera Blanca, Quiches, Moyobamba, Rioja, Satipo, Huaytapallana, Ayacucho and Tambomachay. The geographic locations of these faults indicate which cities can be the most affected by earthquakes.

The globalization of information through internet allowed the general public to have access to the existing information about the Arequipa earthquake and accomplished various interpretations about the earthquake size. Therefore, it is necessary that the public have more knowledge about this type of phenomenon and about the significance of each of the physical parameters that allow us to identify it. For instance, many people completely ignore the existence of several procedures to calculate the magnitude of the seismic events, each of which depends on the type of information used and on the distance at which that information is obtained. Thus, important differences existed in the magnitude values given by one or another institution. It is important to note that the "Richter scale" will soon be replaced by the "magnitude moment, M_w " since the latter allows for a better quantification of the sizes of earthquakes.

The task of mitigation, upon the occurrence of this type of event, leads us to continuously educate the population (homes, schools, companies and general public) and to make diffusion at local and national level. Also, it is important to control urban expansion so that it doesn't proceed in geologically unstable zones and so that inadequate materials aren't used. Evidently, the task of mitigating the disaster is the most successful one so far; however, we have to assume that there's still a lot to learn and that only practice with real phenomena will allow us to make corrections and improve our procedures.

We should overemphasize the efforts made by different institutions, both national and international, as well as private and public, in studying the Arequipa earthquake within their respective fields of specialization and providing information that is important for the country's socio-economic growth. Nevertheless, due to the lack of cooperation among these different institutions, valuable resources human and material could have been wasted in repeating identical tasks and the conclusion reached by

each institution is presented in such a way that, collectively, they all look different even though they are really the same. The Arequipa earthquake should be the starting point for institutions, Non-Governmental Organizations (ONGs), and universities doing research on earth science to join forces when doing their corresponding multidisciplinary research.

Upon the occurrence of the Arequipa earthquake, the *Centro Nacional de Datos Geofísicos* (CNDG) of the IGP organized and sent to the field research groups to obtain all the information required to evaluate and analyze the seismotectonic process that accompanied the earthquake, as well as the effects of the seismic event on the surface. This information will contribute to the knowledge about earthquake genesis in Peru. One research group installed 8 seismic stations and 5 accelerographs around the earthquake epicenter to register the aftershocks, and thus learn in detail about the evolution in time of the entire rupture area. Days later, in cooperation with the Geophysics Department of the *Universidad de Chile*, 10 additional seismic stations were installed in the Moquegua, Tacna, and Arequipa City. Another research group, the largest in size, evaluated *in situ* the effects of the earthquake in the urban areas of the main cities and settlements of Arequipa, Moquegua, and Tacna, as well as the effects of the tsunami in Camaná and Matarani. A third research group investigated the geologic effects of the earthquake along the coast between the cities of Ica and Tacna. A fourth group stayed at the IGP to analyze and process the preliminary seismic data. Part of these data was posted on the CNDG website 48 hours after the earthquake took place. Also, the CNDG edited a *Póster* with information that summarized the more important characteristics of the June 23, 2001 seismic event.

The post-seismic operations program developed by the CNDG had the external support of the Dr. Frank Audermard of the *Fundacion Venezolana de Investigacion Sísmica* who participated in the geologic work, while Dr. Diana Comte of the Geophysics Department of the *Universidad de Chile*, participated in the seismologic work. David Portugal, Adolfo Inza and Mr. Henry Salas were in charge of the installation and operation of the seismic stations. Logistics support was far field data acquisition in charge of Jorge Espinoza (Chief of the IGP, Geophysical Network), Mr. Edmundo Vila, and Rosa Ibañez.

Sismología y Sismotectónica

- Historia de un terremoto anunciado para la región Sur del Perú
- El terremoto de la Región Sur del Perú del 23 de Junio de 2001: Aspectos Sismológicos
- Estimación del tamaño del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.
- Intensidades regionales asociadas al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.
- Análisis espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 a partir de datos de una red sísmica local (Resultados preliminares)
- Análisis del Terremoto del Sur del Perú, 23 Junio 2001, $M_w = 8.4$ utilizando datos locales
- Mecanismo focal del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.
- Proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus replicas de magnitud mayor (resultados preliminares)
- Características Espacio-Tiempo del proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001 (Región Sur de Perú).
- Orientación de la fuente del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de algunas replicas importantes.
- Parámetros del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus replicas de magnitud mayor deducidos del análisis; espectral de ondas de volumen.
- Algunas notas sobre las aceleraciones máximas producidas por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
- Evaluación de la respuesta del suelo en Camaná, Atico y Chala a partir de las replicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.
- Características generales del tsunami asociado al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_w = 8.2$).
- Grandes terremotos y áreas de ruptura en la región sur de Perú: Terremoto de Arequipa del 23/06/2001
- Anomalías del valor de b y el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.
- Educación y Prevención.