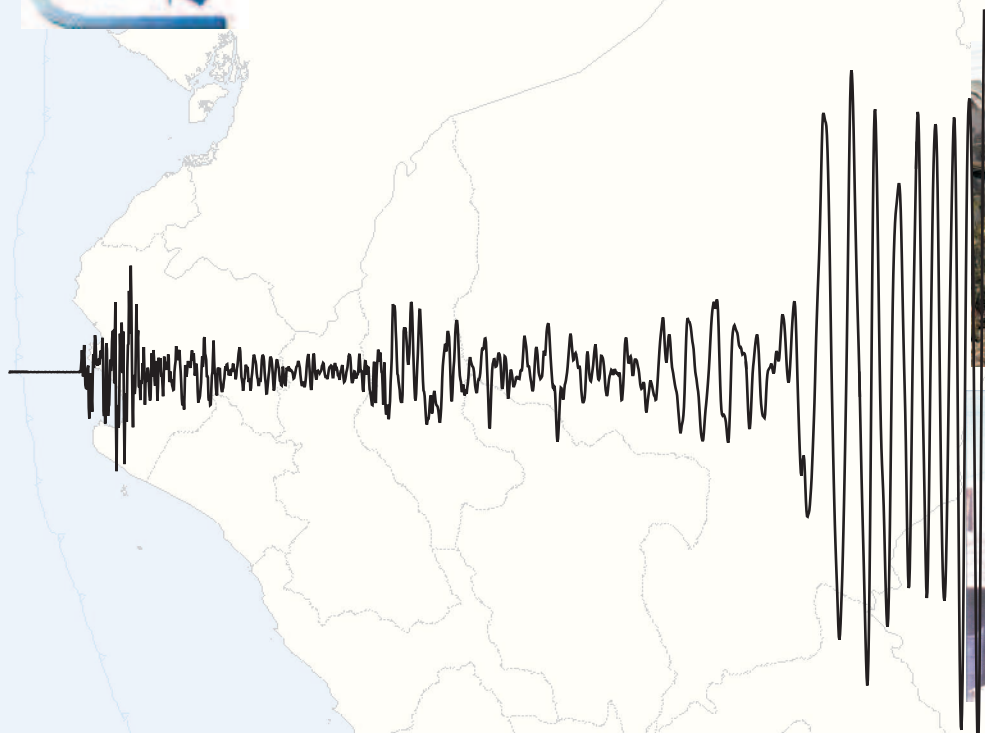




INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

Centro Nacional de Datos Geofísicos

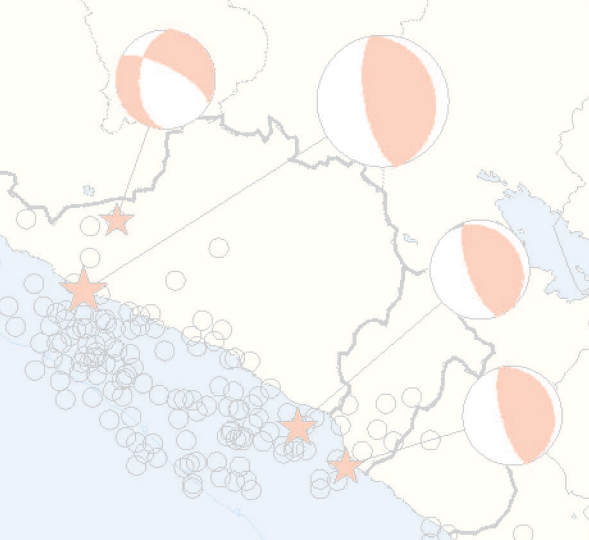


EL TERREMOTO DE LA REGIÓN SUR DE PERU DEL 23 DE JUNIO DE 2001

Editor
Hernando Tavera



Lima - Perú
2002



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, Efrain Fernandez, Luis Vilcapoma, Jose Millones, Isabel Bernal, Yolanda Zamudio, Julia Carpio, Consuelo Agüero, Ivonne Perez-Pacheco, Simeon Rodriguez 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 Rodriguez, 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 Vilcapoma 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

Nombre de archivo: indice
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 06:14 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 06:14 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:13 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 3
Número de palabras: 655 (aprox.)
Número de caracteres:3,735 (aprox.)

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

Nombre de archivo: presenta
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:30 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:30 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 0 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:15 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 2
Número de palabras: 521 (aprox.)
Número de caracteres:2,974 (aprox.)

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. En general, el proceso de subducción es el causante de que esta fuente libere, en forma de sismos, más del 80% de toda la energía acumulada en el interior de la Tierra. 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.

La globalización de la información permitió que el público en general disponga, en tiempo real, de toda la información existente sobre el terremoto de Arequipa, llevando a muchos a aceptar diversas hipótesis sobre el origen y características del mismo y generar muchas veces incertidumbre debido al 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, Mw” 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, asentimientos 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. De esta forma se genera un inadecuado y racionalizado uso de los escasos recursos que tiene el país para este tipo de contingencias. 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 Alta Dirección del Instituto Geofísico del Perú (IGP) encarga a la Dirección del Centro Nacional de Datos (CNDG) realizar las coordinaciones necesarias a fin de proceder a 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 réplicas 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 de los Drs. Ronald Woodman y Hernán Montes, Presidente Ejecutivo y Director Técnico del IGP. La Fundación Venezolana de Investigación Sísmica permitió la participación del Dr. Frank Audemard para los estudios geológicos. La Dra. Diana Comte del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile realizó la instalación de 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), del 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 the departments of 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 that of 1868.

To date, the INDECI (*Instituto Nacional de Defensa Civil*) has 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 well as globalization of information and methods to mitigate the effects of disasters, the seismic event of June 23 leaves many questions unanswered and these shape the path to follow to avoid being affected by such a disaster again.

The frequent occurrence of earthquakes in Peru has enabled to identify, with considerable precision, the characteristics of the major sources of seismic potential. The first and most important is located off the coastline and has its origin in the convergence of the Nazca plate (oceanic) and 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 department from Tumbes to Tacna will be affected to a different extent by an earthquake. Seismic history reminds us of 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 responsible for this source's release, in the form of earthquakes, of over 80% of all the energy accumulated in the Earth's interior. The second seismogenic source is related to the most important fault systems distributed in the interior of the continent, the best known being the faults of the Cordillera Blanca, Quiches, Moyobamba, Rioja, Satipo, Huaytapallana, Ayacucho and Tambomachay. The geographic location of these faults indicate which cities can be the most affected by earthquakes.

The globalization of information allowed the public to have access, in real time, to all the existing information about the Arequipa earthquake. Nevertheless, next to complete ignorance about this field of science led to many people's believing in just about any hypothesis about the earthquake. 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 to 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 the earthquakes.

The task of mitigation, upon the occurrence of this type of event, leads us to continuously educate the population at all possible levels (homes, schools, companies, etc.) both at the 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 can't 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 energy is 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. Peru's scarce resources for this type of contingencies are therefore misused. 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 Chair of the *Instituto Geofísico del Perú* (IGP) asked the *Centro Nacional de Datos Geofísicos* (CNDG) to carry out the necessary investigations. Thus, the CNDG organized 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 of the research groups installed 8 seismic stations and 5 accelerographs around the earthquake epicenter to register the greatest number of 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 departments of Moquegua, Tacna, and Arequipa. 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. Simultaneously, 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 was summarizing the characteristic more important of the June 23, 2001.

The post-seismic operations program developed by the CNDG had the support of Dr. Ronald Woodman and Dr. Hernan Montes, Executive President and Technical Director, respectively, of the IGP. Dr. Frank Audermard of the *Fundación Venezolana de Investigación Sísmica* participated in the geologic work, while Dr. Diana

Comte of the geophysics department at the *Universidad de Chile*, participated in the seismologic work. Engineers David Portugal and Adolfo Inza, as well as Mr. Henry Salas, participated in the installation and operation of the seismic stations. Logistics were in charge of engineer Jorge Espinoza (Chair of the Geophysics Network), Mr. Edmundo Vila, and Rosa Ibañez.

SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA

Nombre de archivo: SISM
Directorio: C:\WINDOWS\Escritorio
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 08/08/2008 12:35 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 08/08/2008 12:44 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 9 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:44 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 2
Número de palabras: 10 (aprox.)
Número de caracteres: 60 (aprox.)

Historia de un Terremoto Anunciado para la región Sur de Perú

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

La ocurrencia de grandes terremotos en la región sur de Perú con periodos de retorno del orden de 100 años, ha llevado a muchos investigadores a unir esfuerzos para estudiar en detalle las características sismotectónicas de esta región. El último terremoto que afectó toda esta región ocurrió en el año 1868 con una magnitud de 9.0 Mw e intensidades del orden de X en la escala Mercalli Modificada. A la fecha, las condiciones sismotectónicas necesarias para la ocurrencia de otro terremoto de similar tamaño al de 1868, se han hecho presentes y sus principales características son analizadas en este estudio.

Abstract

The occurrence of great earthquakes in southern Peru with return periods in the order of 100 years has motivated to many researchers to accomplish study in detail the seismotectonic characteristics of this region. The last earthquake in this region occurred in the year 1868, had a magnitude of 9.0Mw and intensities in the order of IX in the Modified Mercalli scale. To date, the seismotectonic conditions necessary for the occurrence of an earthquake of a size similar to that of 1868, are present and their main characteristics are analyzed in this study.

Introducción

El 13 de agosto de 1868, un terremoto destructor de magnitud 9.0 Mw causa muerte y destrucción en toda la región Sur de Perú y Norte de Chile. Este terremoto produjo una intensidad máxima de IX en la escala Mercalli Modificada y causó daños en un área que se extiende desde la ciudad de Ica en Perú, hasta Tarapaca en Chile. Según las crónicas de aquellos años, el terremoto tuvo una duración de 5 minutos, tiempo durante el cual se destruyeron todas las viviendas y en algunos lugares la tierra se abrió surgiendo agua por doquier. La longitud de la ruptura que produjo el terremoto fue del orden de 500 km y dio origen a un tsunami que afectó a la ciudad de Arica con olas de hasta 16 metros de altura (Dorbath et al, 1990). Este tsunami produjo daños importantes en la ciudad de California (EEUU) por el Norte, en Australia y Nueva Zelanda por el Oeste. En Arica, uno de los barcos de guerra de los EEUU (Wateree) y otro de Perú (América) fueron llevados por las olas a una distancia tierra adentro de 4 km aproximadamente.

Después de 9 años, en Mayo de 1877, otro terremoto de magnitud similar ocurre en la región norte de Chile y produjo una longitud de ruptura de 500 km, paralela a línea de costa, que se extendió hasta la ciudad de Antofagasta en Chile. Un tsunami similar al de 1868, retorna el buque Wateree a la costa. En estas condiciones, se asume que el área de ruptura del terremoto de 1877 fue continuación del iniciado por el terremoto de 1868. Después de la ocurrencia de estos dos terremotos, cercanos en el tiempo, la región Sur de Perú y Norte de Chile han sido afectadas por otros terremoto de magnitud menor, los mismos que se han repetido mas o menos de manera regular. En general, todos estos terremotos tienen su origen en la superficie de fricción de las placas de Nazca (oceánica) y Sudamérica (continental) dentro del proceso conocido como subducción y mediante el cual, la placa oceánica se introduce por debajo de la continental con una velocidad relativa del orden de 8 cm/año (DeMets et al, 1990). Este mismo proceso ocurre en muchas otras partes del mundo, siendo el más importante el que se produce en el borde de la placa del Pacífico y de la cual forma parte la placa de Nazca.

El Borde Oeste de Sudamérica

El borde Oeste de Sudamérica, caracterizada por la colisión de las placas de Nazca y Sudamericana, se constituye desde el punto de vista de la Tectónica de Placas, como uno de los más importantes e interesantes en el mundo debido principalmente a la alta velocidad de convergencia de sus placas (8 cm/año), lo que permite que se produzca mayor fricción entre ellas y en estas condiciones, dar origen a los más violentos terremotos que se producen en el mundo. Por ejemplo, el terremoto ocurrido en Mayo de 1960 en la región Sur de Chile con una magnitud de 9.6Mw, llegando a afectar una superficie del orden de 1000 km al sur de la ciudad de Concepción en Chile. Este terremoto produjo un tsunami transoceánico de los más dañinos y permitió por vez primera, observar las oscilaciones propias de la Tierra, al margen de que su eje de rotación vario ligeramente. Se asume que este terremoto tendría un periodo de retorno medio mayor a una centuria.

Es importante considerar que el proceso de subducción es continuo en la escala del tiempo geológico y que de existir una fuerte fricción entre las placas, estas liberarían la energía acumulada en forma de ondas elásticas. Ahora, si la deformación es mayor a las fuerzas que se oponen a la fricción, el deslizamiento de las placas se realizará de

manera brusca o violenta produciendo un terremoto cuya magnitud dependerá de la longitud del deslizamiento y de las dimensiones del área involucrada. Es necesario aclarar que el proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana se realiza a lo largo de toda su superficie de contacto, pero los deslizamientos que dan origen a los terremotos se producen sobre segmentos de longitud menor permitiendo considerar áreas pequeñas de fricción y de ruptura. Estas superficies de fricción no son visibles debido a que se encuentran por debajo del nivel medio del mar. Contrariamente, los sismos que ocurren en continente producen rasgos tectónicos en superficie que pueden permitir describir la historia de la ruptura, siendo estos conocidos como trazas de falla.

Áreas de Ruptura

El estudio y análisis de la distribución espacial, en el borde Oeste de Sudamérica, de las áreas de ruptura de los grandes terremotos ocurridos en los siglos XIX y XX, permite observar lo siguiente (Figura 1):

- .- Durante el siglo XIX los más grandes terremotos que han afectado a Perú y Chile ocurrieron en Agosto de 1868 y Mayo de 1877, ambos con magnitudes del orden de 9.0Mw y longitudes de ruptura de 500 km aproximadamente. Estos terremotos y sus áreas de ruptura se ubican en la región Sur de Perú y Norte de Chile. En el resto del borde Oeste de Perú y Chile no ocurrieron terremotos de magnitud elevada.

- .- En el Siglo XX, la región Central de Perú ha sido afectada por 4 terremotos con magnitudes Mw del orden de 8.0, además de los tres terremotos ocurridos en el extremo norte de la región Sur. En estas condiciones, prácticamente en toda la región Sur de Perú no se ha producido un terremoto de magnitud elevada en los últimos 132 años. Del mismo modo, el borde Oeste de Chile ha sido afectado por al menos 10 terremotos con magnitudes Mw promedio de 8.0, destacando el ocurrido en Mayo de 1960 que produjo una longitud de ruptura de 1000 km (Mw=9.5). Al final del siglo, en la región Norte de Chile no ha ocurrido ningún terremoto importante desde hace más de 123 años.

Algunos autores como Dorbath et al (1990) sugieren que los terremotos como los ocurridos en 1868 y 1877, tienen periodos medios de retorno de 100 años y otros

como Comte y Pardo (1991) sugieren que estos periodos son del orden de 111 ± 33 años. En ambos casos, es evidente que la región Sur de Perú y Norte de Chile deben ser la fuente de origen de un próximo terremoto de magnitud similar a los ocurridos en 1868 y 1877.

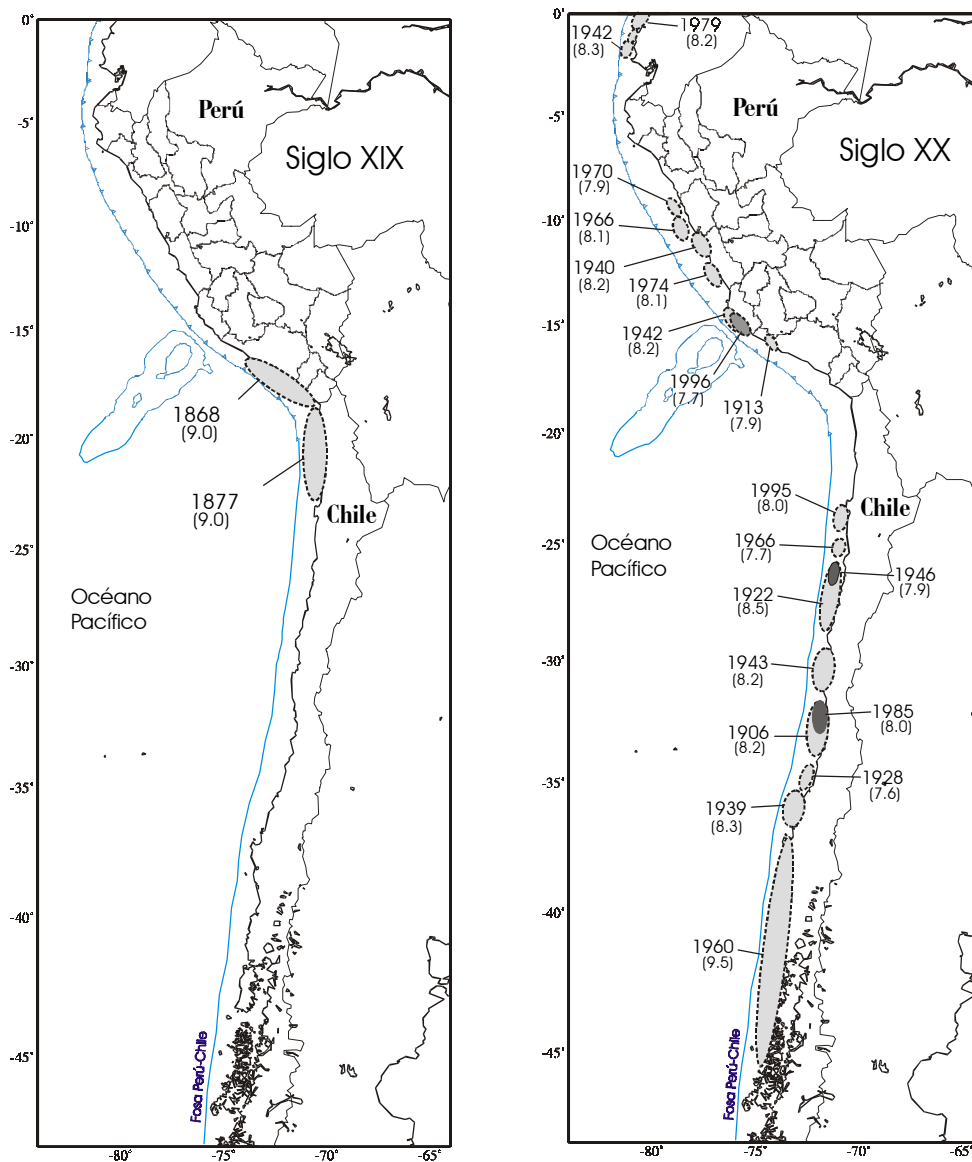


Figura 1. Distribución de las áreas de ruptura de los grandes terremotos ocurridos en el borde Oeste de Sudamérica durante los Siglos XIX y XX.

Sismicidad Reciente

A fin de analizar las características de la actual distribución espacial de los terremotos de magnitud elevada en la región Sur de Perú y Norte de Chile, en la Figura 2 se presenta los epicentros de los sismos con magnitudes m_b mayor o igual a 6.0 ocurridos durante el periodo comprendido entre 1990 y 2000, además de las áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877 (líneas discontinuas). En la Figura 2 se puede observar que los terremotos con foco superficial asociados directamente con el proceso de fricción de placas se concentran en dos grupos, el primero se ubica al sur del área de ruptura del terremoto de 1877 y corresponde al terremoto ocurrido en Mayo de 1995 ($M_w=8.0$) en la región Norte de Chile; mientras que, el segundo grupo se ubica en el extremo norte del área de ruptura del terremoto de 1868 y corresponde al terremoto de Perú ocurrido en Noviembre de 1996 ($M_w=7.7$). En el resto de la región Sur de Perú y Norte de Chile, la ausencia de terremotos con foco superficial es total.

El terremoto del 12 de Noviembre de 1996 ($M_w=7.7$) ocurrido en la región Sur de Perú, produjo una longitud de ruptura de 120 km y según Tavera et al., (1998) es repetitivo del ocurrido en Mayo de 1942 ($M_w=8.2$). La distribución espacial de las réplicas ocurridas durante los primeros 30 días, sugieren una propagación de la ruptura en dirección SE, tal como lo indica Tavera et al., (1998) a partir de la generación de registros teóricos y análisis directo sobre la forma de onda en registros obtenidos para diversos acimutes. Este terremoto y su área de ruptura se ubican en el extremo Norte del área involucrada en el terremoto de 1868.

Asimismo, el 30 de Julio de 1995 la región Norte de Chile fue testigo de otro terremoto de magnitud 8.0 M_w que produjo una longitud de ruptura de 180 km. Estudios detallados utilizando formas de onda y distribución de replicas sugieren que el área de ruptura de este terremoto se propagó en dirección Sur, en relación con la ubicación del epicentro del terremoto (Delouis et al, 1997). Este terremoto se ha producido en el extremo sur del área involucrada en el terremoto de 1877.

En la Figura 2, al contrario de los sismos con foco superficial, los de foco intermedio asociados a la deformación interna de la placa de Nazca debido a las fuerzas que tienden a tirar de la misma hacia el interior del manto, se distribuyen alrededor de

las dos áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877. Esta característica sugiere que a niveles superficiales la energía se está acumulando a fin de generar en los próximos años un terremoto de magnitud proporcional a las áreas de ruptura de los terremotos anteriores. Los terremotos que se producen por encima del límite de contacto o fricción de ambas placas ubicado a 50-60 km de profundidad, obedecen a procesos netamente compresivos (terremotos de 1868 y 1877); mientras que, por debajo de este límite los terremotos son generados por fuerzas extensivas, siendo estos menores en número debido al aumento de la presión y temperatura. En esta situación, es evidente que al nivel de 50-60 km de profundidad, el proceso de subducción se encuentra bloqueado, aunque por arriba continúen los movimientos de compresión y por debajo de extensión, todos generados por sismos de magnitud menor. Sin embargo, al momento de ceder ambas placas debe producirse como mínimo un terremoto de magnitud elevada como los ocurridos en 1868 y 1877.

Conclusiones

Antes de plantear las conclusiones del presente análisis, es necesario considerar que el tamaño y los procesos de ruptura de los terremotos de 1995 y 1996 son similares entre sí y su ubicación epicentral en los extremos de las áreas de ruptura de los terremotos ocurridos en 1868 y 1877, son muestras de que el proceso de fricción de placas es continuo. Estas características, sumadas al hecho de que los terremotos grandes ocurridos en los últimos 10 años presentan profundidades intermedias y se distribuyen entorno a las dos grandes áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877, sugieren que pronto debe ocurrir dos o al menos un terremoto con magnitud Mw del orden de 9.0.

Ahora la pregunta es,

¿...Donde y cuando se produciría el próximo terremoto...?.

Para dar respuesta a esta pregunta es necesario contar con mayor información sísmica a fin de aplicar los nuevos métodos desarrollados para un mejor conocimiento de la génesis de los terremotos, así como para ajustar los modelos propuestos para el

proceso de subducción. Por lo tanto, es importante continuar realizando el registro de la sismicidad en ambas regiones.

Además, no se debe olvidar que el hecho de predecir la ocurrencia de un terremoto implica conocer los siguientes parámetros:

$$\text{Predicción} = \text{Lugar} + \text{Tamaño} + \text{Fecha}$$

La sismología ha llegado a identificar y conocer con exactitud las zonas potencialmente sísmicas y en el caso del Perú, la más importante se ubica frente a la línea de costa (borde Oeste de Sudamérica). El conocer la historia sísmica de cada zona, permite estimar el tamaño de los futuros terremoto que puedan ocurrir en ella; sin embargo, la fecha en que ocurrirá el terremoto no puede ser determinada con exactitud.

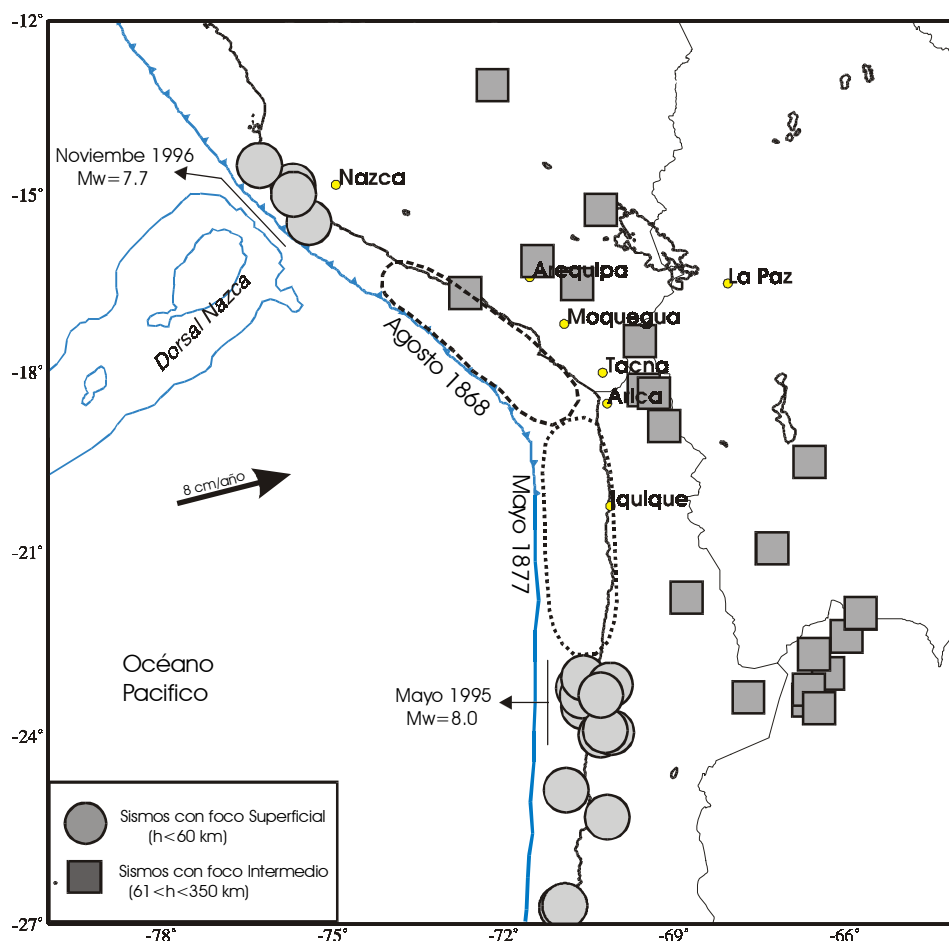


Figura 2. Ubicación geográfica de las áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877, además de los terremotos de magnitud mb igual o mayor a 6.0 ocurridos durante el periodo 1990-2000 en la región Sur de Perú y Norte de Chile.

Se debe tener en cuenta que si no es posible conocer la fecha de ocurrencia del próximo terremoto, el solo saber donde esta la fuente, su posible tamaño y que pronto va a ocurrir, debería ser suficiente para desarrollar campañas de mitigación de desastres teniendo en cuenta la educación de la población y de buscar hacer cada vez menos vulnerables a las ciudades, solo así se podrá hacer frente a este tipo de fenómenos.

Bibliografía

- Comte et al., (1991). Natural Hazards, 4, 23-44.
Delouis et al., (1997). Bull. Seism. Soc. Am., 87, 1-19.
DeMets et al., (1990). Geophys. Jour. Int. 101, 425-478.
Dorbath et al., (1990). Bull. Soc. Sism. Am. 80, 551-576.
Tavera et al., (1998). Revista Geofísica, IPGH, N°49, 143-163.

El día Sábado 23 de Junio de 2001 (15h 33m, hora local), la región Sur de Perú es afectada por un terremoto de magnitud M_w igual a 8.2. La intensidad máxima observada en la escala de Mercalli Modificada fue de VII-VIII; mientras que, su longitud de ruptura alcanzó 370 km aproximadamente. Los daños materiales y personales en toda la región Sur es cuantiosa, 217400 personas sufrieron los efectos del terremoto,....

Nombre de archivo: sismo1
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Historia de un Terremoto Anunciado
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 10:10 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 10:10 A.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 9 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:07 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 1,978 (aprox.)
Número de caracteres: 11,280 (aprox.)

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

Hernando Tavera

*Henry Salas, César Jiménez, Yanet Antayhua, Efrain Fernández
Luis Vilcapoma, Jose Millones, Isabel Bernal, Yolanda Zamudio, Julia Carpio
Consuelo Agüero, Ivonne Pérez-Pacheco, Simeón Rodríguez y Hector Aleman*

Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

El 23 de Junio de 2001 a horas 15 y 33 minutos (hora local), la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud elevada ($ML=6.9$) que en algunos segundos produjo muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna. Los primeros resultados indican que la intensidad máxima observada fue de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM). Después de ocurrido el terremoto, siguió un gran número de réplicas que produjeron en superficie intensidades del orden de IV-V en la escala MM. En este informe se resumen las principales características del terremoto en relación con su fuente, tamaño, réplicas y área total de ruptura. El terremoto del 23 de Junio se constituye como el de mayor magnitud ocurrido en esta región después de 133 años.

Abstract

On June 23, 2001 at 15:33 (local time), southern Peru was shaken by an earthquake of large magnitude ($ML=6.9$) that in few seconds caused death and destruction in Arequipa, Ayacucho, Moquegua and Tacna city. The first results indicate that the maximum intensity observed was VII-VIII in the Modified Mercalli scale (MM). After of the earthquake, a large number of aftershocks produce in surface intensities in the order of IV-V in the MM scale. In this report, the main characteristics of the earthquake are summarized: source, size, aftershocks and total rupture area. The June 23 earthquake is the largest that has occurred in this region in the last 133 years.

Introducción

El día sábado 23 de Junio de 2001 y cerca de las 15 horas con 33 minutos (hora local), un terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter afectó a los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna; además de las ciudades de Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. El epicentro del terremoto fue localizado a 82 km al NW del Departamento de Arequipa y cerca de la línea de costa. Este terremoto tuvo características importantes entre las que se puede mencionar su gran duración debido a la complejidad de su registro que inicialmente podría evidenciar un proceso de ruptura muy heterogéneo, así como el modo de propagación de la energía que produjo el ondulamiento de la superficie y la generación de un tsunami de carácter netamente local. Este terremoto, de carácter superficial, produjo en las primeras 24 horas un total

de 134 réplicas ($ML \geq 3.0$), todas localizadas al SE del epicentro del terremoto principal y sugiriendo la propagación de la ruptura en esa dirección.

En general, las localidades más afectadas por el terremoto del 23 de Junio fueron las de Ocoña, Camaná, Mollendo, Arequipa, Moquegua y Tacna. Asimismo, se ha observado daños materiales de importancia en casi todas las localidades distribuidas cerca de la costa, desde Nazca en Perú hasta Iquique en Chile y hacia el interior del continente, hasta La Paz en Bolivia. De acuerdo con la información obtenida sobre los daños materiales, personales y otros efectos, la intensidad máxima ha sido estimada en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada. Según informes de Defensa Civil y de los diversos medios de comunicación, en las primeras 48 horas de ocurrido el terremoto se contabilizó un total 35 personas muertas en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna.

En este trabajo se presenta los parámetros hipocentrales del terremoto del 23 de Junio, sus posibles implicancias sismotectónicas y efectos del mismo basándose en los cálculos y evaluaciones preliminares realizados por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú.

Características Sismotectónicas de la Región Sur de Perú

La actividad sísmica en Perú es debida principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana, presente de Norte a Sur en su borde Oeste, con una velocidad relativa de 8 cm/año (DeMets, 1990). El margen Oeste de Sudamérica, donde la litosfera oceánica subduce bajo la continental, es uno de los más activos y de los bordes de placa el mayor en la Tierra, siendo su alta velocidad de convergencia la que permite que se genere un fuerte acoplamiento entre ellas, produciendo sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Como resultado de este proceso se ha formado la fosa peruano-chilena y la Cordillera Andina en diferentes períodos orogénicos.

Las características de la sismicidad en Perú y en detalle para la región Sur, ha sido realizada por diversos investigadores (Grange et al., 1984; Schneider y Sacks, 1987; Cahill y Isacks, 1992; Tavera y Buforn, 2001), siendo las principales relacionadas

con la distribución de los focos sísmicos en superficie y en función de su profundidad, tal como se muestra en la Figura 1. En el borde Oeste de Perú, entre la fosa y la línea de costa se concentran los sismos con foco superficial ($h < 60$ km), que al presentar magnitudes elevadas producen diferentes grados de destrucción en superficie y deben su

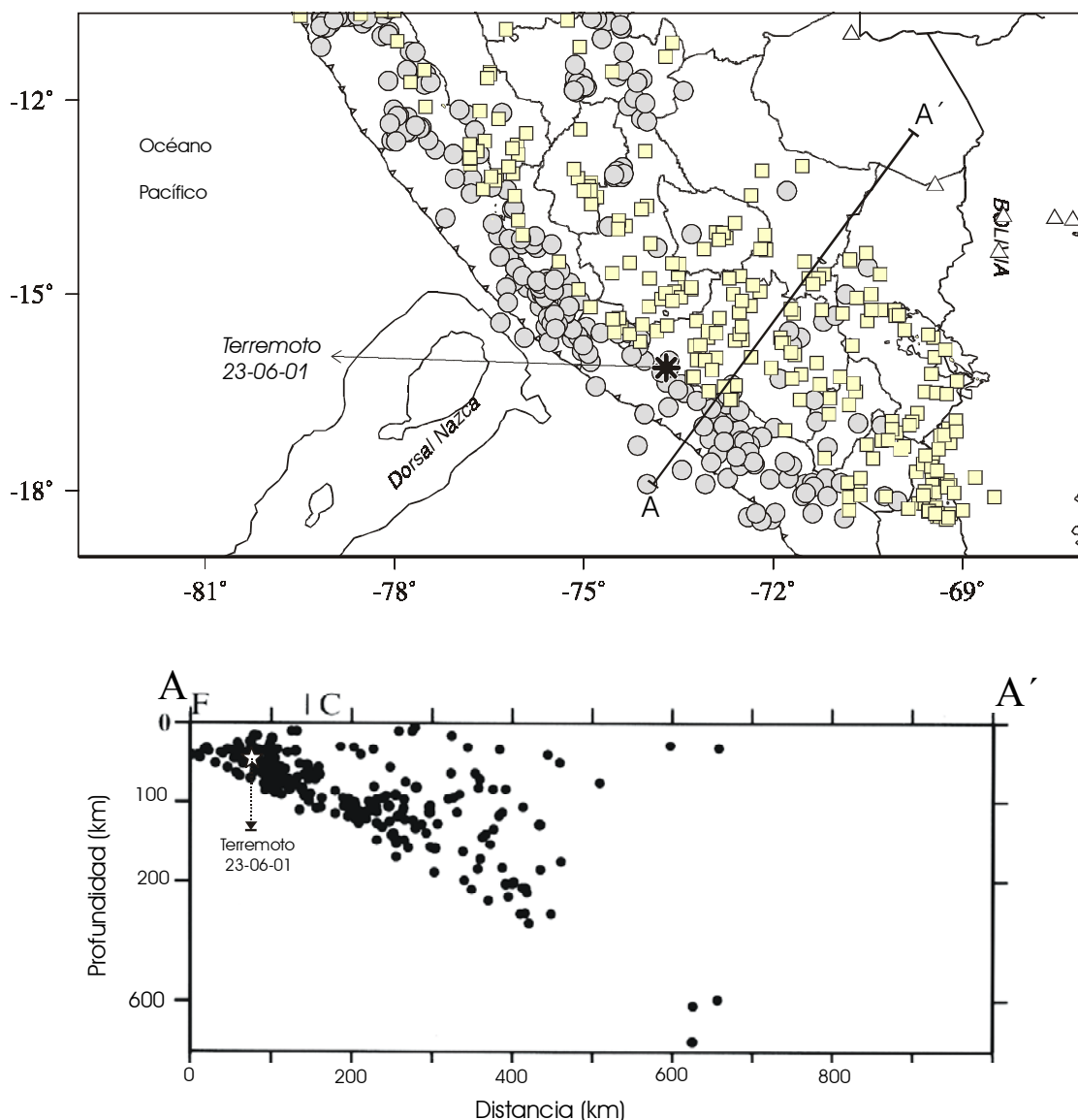


Figura 1.- Sismicidad en la región Sur de Perú para el periodo 1964-1996 ($M > 5.0$) y sección vertical según la línea A-A'. Los círculos muestran los sismos de foco superficial, los cuadrados con foco intermedio y los triángulos con foco profundo.

origen a los procesos compresivos que se desarrollan debido a la colisión de la placa de Nazca y Sudamericana. En la región Sur de Perú, la frecuencia de estos terremotos es menor ya que por lo general, se producen a profundidades intermedias ($h > 60$ km) y generan en superficie intensidades del orden de IV a V en la escala de Mercalli Modificada (por ejemplo, el terremoto del 3 de Abril de 1999, $m_b = 6.0$)

Asimismo, en la Figura 1 se observa que los sismos se distribuyen en función de la profundidad de sus focos siguiendo una alineación, desde la fosa, con un ángulo de 30° hasta alcanzar una profundidad del orden de 250-300 km. Los terremotos con foco superficial se concentran cerca de la costa hasta una distancia de 400 kilómetros desde la fosa (F); mientras que, a mayor distancia estos prácticamente desaparecen.

El terremoto del 23 de Junio de 2001, se produce a una distancia de 70 km aproximadamente al SE del ocurrido el 12 de Noviembre de 1996 (terremoto de Nazca) y al igual que este, tiene su origen en el proceso de colisión y fricción de placas. En la región Sur de Perú, son notables los terremotos ocurridos en 1868 ($M_s = 8.6$) y 1913 ($M_s = 7.7$), y desde entonces hasta la ocurrencia del terremoto del 23 de Junio ha transcurrido 133 años.

El terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

Parámetros hipocentrales.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizó la localización del epicentro del terremoto del 23 de Junio de 2001, en las coordenadas 16.20°S , 73.75°W ; esto es, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña, tal como se muestra en la Figura 2 y en la Tabla 1. Estos resultados en comparación con los reportados por el National Earthquake Information Center (NEIC), presentan diferencias mínimas y se estima que estas se encuentran dentro de los márgenes de error propios de los cálculos realizados. Asimismo, en la Figura 2 se observa que el epicentro del terremoto del 23 de Junio se ubica sobre la línea de costa y entre las localidades de Chala y Ocoña. Además, sobre la Figura 2 se muestra la ubicación epicentral de tres de las réplicas de mayor magnitud ocurridas el 25 de Junio ($M_w = 6.8$), 5 ($M_w = 6.6$) y 7 de Julio ($M_w = 7.5$), las mismas que se ubican frente a las localidades de Ilo y Mollendo sugiriendo que la ruptura iniciada

por el terremoto del 23 de Junio se propagó en dirección SE. La réplica del 5 de Julio se ubica al NE del epicentro del terremoto principal, pero a mayor profundidad.

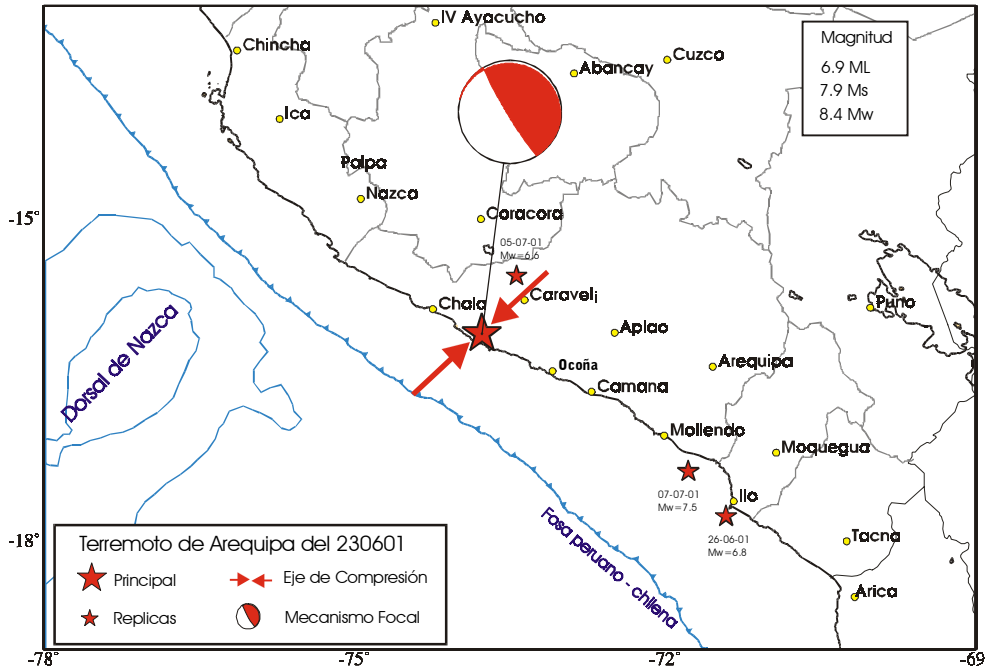


Figura 2. Mecanismo Focal y orientación del esfuerzo principal que dio origen al terremoto del 23 de Junio de 2001. Se indica la ubicación de 3 réplicas principales y los valores de magnitud en diferentes escalas.

Tabla 1.

Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales.

Fecha .dd:mm:aa	H. Origen .hh:mm:ss.s	Lat.-S	Long.-W	Prof. km	Mag.	Agencia
23:06:01	20:23:04.4	16.20°	73.75°	29	6.9 ML	IGP
23:06:01	20:33:13.0	16.15°	73.40°	33	8.4 Mw	NEIC
26:06:01	04:18:31.6	17.73°	71.34°	31	6.8 Mw	NEIC
05:07:01	13:53:49.7	15.56°	73.45°	69	6.6 Mw	NEIC
07:07:01	09:38:43.0	17.38°	71.78°	26	7.5 Mw	NEIC

Durante las primeras 24 horas de haber ocurrido el terremoto de Arequipa del 23 de Junio, la Red Sísmica Nacional registró un total de 134 réplicas ($ML \geq 3.0$), muchas de las cuales han producido intensidades entre III y V en MM en la ciudad de Arequipa.

Estimación de la Profundidad

La profundidad de foco del terremoto de Arequipa, no pudo ser determinada con precisión debido a que la mayor parte de los registros sísmicos utilizados en su localización presentaban su señal totalmente saturada, de ahí que los algoritmos utilizados proporcionaran por defecto un valor de 33 km, igual al reportado por el NEIC (Tabla 1). A fin de cuantificar la profundidad del foco del terremoto de Arequipa, se procedió a utilizar un método directo basado en el cálculo de la diferencia de tiempos de llegada de las fases pP y P. Para tal objetivo, se ha leído los tiempos de llegada de estas fases en los registros de tres estaciones de la red mundial localizadas a distancias entre 40° y 56° . En la Figura 3 se presenta un ejemplo del registro en velocidad y desplazamiento del terremoto de Arequipa correspondiente a la estación de SSPA (ciudad de Pennsylvania U.S.A) ubicada a una distancia de 56° desde el epicentro del terremoto y en ella se indica con flechas la llegada de las fases pP y P. De acuerdo al análisis realizado, la diferencia promedio de $T_{pP} - T_P$ es de 9.1 segundos. Utilizando las tablas de recorrido-tiempo del IASPEI (Kennett, 1991), la diferencia en los tiempos de llegada equivale a una profundidad para el foco sísmico de 29-31 km. Esta profundidad pone en evidencia el carácter superficial del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001.

Características de la Señal Sísmica

Los registros del terremoto del 23 de Junio, obtenidos de la red sísmica nacional, han permitido inicialmente observar su carácter complejo, el mismo que sugiere la posible ocurrencia de rupturas aleatorias propias de terremotos de magnitudes elevadas. En la Figura 4 se presenta el registro de la estación de Pucallpa (PUC) ubicada a 800 km aproximadamente en dirección Norte con relación al epicentro del terremoto. En esta figura se observa que el grupo de la fase P tiene una duración del orden de 100 segundos, tiempo durante el cual es posible identificar la presencia de varios cambios de frecuencias y amplitudes equivalentes a igual número de fases sísmicas. Es posible que muchas de estas fases correspondan a diferentes rupturas, a ondas reflejadas o

refractadas en las capas granítica y basáltica; por lo tanto, es necesario filtrar la señal a fin de eliminar las altas frecuencias o considerar registros obtenidos en el campo lejano.

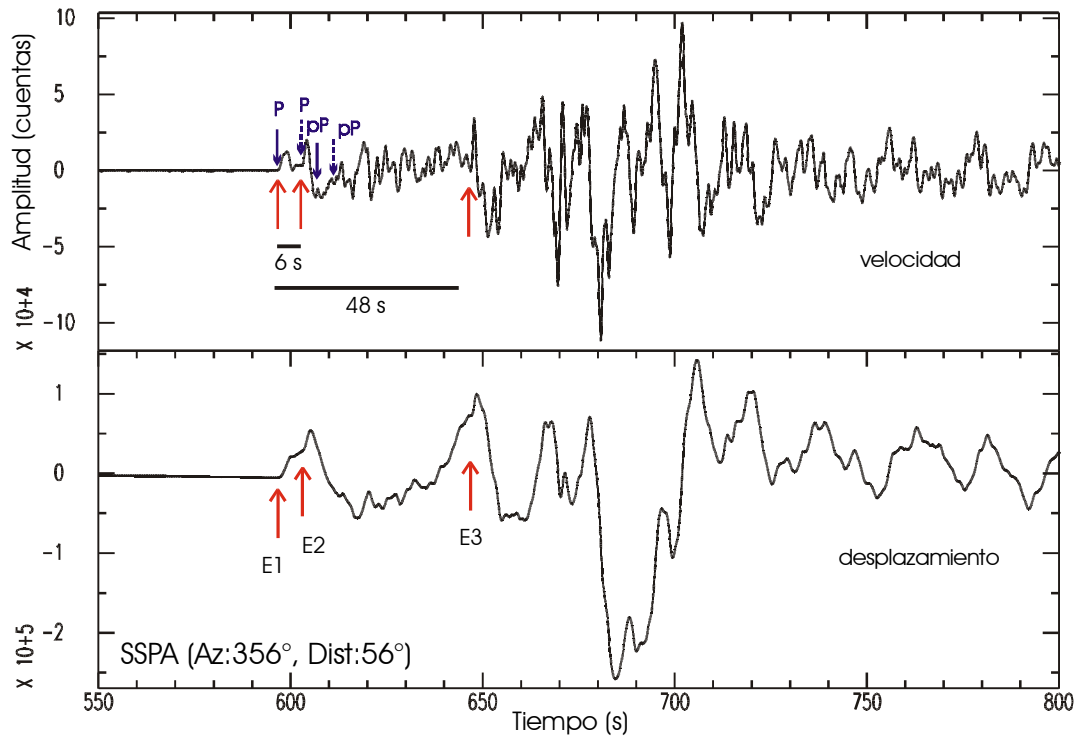


Figura 3. Registros sísmicos en velocidad y desplazamiento del Terremoto del 23 de junio de 2001 en la estación SSPA. Las flechas en gris indican el número de rupturas y las barras horizontales el intervalo de ocurrencia de las rupturas a partir del primer arribo de la onda. Las flechas discontinuas indican el tiempo de llegada de las fases utilizadas en el cálculo de la profundidad del terremoto.

El registro en velocidad y desplazamiento de la estación SSPA (distancia epicentral de 56°) es posible observar que el tren de onda correspondiente a la fase P tiene una duración de aproximadamente 100 segundos y en ella se puede distinguir la presencia de hasta tres cambios importantes de frecuencia y amplitud, las mismas que pueden ser asociadas a la ocurrencia de otros terremotos o rupturas secundarias que se producirían después de 6 y 38 segundos de la primera. El último terremoto o ruptura es mayor debido a que la amplitud de su señal es mayor que los dos anteriores. En la Figura 3, las posibles rupturas son indicadas con las letras E1, E2 y E3.

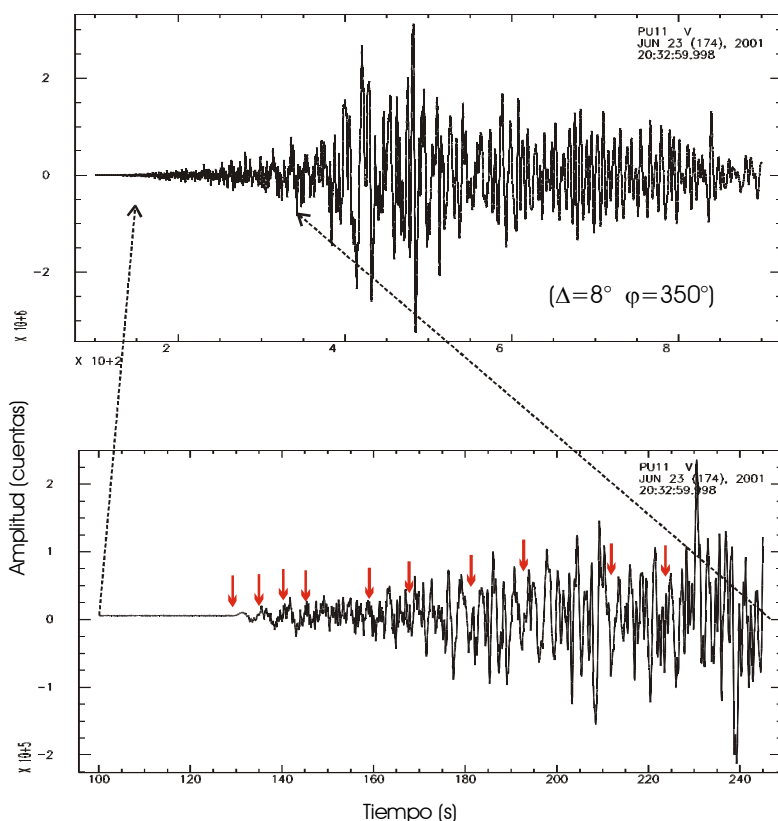


Figura 4.- Registros de la componente vertical (V) del terremoto del 23 de Junio en la estación sísmica de Pucallpa (PUC) perteneciente a la Red Sísmica Nacional. En la figura superior se muestra el registro del terremoto y en la inferior la correspondiente al grupo de la onda P. En esta figura se muestra con flechas los diferentes grupos de ondas que evidencian la complejidad de la señal. En paréntesis se indica la distancia epicentral y azimut en grados.

Orientación de la Fuente Sísmica y Momento Sísmico Escalar

La orientación de la fuente que dió origen al terremoto del 23 de Junio ha sido conocida a partir de su mecanismo focal, el mismo que fue inicialmente calculado por la Universidad de Harvard (CMT) y corroborada con los valores de polaridad para la onda P obtenidas de las estaciones de la red sísmica nacional y mundial. La solución para el mecanismo focal se presenta en la Figura 2 y corresponde a un mecanismo de tipo inverso con un plano nodal casi vertical y el otro prácticamente horizontal, ambos orientados en dirección NNW-SSE. De acuerdo a las características del proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamérica, de los dos planos nodales, el que buza de manera casi horizontal (buzamiento de 7°) en dirección E-NE correspondería al plano de falla. En estas condiciones, el eje de esfuerzo principal o eje de compresión P

se orienta en dirección N55° (flecha en la Figura 2), coherente con la dirección de convergencia de las placas en la región Sur de Perú.

Asimismo, la Universidad de Harvard (método del CMT) ha calculado para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio un Momento Sísmico Escalar de $4.8E+21$ Nm, equivalente a una magnitud Mw de 8.4.

Distribución de Intensidades

La información utilizada para evaluar las intensidades regionales debidas al terremoto del 23 de Junio, fue obtenida vía línea telefónica inmediatamente después de ocurrido el mismo. En general, el terremoto fue sentido con intensidades de II MM al Norte del departamento de Lima y por el Sur en la ciudad de Antofagasta en Chile. Hacia el interior del continente, el terremoto produjo alarma en la población de la ciudad de La Paz en Bolivia. Las intensidades máximas fueron de VII-VIII y estas corresponden a las localidades de Ocoña, Camaná y Mollendo, de VII en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, siendo en estas últimas en donde se produjo el mayor rango de destrucción y muerte. Es importante resaltar que la mayor parte de las viviendas afectadas estuvieron construidas de adobe y quincha a excepción de la ciudad de Arequipa, en donde las viviendas de material noble sufrieron daños importantes.

Asimismo, la DIREMER Región I de Chile, informó que el terremoto de Arequipa produjo en la ciudad de Arica intensidades del orden de VII, en Iquique de VI y en Calama de IV-V en la escala Mercalli Modificada.

Otros efectos

Ocurrido el terremoto del 23 de Junio, este produjo otros efectos secundarios como deslizamientos, derrumbes de tierra y piedras sobre la Panamericana Sur y en algunas vías de penetración a las zonas andinas entre las localidades de Ocoña y Camaná. Fenómenos de licuación de suelos fueron observados en las localidades de Yauca, ocoña, Camaná, Tambo, Locumba y franja costera entre Mejía y Punta de Bombón. En la Panamericana Sur, entre Atico y Pescadores a la altura del kilometro 727 se observó la presencia de agrietamientos en el suelo, así como en Ilo (Moquegua) y La Yarada (Tacna).

Otro efecto importante es el tsunami de carácter netamente local, que se produjo 15 minutos después de ocurrido el terremoto de Arequipa. Las localidades más afectadas fueron Camaná, Ocoña, Quilca y Matarani. En Camaná, las olas alcanzaron alturas de hasta 7 metros llegando a ingresar por el valle hasta un kilómetro y medio de distancia causando muerte y destrucción, al igual que en el circuito de playas.

Asimismo, pobladores cercanos a los volcanes Misti y Sara Sara informaron que estos incrementaron su actividad fumarólica.

Interpretación y Discusión

La mayor fuente de actividad sísmica en el Perú, la constituye el proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana generando con el tiempo, terremotos de diversas magnitudes a diferentes rangos de profundidad. A diferencia de las regiones Norte y Centro de Perú, en la región Sur los sismos se distribuyen, en profundidad, siguiendo una línea con pendiente cercana a 30° en dirección NE hasta una profundidad de 250 km aproximadamente (Figura 1). El terremoto del 23 de Junio se localizaría en la parte inicial de esta alineación de sismos. El epicentro de este terremoto se ubica sobre la línea de costa y entre las localidades de Chala y Ocoña.

La complejidad del proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio, ha permitido que las diversas agencias nacionales e internacionales reporten diferentes valores para la magnitud del mismo, además estos variaban con el tiempo de acuerdo a la mayor información disponible y en función de la escala de magnitud utilizada por las agencias para cuantificar el real tamaño del terremoto. Así, el IGP estima la magnitud del terremoto en la escala de Richter en 6.9; mientras que, el NEIC reporta una magnitud mb de 6.6, magnitud Ms de 7.9 y posteriormente una magnitud Mw de 8.2-8.4.

El terremoto del 23 de Junio tiene su origen en el proceso subducción a niveles muy superficiales; por lo tanto, su fuente es representada mediante un mecanismo focal de tipo inverso debido a la presencia de esfuerzos netamente compresivos orientados, en este caso, en dirección N55°. En general, las características del mecanismo focal

sugieren que el plano de falla se orienta en dirección NW-SE y presenta su buzamiento casi horizontal en dirección ENE.

La distribución espacial de tres de las réplicas de mayor tamaño sugieren un proceso de ruptura que se propaga en dirección SE sobre una extensión del orden de 370 km. Esta característica es coherente con la distribución de daños o valores máximos de intensidad evaluados en la región Sur de Perú.

Por otro lado, la calidad de los datos han permitido observar que los terremotos de magnitud elevada siempre obedecen a procesos de ruptura muy complejos, principalmente si estos ocurren sobre la superficie de contacto de las placas. Para el terremoto del 23 de Junio, el proceso de ruptura o fricción de placas fue lento durante los primeros segundos y dado el carácter superficial del mismo, es posible que este haya producido un movimiento horizontal paralelo a la superficie con ligeras ondulaciones de la misma, para que después de aproximadamente 38 segundos se produjeran movimientos mayores debido a la ocurrencia de una ruptura mayor y por ende, la energía liberada se incremento generando mayor destrucción y daño en las diversas localidades distribuidas al SE del epicentro del terremoto.

Bibliografía

- Cahill y Isacks, (1992). *J. Geophys. Res.*, 97, 17503-17529.
- DeMets et al., (1990). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.
- Grange et al., (1984). *J. Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.
- Kennett (1991). *Res. School. Earth. Sci., Camberra*, 167 pp.
- Schneider J. y Sacks S. (1987). *J. Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- Tavera y Buforn (2001). *Journal of seismology*, 5, 519-539.

Nombre de archivo: sismo2
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: INTRODUCCION
Asunto:
Autor: HERNANDO TAVERA
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 11:47 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 11:47 A.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 97 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:22 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 12
Número de palabras: 2,628 (aprox.)
Número de caracteres: 14,983 (aprox.)

Estimación del Tamaño del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Isabel Bernal

Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este trabajo se presenta los valores de magnitud calculados para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 a partir de los diversos procedimientos establecidos internacionalmente para estimar este parámetro a partir del uso de diferentes fases y tipos de registro de la señal sísmica. Los valores de magnitud fueron obtenidos por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y por el National Earthquake Information Center (NEIC). Los resultados sugieren que los valores de magnitud calculados utilizando datos regionales son menores que los obtenidos haciendo uso de registros en el campo lejano. Asimismo, la magnitud M_w obtenida del momento sísmico escalar es similar al estimado a partir de la altura máxima de la ola del tsunami generado por el terremoto de Arequipa.

Abstract

In this study is presented the different magnitude values calculated for the June 23, 2001 Arequipa earthquake based on several internationally established procedures to estimate this parameter from use of different phases and types of seismic signal records. The magnitude values were obtained by the Instituto Geofísico del Perú (IGP) and by the National Earthquake Information Center (NEIC). The results suggest that the magnitude values calculated using regional data are smaller than those obtained using the teleseismic records. Also, the M_w magnitude obtained from the scalar seismic moment and energy is similar to that estimated from the maximum height of the tsunami wave generated by the Arequipa earthquake.

Introducción

El último terremoto que afectó a toda la región Sur de Perú, ocurrió el 23 de Junio de 2001 y de acuerdo a su tamaño, este ha sido considerado como el mayor de los ocurridos en la última centuria en esta región. El terremoto produjo intensidades máximas del orden de VII-VIII (MM), siendo los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna en Perú, además de las ciudades de Arica e Iquique en Chile quienes soportaron los mayores efectos causados por el terremoto.

El tamaño del terremoto de Arequipa, en función de su magnitud, fue reportado por el Instituto Geofísico del Perú y diversas agencias internacionales con valores totalmente diferentes en virtud al uso de las diversas escalas existentes para expresar este parámetro. En general, la magnitud es calculada a partir de la amplitud máxima del

registro del sismo en un sismógrafo debidamente calibrado y sus variadas medidas son expresiones logarítmicas de la cantidad de energía liberada. En estas condiciones, para calcular la magnitud de un sismo se debe corregir la amplitud de su registro, dependiendo del tipo de sismógrafo, en función de la distancia epicentral, profundidad del foco y además del tipo de suelo en donde está ubicada la estación de registro. Así, el valor mínimo dependerá de la sensibilidad del sismógrafo y el máximo de la longitud de la fractura producida por el sismo de un solo golpe. A la fecha, existen diferentes escalas de magnitud para medir el tamaño de los sismos y estas dependen básicamente de la distancia a la cual se registra el sismo y al tipo de onda sísmica que se utiliza para su cálculo. De estas escalas, las más importantes son las que permiten estimar la Magnitud Local (ML), Magnitud Ondas de Volumen (mb), Magnitud Ondas Superficiales (Ms), Magnitud Tsunami (Mt), Magnitud Duración (MD), Magnitud Energía (Me) y Magnitud Momento (Mw).

Para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio, las agencias nacionales e internacionales proporcionaron los valores de magnitud en cada una de las escalas antes indicadas, hecho que produjo confusión en los medios informativos y público en general. En este estudio se describe de manera resumida cada una de las escalas frecuentemente utilizadas (Tavera, 2001) y se consigna los diferentes valores obtenidos para el terremoto de Arequipa. La información procede del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y del National Earthquake Information Center (NEIC).

Tipos de Magnitud

Magnitud local (M_L). La magnitud local hace referencia a la escala de Richter, siendo esta definida como:

$$ML = \text{Log } A(\Delta) - \text{Log } A_0(\Delta)$$

donde, A representa la amplitud máxima en el registro del sismo para el cual se desea calcular su magnitud, A_0 a la amplitud para el sismo de magnitud cero y Δ la distancia epicentral. Para una estación diferente a Wood-Anderson y para una región en

particular, se debe realizar la corrección en distancia contenida en el término A_0 antes de establecer una correspondencia entre el sismógrafo utilizado y el WA

Magnitud de Ondas de Volumen (m_b). Esta magnitud considera la relación existente entre la amplitud y el periodo predominante en el registro del sismo en la componente vertical para una onda P o S (ondas de volumen). Esta escala es válida para sismos ocurridos a diferentes profundidades y registrados a distancias comprendidas entre 5° y 90° . La relación que permite calcular m_b es conocida como la fórmula de Gutenberg,

$$m_b = \text{Log} (A/T) + Q(\Delta, h)$$

donde, A es la amplitud de la señal sísmica medida sobre la componente vertical de registro (micras), T el periodo (seg) y Q el factor de atenuación de la onda expresado en función de la distancia epicentral (Δ) y la profundidad del foco (h) según las tablas de Gutenberg y Richter (1956).

Magnitud de Ondas Superficiales (M_s). Esta magnitud es válida para sismos con foco superficial y en la cual la amplitud máxima de su registro debe ser medida en el grupo de las ondas Rayleigh con periodos (T) entre 18 – 22 segundos. Las correcciones deben considerar la distancia epicentral y la profundidad del foco del sismo. La relación establecida para esta escala es:

$$M_s = \text{Log} (A/T) + 1.66 \text{Log} \Delta + 3.3$$

donde, A es la amplitud del desplazamiento del suelo en micras y Δ la distancia epicentral en grados. La formula anterior es válida para sismos registrados a distancias comprendidas entre $20^\circ < \Delta < 90^\circ$ y para sismos con focos localizados a profundidades menores a 70 km.

Magnitud Duración (MD). Magnitud que considera la duración del registro de la señal del sismo, desde la llegada de la onda P hasta cuando la amplitud de la señal se confunde con el ruido de fondo. Esta magnitud es definida con la siguiente relación:

$$M(D) = a + b \text{Log}(t) + c \text{Log}(t^2) + d \Delta$$

donde, t es la duración del registro del sismo en segundos; Δ la distancia epicentral en km; a , b y c son constantes a determinarse para cada estación.

Magnitud Tsunami (Mt). Magnitud estimada a partir de la altura máxima de las olas producidas por el tsunami mediante la relación propuesta por Dorbath et al (1990) para terremotos que ocurren en el borde Oeste de Perú. La relación que permite estimar esta magnitud es:

$$M_t = 1.1 \log(H_r) + 7.7$$

donde, H_r es la altura de la ola expresada en metros.

Magnitud Momento (Mw). Magnitud basada en el valor del momento sísmico (M_o), el mismo que es obtenido a partir de los parámetros que relacionan la geometría de la falla, la profundidad del foco y el desplazamiento máximo producido durante el sismo. Según Aki (1966), el momento sísmico puede ser calculado a partir de la siguiente relación:

$$M_o = \mu \cdot A \cdot \Delta u$$

donde, μ es el módulo de rigidez, A el área de la falla y Δu el desplazamiento medio sobre el plano de falla.

El momento sísmico es una medida más consistente del tamaño de un sismo y hoy en día, es el parámetro más importante. Este factor a dado lugar a la definición de una nueva escala denominada magnitud momento (Kanamori, 1977):

$$M_w = (2/3) \text{Log} (M_0) - 6.0$$

donde, M_0 es expresado en Nm.

Magnitud Energía (Me). La magnitud energía permite medir el potencial del daño causado por el terremoto y es obtenido a partir del valor de la energía sísmica irradiada. La relación que permite estimar este parámetro es:

$$M_e = (2/3) \text{Log} (E_s) - 2.9$$

La energía total liberada por un sismo es difícil de calcular con precisión debido a que ella es la suma de la energía disipada en forma térmica por la deformación en la zona de ruptura y la energía emitida como ondas sísmicas (calculada a partir del registro del terremoto). La energía sísmica puede ser estimada desde el espectro de energía según la metodología desarrollada por Boatwright y Choy (1986) y a partir de la magnitud de los sismos (m_b , M_s , M_w) según las siguientes relaciones:

$$\text{Log } E = 5.8 + 2.4 m_b$$

$$\text{Log } E = 11.8 + 1.5 M_s (M_w)$$

Resultados obtenidos para el Terremoto de Arequipa

En la Tabla 1 se presenta todos los valores de magnitud obtenidos para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. En general, los valores de magnitud obtenidos a escala regional por el IGP (ML y MD) y el NEIC (m_b) son menores a los reportados en otras escalas y cuyas diferencias son frecuentemente observados cuando los terremotos son originados por procesos complejos de ruptura. Estas características permiten que se produzca, en muchos casos, la saturación de algunas escalas cuando los valores de magnitud son muy elevados, tal como suele ocurrir con las magnitudes m_b y M_s .

Tabla 1

*Magnitud para el terremoto de Arequipa expresados en diferentes escalas.
N.Est.=número de registros utilizados en el cálculo*

Tipo de Escala	Magnitud IGP	Magnitud NEIC	N. Est.
Magnitud Local (ML)	6.9	-	2
Magnitud Ondas Volumen (mb)	-	6.6	56
Magnitud Ondas Superficiales (Ms)	7.9	7.9-8.2	84
Magnitud Duración (MD)	6.5	-	2
Magnitud Tsunami (Mt)	8.6	-	-
Magnitud Momento (Mw)	8.2	8.4	-
Magnitud Energía (Me)	8.4	7.8	-

El avance logrado en la sismometría ha permitido proponer y utilizar nuevos métodos y procedimientos para estimar el tamaño de los terremotos. Así, es posible separar del registro del terremoto la influencia de la estación y del medio de propagación para disponer de una señal equivalente al desplazamiento real del suelo producido durante la ocurrencia del terremoto. En estas condiciones y con la señal disponible se elaborara el espectro de amplitud para estimar el momento sísmico escalar a partir de la cual se puede conocer la magnitud momento (ver Tavera y Antayhua, este volumen). Asimismo, a partir del espectro de energía se estima la cantidad de energía sísmica y la magnitud energía (Me). Estos valores de magnitud, debido a como fueron calculados, no producen saturación de escala y permiten conocer el tamaño real del terremoto.

Otro procedimiento utilizado frecuentemente para conocer el tamaño de los terremotos, es a partir de la altura máxima de la ola del tsunami, tal como lo propone Dorbath et al (1990). A partir de este procedimiento indirecto y asumiendo que el tsunami producido por el terremoto de Arequipa presentó olas con una alturas medias de 7 metros, se estima un valor de magnitud ligeramente mayor que los obtenidos utilizando métodos directos (Tabla 1).

A partir del análisis espectral, en este estudio se obtiene un momento sísmico de $1.2E+21$ Nm y una cantidad de energía sísmica del orden de $1.2E+17$ Nm. De acuerdo a estos valores, el terremoto de Arequipa liberó tanta energía como la que liberaría 1'800,000 toneladas de TNT.

Bibliografía

Aki, K. (1966). Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo. 44, 73-88.

Dorbath et al (1990). Bull. Seism. Soc. Am., 80, 551-576.

Gutenberg, B. y Richter, F. (1956). Annali di Geofisica, 9, 1-15.

Kanamori, H. (1977). J. Geophys. Res., 82, 2981-2987.

Tavera, H. (2001). Revista Geonoticias, N°4, Año VII, 22-24.

Nombre de archivo: sismo3
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: El Tamaño de los Terremotos
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 11:52 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 11:52 A.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 4 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:27 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 1,682 (aprox.)
Número de caracteres:9,593 (aprox.)

Intensidades Regionales asociadas al Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

*Hernando Tavera, Efrain Fernández, Luis Vilcapoma
Yanet Antayhua, Ivonne Perez-Pacheco
Centro Nacional de Datos Geofísicos – Sismología*

Resumen

En este estudio se presenta el Mapa de Intensidad Regional correspondiente al Terremoto del 23 de Junio de 2001 ocurrido en la región Sur de Perú. La información utilizada ha sido obtenida a partir de interrogaciones telefónicas realizadas inmediatamente después de ocurrido el terremoto y mediante encuestas in situ. Esta información ha permitido elaborar dos Mapas de Intensidad Regional utilizando las escalas de Mercalli Modificada (MM) y MSK. Los resultados obtenidos indican que el terremoto de Arequipa produjo una intensidad máxima de VII-VIII en la escala MM dentro de una área elipsoidal con eje mayor de 320 km de longitud; mientras que, en la escala MSK la intensidad máxima es del orden de 6 grados. En ambos casos, el epicentro del terremoto del 23 de Junio se ubica en el extremo NE del área de intensidad máxima. Asimismo, se presenta los mapas de intensidad regional en la escala Mercalli Modificada para las réplicas de magnitud mayor ocurridas el 25 de Junio, 5 y 7 de Julio de 2001.

Abstract

In this study is presented the Map of Regional Intensity to the June 23, 2001 earthquake occurred in the southern region of Peru. The information has been obtained by telephonic interrogations immediately after the earthquake and through surveys in situ. This information has permitted to elaborate two Maps of Regional Intensity based on the Modified Mercalli (MM) and MSK scales. The results obtained indicate that the earthquake present a maximum intensity of VII-VIII in the MM scale in ellipsoidal area with a principal axis 320 km long. In MSK scale, the maximum intensity is of the order of 6 degrees. In either case, the epicenter of the June 23, earthquake is located in the extreme NE of the maximum intensity area. We also present the maps of regional intensity for the aftershocks of larger magnitude, which occurred on June 25, July 5 and July 7 in Modified Mercalli scale.

Introducción

El terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (15h33m, hora local), se constituye como el de mayor tamaño de todos los ocurridos en la región sur de Perú en la última centuria. El epicentro del terremoto fue localizado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Departamento de Arequipa) y tuvo una magnitud de 6.9 en la escala de Richter. Este terremoto afectó principalmente a los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna en donde produjo muerte y destrucción. La estadística final indica que aproximadamente 217,400 personas sufrieron los efectos del terremoto, además de 35,000 viviendas dañadas y alrededor de 17,580 totalmente

destruidas. Asimismo, el tsunami de carácter local que afectó a la localidad de Camaná, produjo la muerte de 23 personas y otras 64 fueron declaradas como desaparecidas.

Conocidos los parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa, se procedió a realizar la evaluación de los efectos y daños causados por el mismo en toda la región Sur del Perú siguiendo dos procedimientos. Primero, la información fue obtenida mediante llamadas telefónicas a las localidades y ciudades afectadas por el terremoto inmediatamente después de ocurrido el mismo. Así, se llegó a disponer de información confiable sobre los daños y efectos generales causados por el terremoto en las personas y estructuras. La información fue proporcionada principalmente por personal de las municipalidades, policía nacional, compañía de bomberos, hospitales y algunas veces por personas naturales. El total de la información disponible ha sido interpretada con la escala de intensidades de Mercalli Modificada.

Por otro lado, y después de ocurrido del terremoto de Arequipa, personal del Instituto Geofísico del Perú se desplazó a la región Sur a fin de realizar la evaluación in situ de los efectos y daños causados por el terremoto. En este caso, las encuestas fueron realizadas utilizando los formularios correspondientes a los “Formatos de Encuesta de Intensidades y Efectos en Construcciones”. La información obtenida fue interpretada utilizando la escala MSK-64 en su versión adaptada por Ocola (1979) para ser usada en Perú.

Intensidades en la Escala Mercalli Modificada

La información disponible y utilizada para elaborar el Mapa de Intensidades del terremoto del 23 de Junio en la escala Mercalli Modificada consta de 34 fichas. La evaluación de dicha información ha permitido considerar de manera inicial los siguientes valores de intensidad:

- .- Intensidad VIII:* Localidades de Ocoña, Cocachacra, Camaná, Mollendo, El Arenal, Punta de Bombón.
- .- Intensidad VII-VIII:* Localidad de Corire.
- .- Intensidad VII:* Localidades de Caravelí, Yura, Chuquibamba, Chala y la ciudad de Arequipa (Departamento de Arequipa). Ciudad de Moquegua y

- localidad de Ilo (Departamento de Moquegua). Ciudad de Tacna y localidades de Locumba y Toquepala (Departamento de Tacna).
- .- *Intensidad VI*: Localidades de Pampacolca en el Departamento de Arequipa y Candarave y Calana en Tacna.
 - .- *Intensidad V*: Localidad de Puquio en el Departamento de Ayacucho.
 - .- *Intensidades IV-V*: Localidad de Coracora en el Departamento de Ayacucho.
 - .- *Intensidad de IV*: Localidad de Cangallo en el Departamento de Ayacucho y Andahuaylas en Apurímac.
 - .- *Intensidad III*: Localidades de Huanipaca y Tamburgo en el Departamento de Apurímac y Espinar y Paruro en el Departamento de Cusco. Asimismo, en la ciudad de Huancavelica.
 - .- *Intensidad II*: Ciudades de Lima y Huancayo.

Por otro lado, la Dirección de Emergencias de la Región I de la República de Chile informó que el terremoto del 23 de Junio produjo en las ciudades de Arica e Iquique intensidades de VII y VI en la escala Mercalli Modificada.

En la Figura 1 se presenta el Mapa de Intensidades en la escala Mercalli Modificada correspondiente al terremoto del 23 de Junio. En dicha figura, se observa que el valor de la intensidad máxima es de VIII y considera un área elipsoidal con el eje mayor de 320 km de longitud paralelo a la línea de costa. Asimismo, en la figura se puede ver que el epicentro del terremoto se ubica en el extremo NE de dicha área y que la distribución y geometría de las isosistas de grado VIII y VII consideran a las ciudades y localidades que soportaron los mayores efectos y daños causados por el terremoto. Por otro lado, en Figura 1 se observa que para una distancia de 570 km en dirección NE con respecto al epicentro del terremoto, el valor de intensidad es de II (MM); mientras que, en dirección SE es del orden de VI (MM). Esta diferencia en intensidad sugiere que la mayor cantidad de energía emitida por el terremoto se propagó en dirección SE.

Intensidades en la Escala MSK

Los formatos de Encuesta de Intensidades y Efectos en Construcciones obtenidos de toda la región Sur de Perú, ha permitido organizar una base de datos de 667 encuestas. Inicialmente, esta información fue utilizada para elaborar los mapas de

Intensidades Macrosísmicas para las ciudades de Arequipa y Moquegua (Fernández et al, en este Informe), Tacna e Ilo (Agüero et al, en este Informe), para las provincias de Caravelí y Camaná (Zamudio y Valdivia, en este Informe), además de las localidades de Corire, Aplao, Chuquibamba, Mollendo, y Punta de Bombón. Una vez construidos los mapas de intensidades macrosísmicas, se procedió a considerar los valores promedios a fin de identificar el valor de intensidad representativo para cada ciudad y localidad evaluada. Esta información permitió organizar una nueva base de datos compuesta por 80 valores de intensidad, la misma que fue utilizada para elaborar el Mapa de Intensidades en la escala MSK que se presenta en la Figura 2.



Figura 1. Mapa de intensidad Regional en la escala Mercalli Modificada para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Los números indican los nombres de algunas localidades contenidas en el recuadro superior.

El mapa de Intensidades MSK (Figura 2), a diferencia de las intensidades MM, considera únicamente el territorio peruano y a las ciudades de Arica en Chile y La Paz en Bolivia. En la Figura 2 se observa que el valor de intensidad máxima es de 6 grados y cubre un área elipsoidal paralela a la línea de costa que considera a las localidades distribuidas entre Chala al NW del epicentro, hasta la ciudad de Arica (Chile) por el SE. El epicentro del terremoto se ubica en el extremo NE del área de intensidad máxima y al igual que el mapa de intensidades en la escala MM, la geometría y distribución de las isosistas sugieren que la energía liberada por el terremoto se ha propagado en dirección SE.

Discusión

La información sobre los efectos y daños causados por el terremoto del 23 de Junio en toda la región Sur de Perú fue obtenida mediante dos procedimientos, interrogaciones por medio de llamadas telefónicas realizadas inmediatamente después de ocurrido el terremoto y mediante encuestas in situ. Así, la información obtenida ha permitido elaborar el Mapa de Intensidades Regionales en la escala Mercalli Modificada y MSK. En ambos mapas las isosistas se distribuyen de manera elipsoidal y paralelas a la línea de costa, similar a los mapas de intensidad de otros terremotos con origen en el proceso de fricción de placas.

Se ha observado que el área de intensidad máxima en la escala MSK corresponde al grado 6, siendo esta proporcional al área definida en la escala Mercalli Modificada con valores de VII-VIII; mientras que, para las áreas con intensidades menores, los valores en ambas escalas son prácticamente los mismos. Las diferencias observadas en los valores de intensidad máxima pueden ser atribuidas al procedimiento seguido para la obtención de la información, más no a la interpretación de la misma.

En ambos mapas se observa que las áreas de intensidad máxima considera a las localidades mas afectadas por el terremoto, todas ubicadas cerca de la costa de los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna en Perú, además de Arica e Iquique en Chile.

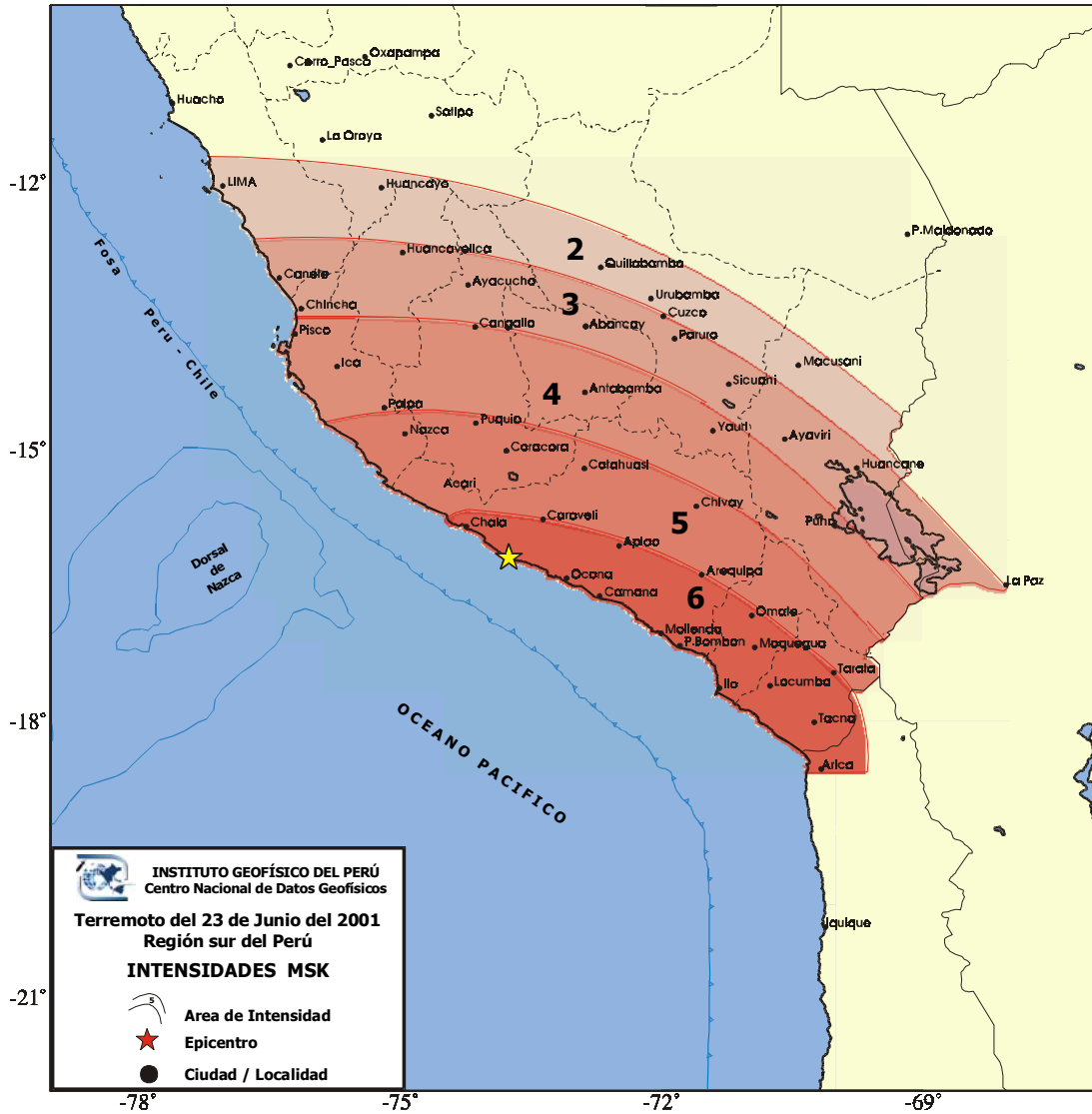


Figura 2. Mapa de Intensidades Regionales en la escala MSK para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

De acuerdo a las Figuras 1 y 2, a similares distancias desde el epicentro del terremoto, en dirección SE los valores de intensidad son aproximadamente el doble que las evaluadas en dirección NW. La forma y geometría de las isosistas, con mayor elongación hacia el SE, sugiere que la mayor cantidad de energía se ha liberado en esa dirección, lo cual es coherente con lo indicado por Tavera et al. (en este informe) y Antayhua et al. (en este informe) a partir del modelado de ondas de volumen y distribución espacial de las replicas del terremoto de Arequipa.

En este estudio se ha presentado dos mapas de intensidad para el terremoto del 23 de Junio de 2001 expresados en las escalas de Mercalli Modificada y MSK, siendo el usuario quien debe decidir que información considerar en sus estudios e investigaciones.

Apéndice

Durante los primeros 15 días de ocurrido el terremoto del 23 de Junio, se produjo tres réplicas de magnitud mayor el 25 de Junio (23h18m, hora local; Mw=6.8), 5 de Julio (8h53m, hora local; Mw=6.6) y el 7 de Julio (4h38m, hora local; Mw=7.5). Estas replicas fueron localizadas al SE del epicentro del terremoto de Arequipa a excepción de la replica del 5 de Julio que presentó su epicentro en dirección NE y a mayor profundidad (Tavera, en este informe). Para estas replicas, al igual que para el terremoto principal, se procedió a realizar las evaluaciones de intensidad regional por medio de llamadas telefónicas a fin de elaborar sus respectivos mapas de intensidad en la escala Mercalli Modificada y que se presentan en la Figura 3.

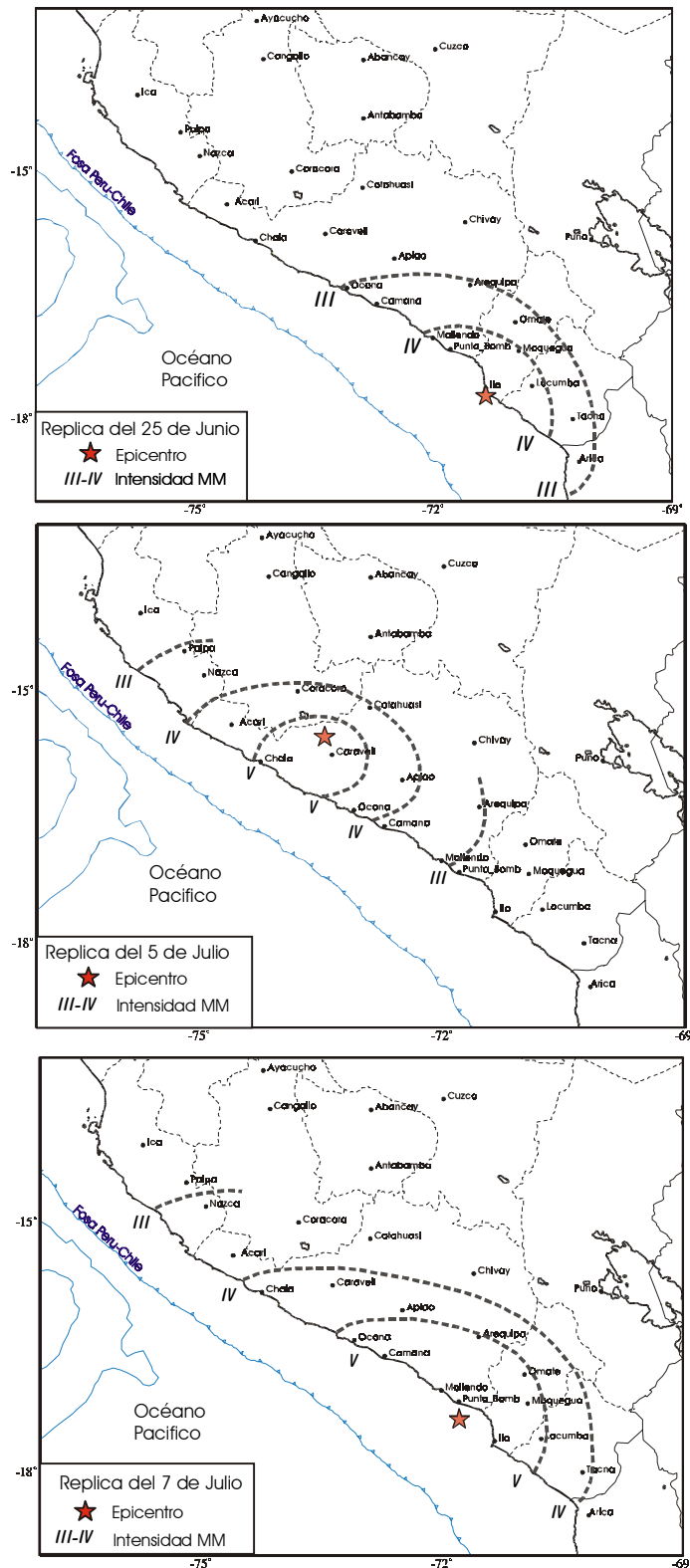


Figura 3. Mapas de Intensidad Regional correspondientes a las replicas del 25 de Junio, 5 y 7 de Julio.

Nombre de archivo: sismo4
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: 4
Asunto:
Autor: Hugo Trigoso
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 11:54 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 11:54 A.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:28 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 1,654 (aprox.)
Número de caracteres:9,433 (aprox.)

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 Antayhua¹, Henry Salas¹, Isabel Bernal¹
Simeón Rodríguez¹, José Millones¹, César Jiménez¹, Ivonne Pérez-Pacheco¹
David Portugal², Adolfo Inza² y Yolanda Zamudio¹*

¹Centro Nacional de Datos Geofísicos

²Jefatura de Redes Geofísicas

Resumen

En el presente estudio se realiza el análisis y la evaluación de la distribución espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa ocurridas entre el 28 de Junio y 19 de Julio de 2001. Estas réplicas fueron registradas por una red sísmica local compuesta por siete estaciones digitales de tipo reftek que funcionaron por un periodo de 40 días, tiempo durante el cual ocurrieron hasta tres réplicas con magnitudes M_w de 6.5, 6.8 y 7.5. Los resultados indican que el área total de ruptura asociado al terremoto de Arequipa fue de $370 \times 150 \text{ km}^2$ con el eje mayor paralelo a la línea de costa. La distribución de las réplicas, en profundidad, sugiere que la superficie involucrada en la ruptura presenta una inclinación de 27° . Asimismo, a partir del área de ruptura se estima un desplazamiento medio de 77 cm.

Abstract

This study analyses and evaluates the spatial distribution of the aftershocks of the Arequipa earthquake, which took place between June 28 and July 19, 2001. These aftershocks were recorded by a local seismic network of seven digital stations of the reftek type that worked for a period of 40 days, during which up to three aftershocks with M_w magnitudes of 6.5, 6.8 and 7.5 occurred. Results indicate that the total rupture area associated with the Arequipa earthquake was $370 \times 150 \text{ km}^2$, the principal axis being parallel to the coastline. The depth distribution of the aftershocks suggests that the surface involved in the rupture presents an inclination of 27° . Also, based on the rupture area, a displacement of 77 cm has been estimated.

Introducción

En Perú, la actividad sísmica es el resultado del proceso de convergencia entre la placa de Nazca y Sudamericana, presente de Norte a Sur, con una velocidad relativa del orden de 8 cm/año (DeMets, et al, 1990). Esta alta velocidad de convergencia permite que se produzca un fuerte acoplamiento entre las placas y se genere frecuentemente sismos de magnitud elevada a lo largo de su superficie de contacto y a diversos niveles de profundidad. Las características de esta sismicidad y en particular de la región sur, han sido estudiadas por Grange (1983), Schneider y Sacks (1987), Cahill e Isacks (1992) y Tavera y Buforn (1998). En la región Sur, a diferencia de las regiones Norte y Centro, la superficie de acoplamiento de las placas presenta una inclinación del orden de 25° - 30° continuo hasta una profundidad de 300 km aproximadamente; sin embargo, en todas las regiones la ocurrencia de grandes terremotos ha sido muy frecuente. Por lo

general, estos terremotos han sido acompañados de un gran número de réplicas, las mismas que han permitido estudiar con mayor precisión las características de sus procesos de ruptura, así como su tamaño.

El día sábado 23 de Junio del 2001, a las 15:33 (hora local) un terremoto de carácter superficial con magnitud 8.2 Mw afectó a toda la región Sur de Perú, incluyendo a las ciudades de Arica e Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. El epicentro de este terremoto fue localizado cerca de la línea de costa y a 82 km al NW de la localidad de Ocoña, departamento de Arequipa. Las ciudades y localidades mas afectadas fueron Ocoña, Camaná, Mollendo, Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna, produciendo daños materiales y personales considerables (Imáx=VII-VIII). Como consecuencia de este terremoto, se ha producido un gran numero de réplicas, motivo por el cual el Instituto Geofísico del Perú decide instalar 6 estaciones sísmicas alrededor del epicentro del terremoto del 23 de Junio, las mismas que estuvieron operando durante un periodo de 40 días, tiempo durante el cual se ha registrado aproximadamente 5000 réplicas de diversas magnitudes, sobresaliendo las ocurridas el 25 de Junio (Mw=6.5), 5 (Mw=6.8) y 7 de Julio del 2001 (Mw=7.5).



Figura 1. Distribución de las estaciones sísmicas temporales instaladas alrededor del epicentro del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001. Los triángulos en blanco representan a las estaciones de BUN y TCT trasladadas el día 19 de Julio a las localidades de Pocoma (PCM) y Aplao (APL).

En el presente estudio se analiza y evalúa la distribución espacial de la réplicas ocurridas en un periodo de tiempo de 21 días después de ocurrido el terremoto de Arequipa (28 de Junio al 19 de Julio de 2001), a fin de conocer el área total y el ángulo de inclinación del plano de fractura.

La Red Sísmica Temporal

Debido al gran número de réplicas producidas por el terremoto del 23 de Junio, el Instituto Geofísico del Perú decide instalar una red sísmica compuesta por 6 estaciones más la de San Gregorio (SGR) perteneciente a la Red Sísmica Nacional (RSN). Estas estaciones fueron instaladas en las localidades de Bella Unión (BUN), Tocota (TCT), Tanaka (TNK), Caravelí (CAR), Quilca (QLC) y Ocoña (OCO). A partir del día 19 de Julio, las estaciones de BUN y TCT fueron trasladadas e instaladas en las localidades de Pocoma (PCM) y Aplao (APL) respectivamente. Todas las estaciones sísmicas son de banda ancha con 3 componentes de registro (N-S, E-W y Z), a excepción de la estación de San Gregorio (SGR) que funcionó con un sismómetro vertical SS-1 de periodo corto. Las características de estas estaciones se indican en la Figura 1 y Tabla 1.

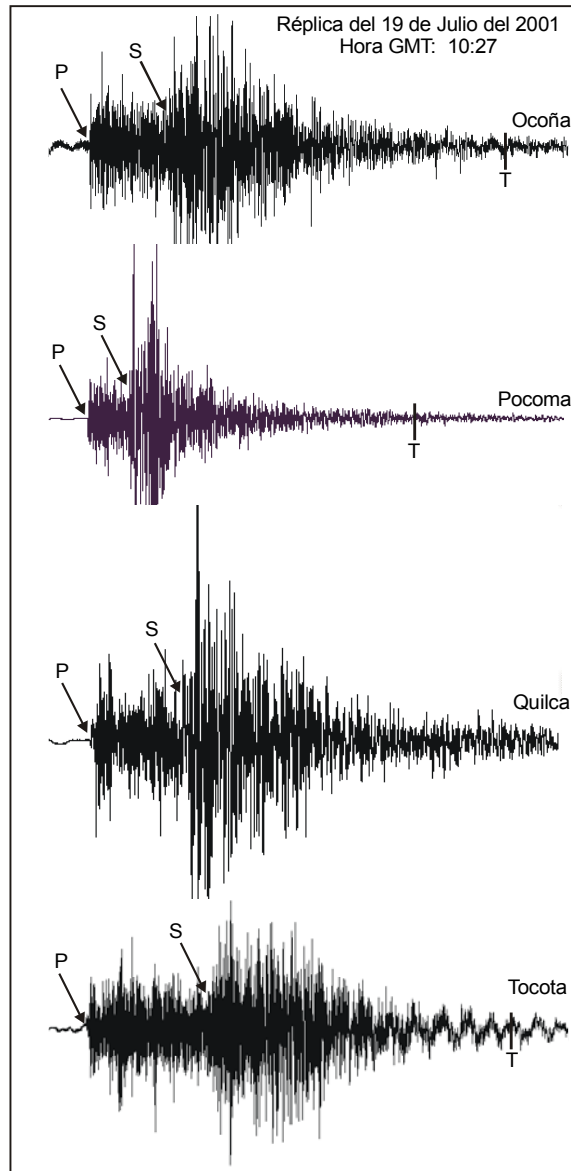
Tabla 1

*Características de las estaciones sísmicas instaladas en la región Sur para el registro de las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001
BB= banda ancha, SP= periodo corto*

ESTACION	CODIGO	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD (m.s.n.m)	TIPO
Bella Unión	BUN	-15.444°	-74.646°	234	BB
Tocota	TCT	-15.659°	-74.091°	1006	BB
Tanaka	TNK	-15.754°	-74.452°	182	BB
Caravelí	CAR	-15.763°	-73.372°	1879	BB
Quilca	QLC	-16.717°	-72.426°	106	BB
Ocoña	OCO	-16.429°	-73.109°	48	BB
Aplao	APL	-16.074°	-72.489°	667	BB
Pocoma	PCM	-17.432°	-71.374°	196	BB
San Gregorio	SGR	-16.570°	-72.715°	161	SP

Procesamiento de Datos

Después de obtenida la información de campo, se procedió a extraer las señales sísmicas de cada una de las estaciones de registro para el periodo comprendido entre el 28 de Junio y 19 de Julio a fin de realizar su análisis y lectura de los tiempos de llegada de las fases P y S, además del tiempo de duración del registro de la señal de cada sismo. En la Figura 2, se muestra algunos ejemplos de la señal de una de las réplicas registradas por la red sísmica temporal. Posteriormente, los tiempos de llegada de las



*Figura 2. Ejemplos de señales de la réplica del 19 de Julio (10:27 GMT)
P y S indican los tiempos de llegada de las ondas y
T la duración del registro de la señal.*

fases P y S

leídas en los registros de cada una de las estaciones sísmicas fueron correlacionadas a fin de contar con información para un total de 336 réplicas.

Para la localización de las réplicas se ha utilizado el programa Hypo71 (Lee y Lahr, 1982), el mismo que al igual que otros, requiere como datos de entrada las lecturas de las fases P y S, la duración del registro del sismo, un modelo de velocidad y una relación de velocidades que permita corregir el valor de velocidad de la onda S.

Modelo de Velocidad

En la Tabla 2, se presenta el modelo de velocidad utilizado en este estudio y que corresponde al obtenido por Woollard (1975) para el borde Oeste de la región Central de Perú a partir de estudios de reflexión sísmica. Este modelo fue utilizado, con resultados óptimos, por Langer y Spence (1995) para el estudio de las réplicas del terremoto del 3 de Octubre de 1974 ocurrido a 350 km al NW del epicentro del terremoto de Arequipa.

Tabla 2

Modelo de Velocidad utilizado en este estudio (Woollard, 1975)

Vp (km/seg.)	Prof. (km)	Espesor (km)
4.5	0.0	1.0
5.8	1.0	2.5
6.3	3.5	18.5
7.5	22.0	5.0
8.0	30.0	-----

Curva de Wadati

Como es conocido, los modelos de velocidad consideran únicamente capas planas con velocidades para la onda P; por lo tanto, para corregir la velocidad de la onda S es necesario calcular la relación de velocidades V_p/V_s a partir de la curva de Wadati. Para construir esta curva, se ha utilizado los tiempos de llegada de las fases P y

Se de las diferentes réplicas leídas en los registros de cada una de las estaciones sísmicas temporales. Los valores para el ajuste corresponden a la diferencia, entre el valor del tiempo de llegada mínimo y los tiempos de llegada mayores para cada una de las réplicas, tanto para la onda P como para la S ($T_s - T_{pmin}$ y $T_p - T_{pmin}$). En la Figura 3, se observa que el ajuste lineal de los datos considera una recta con pendiente igual a 1.78, siendo este valor correspondiente a la relación V_p/V_s y coherente con los obtenidos en otros estudios de sismicidad superficial (Langer y Spence, 1995; Dorbath et al., 1991; Grange, 1983; Lindo, 1993; y Tavera et al., 2000).

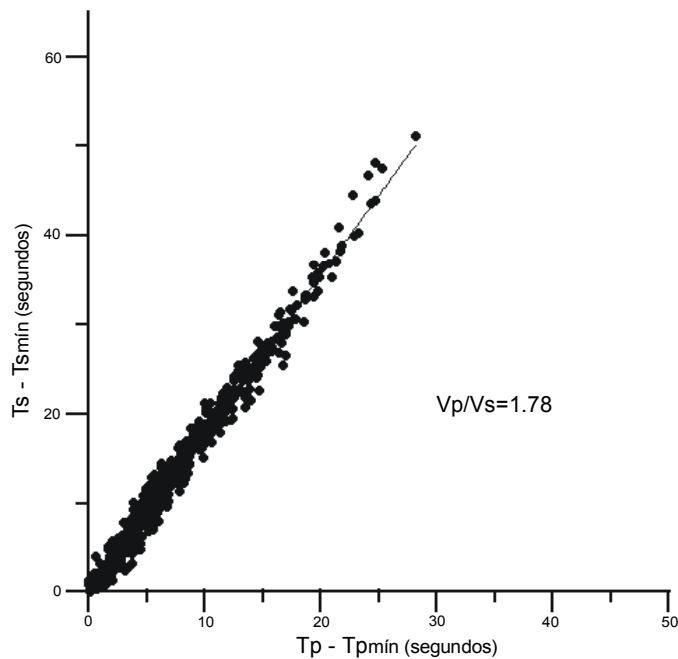


Figura 3. Curva de Wadati obtenida para las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. T_s y T_p corresponden a los tiempos de llegada de las ondas P y S; T_{pmin} y T_{smin} los tiempos mínimos de llegada para cada réplica y V_p/V_s la relación de velocidades.

Cálculo de la Magnitud

Para el cálculo de la magnitud local (ML) de las réplicas se ha utilizado la relación propuesta por Klein (1978):

$$ML = -1.1 + 2 \log (T) + 0.007 D + 0.0035 (Z)$$

donde: ML es la magnitud local, T la duración del registro de la señal en segundos, D la distancia epicentral en kilómetros y Z la profundidad del foco sísmico en kilómetros.

Esta relación permite estimar ML a partir de la duración total del registro de la réplica y corresponde al promedio de los valores ML obtenidos para cada estación sísmica. Las magnitudes locales así obtenidas, es solo un valor relativo que permite estimar de manera aproximada la cantidad de energía liberada por las réplicas y por lo tanto, se puede considerar como válido para los objetivos del presente estudio.

Análisis de Distribución Espacial de las Réplicas

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de las 336 réplicas localizadas, además de los epicentros del terremoto principal (8.2 Mw) y de las 3 réplicas de mayor magnitud ocurridos el 25 de Junio (6.5Mw), 5 (6.8Mw) y 7 (7.5Mw) de Julio de 2001. En general, los parámetros hipocentrales de las replicas han sido obtenidos con errores menores a 2 km, tanto para las coordenadas del epicentro como para la profundidad de los focos. Asimismo, todas las réplicas presentan magnitudes que oscilan entre 2.5 y 5.0 ML.

En la Figura 4, se observa que las réplicas se distribuyen principalmente entre la fosa y la línea de costa y en menor proporción, sobre el continente cubriendo un área de $370 \times 150 \text{ km}^2$ aproximadamente. Esta área rectangular se extiende desde la localidad de Ocoña (extremo Norte del departamento de Arequipa) hasta Ilo en Moquegua. Asimismo, el mayor número de réplicas se agrupa alrededor del epicentro del terremoto para extenderse en menor número en dirección SE hasta llegar al epicentro de la réplica del 7 de Julio. A partir de allí, hacia el Sur no se observa la presencia de sismicidad. Sobre el continente, las réplicas se distribuyen de manera muy dispersa y estas a su vez disminuyen paulatinamente hasta llegar a la ubicación de la réplica del 5 de Julio del 2001.

A fin de analizar la distribución de las réplicas en función de la profundidad de sus focos, en la Figura 5 se presenta tres secciones verticales perpendiculares a la línea de costa (Figura 4). En la Figura 5a se muestra la sección AA', la misma que muestra la distribución de las réplicas del extremo Norte del área total de réplicas y en ella se observa que las réplicas se distribuyen siguiendo una línea con pendiente de $27\text{-}30^\circ$

aproximadamente hasta una profundidad del orden de 70 km y hasta una distancia de 120 km desde la fosa. A distancias de 150 y 250 km, desde la fosa, se observa una pequeña concentración de réplicas con profundidades máximas de 30 km.

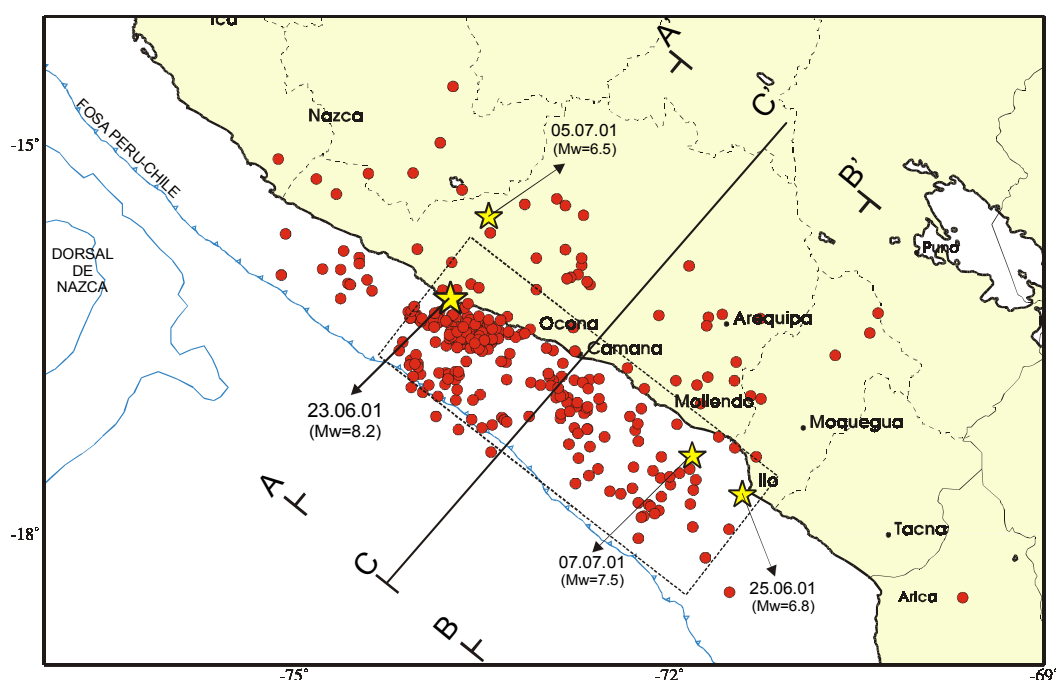


Figura 4. Distribución espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa ocurridas entre el 28 de Junio y 19 de Julio. Las estrellas representan al epicentro del terremoto principal y las 3 réplicas de mayor magnitud. Las líneas discontinuas indican el área de réplicas.

En la Figura 5b (sección BB'), las réplicas siguen similar tendencia que la sección anterior y el mayor número de ellas presentan profundidades menores a 35 km.

El total de las réplicas se muestra en la Figura 5c y en ella se observa de manera clara que las réplicas se distribuyen en profundidad de manera continua siguiendo una línea con pendiente de 27°-30° aproximadamente hasta una profundidad máxima de 60 km y a una distancia de 125 km desde la fosa. A partir de esta distancia, las réplicas se distribuyen de manera dispersa. Sobre esta sección vertical se ha ploteado el hipocentro del terremoto de Arequipa según datos obtenidos por Tavera (en este informe). En general, la distribución de las réplicas en profundidad permite configurar la geometría de la superficie afectada por el terremoto y que constituye el área de fractura.

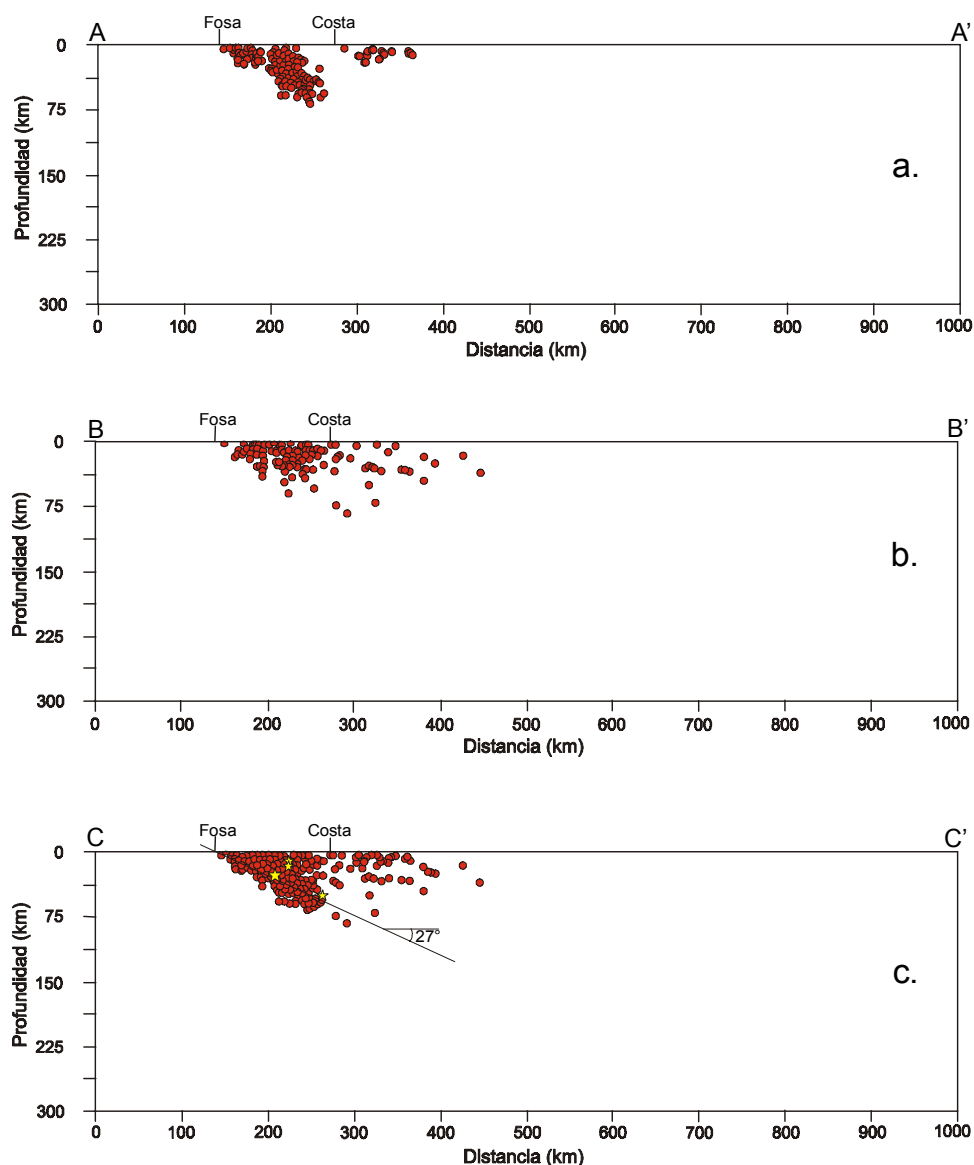


Figura 5. Secciones verticales perpendiculares a la línea de costa para las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 según la línea AA', BB' y CC' de la Figura 4. a) Extremo norte del área de replicas, b) extremo sur c) área total.

Discusión

La distribución espacial de las réplicas analizadas en este estudio (periodo del 28 de Junio al 19 de Julio) sugiere que el terremoto de Arequipa produjo un área de fractura de $370 \times 150 \text{ km}^2$ y su variación espacio-tiempo indicaría que la ruptura se ha propagado en dirección SE, de ahí que las localidades de Camaná, Mollendo, Arequipa, Moquegua y Tacna hayan sufrido los mayores efectos del terremoto. Las réplicas del 25

de Junio y 7 de Julio, ubicadas entre las localidades de Mollendo e Ilo, sugieren la ubicación del frente de parada de la ruptura. Del total de réplicas, las que se ubican en el interior del continente indicarían que el terremoto principal habría producido fracturamientos superficiales de menor magnitud en la Alta Cordillera. La distribución de las réplicas, en profundidad, sigue una línea con pendiente de 27°-30° aproximadamente hasta una profundidad de 60 km, sugiriendo la geometría de la superficie de fricción de placas.

Para el terremoto de Arequipa se ha obtenido un momento sísmico escalar de 1.3×10^{21} Nm (Tavera et al, en este informe) y considerando un área de ruptura de 370×150 km², el desplazamiento medio (ΔU) puede ser estimado a partir de la siguiente relación:

$$\Delta U = M_0 / \mu S$$

donde, M_0 es el momento sísmico escalar, μ la rigidez del medio (3×10^{11} dinas/cm²) y S el área de ruptura. Así, se obtiene un desplazamiento medio $\Delta U = 77$ cm, coherente con los obtenidos por Ruegg et al., (2001) a partir de mediciones de GPS (100 cm aproximadamente).

Conclusiones

La serie de réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 se localiza entre la fosa y la línea de costa en un área rectangular de 370×150 km², alargada en dirección SE a partir del epicentro del terremoto principal. Los pequeños agrupamientos de réplicas ubicadas sobre el continente corresponderían a deformaciones superficiales producidas a consecuencia del terremoto de Arequipa.

La distribución de las réplicas, en profundidad, muestra que los focos se distribuyen sobre una línea con una pendiente de 27°-30° hasta alcanzar una profundidad de 60 km, características que permiten configurar en detalle la geometría de la superficie involucrada en el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa.

El terremoto de Arequipa tuvo una magnitud $M_w=8.2$, un momento sísmico escalar de 1.3×10^{21} Nm (Mo), un área de ruptura de 370×150 km² y un desplazamiento medio de 77 cm (ΔU).

Bibliografía

- Cahill y Isacks, (1992). Jour. Geophys. Res., 97, 17, 503-529.
- DeMets et al., (1990). Geophys. Jour. Int., 101, 425-478.
- Dorbath et al., (1991) Jour. of South American Earth Sciecies., 4, 13-24.
- Grange, (1983). These pour Docteur, Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble. 400p.
- Langer y Spence, (1995). Bul. Seism. Soc. Am., 85, 665-687.
- Lee y Lahr, (1982). U.S. Geological Survey Open-file Report 75-311
- Lindo, (1993). These de Doctorat, Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, Francia.
- Schneider. y Sacks, (1987). J. Geophys. Res. 92, 13887-13902.
- Tavera y Buforn, (1998). Física de la Tierra, UC Madrid, 10, 187-219
- Tavera et al., (2002). Journal of Seismology (in press).
- Tavera et al., (2000). Informe Técnico, Convenio Electroperú-IGP, 38 p.
- Wadati, (1933). In: Bath. M. (1973). Birkhauser Verlag Vasel, 395p.
- Woollard, (1975). Rev. of Geophys. 14, 87-137.

Nombre de archivo: sismo5
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: DISTRIBUCIÓN DE REPLICAS DEL TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 -
Asunto:
Autor: igp
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 11:57 A.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 11:57 A.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 4 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:32 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 12
Número de palabras: 2,244 (aprox.)
Número de caracteres: 12,796 (aprox.)

**Análisis del Terremoto del Sur del Perú,
23 de Junio 2001, Mw=8.4
Utilizando Datos Locales**

*Diana Comte¹, Rubén Boroschek², Hernando Tavera³, Louis Dorbath⁴,
David Portugal³, Michel Frogneux⁵, Henri Haessler⁵,
Hernán Montes³, Isabel Bernal³, Yanet Antayhua³,
Henry Salas³, Adolfo Inza³, Simeón Rodríguez³,
Bianca Glass⁶, Eduardo Correa⁶, Carlos Meneses⁶,
Iván Balmaceda⁶, Alicia Cruz⁶*

¹ Dpto. de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago

² Dpto. de Ing. Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago

³ Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

⁴ IRD, Institut de Recherche pour le Developpement, Francia

⁵ Institut de Physique du Globe de Strasbourg, Strasbourg, Francia

⁶ Centro Sismológico, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile

Resumen

Se analiza la secuencia de réplicas del mayor terremoto a nivel mundial de los últimos 25 años, que corresponde al ocurrido en el sur del Perú el 23 de Junio de 2001, Mw=8.4, utilizando datos sismológicos obtenidos con redes locales de observación y monitoreo. Se discute la sismicidad histórica, principalmente lo relativo a la estimación de las magnitudes determinadas con parámetros macrosísmicos, considerando que dichas magnitudes no incluyen particularmente el efecto de sitio y la directividad del proceso de ruptura. Se concluye que el terremoto de 2001 es equivalente al de 1784 y no al de 1868, que es el mayor reportado en el sur del Perú. El área de réplicas determinada con datos de la red mundial y con observaciones locales indica que el segmento comprendido entre Ilo y Tacna permanece intacto. Finalmente se indica que considerando la ocurrencia del terremoto de Antofagasta ocurrido en 1995 y el terremoto del sur del Perú de 2001, la probabilidad de ocurrencia de un sismo mayor en la brecha sísmica del norte de Chile ha aumentado, sin embargo dicho próximo evento no será necesariamente equivalente al último de la serie, vale decir al de 1877.

Abstract

The aftershock sequence of the larger earthquake of the last 25 years all over the world, the 23 June, 2001 Mw=8.4 southern Peru earthquake, using locally recorded data. The estimation of the magnitudes of the historical seismicity is analyzed, mainly focused in the sense that this estimation do not consider the site effect and the directivity of the source rupture. The 2001 southern Peru earthquake is equivalent to the 1784 one, and it is not the repetition of the 1868 earthquake. The aftershock area determined with local and global data shows that the Ilo-Tacna segment remain intact. Finally, considering the occurrence of the Antofagasta, 1995 and the southern Perú, 2001 earthquakes, the probability of having a large earthquake in the northern Chile seismic gap is increased, however, the magnitude of the next event in this area will not be necessarily as big as the last occurred in the area, that is the 1877 one.

Introducción

La zona sur del Perú, al igual que toda la costa oeste del continente Sudamericano se encuentra sometida al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa continental de América del Sur, a una velocidad promedio de convergencia del orden de 7.8 cm/año. Este proceso de subducción permite que se acumule energía a lo largo del contacto sismogénico interplaca, generando un fuerte acoplamiento y por ende grandes terremotos asociados. En particular, la región de estudio ha experimentado grandes terremotos destructivos a lo largo de su historia, cabe mencionar los sismos de subducción ocurridos en 1513, 1604, 1687, 1784 y 1868 (Tabla 1) y por lo tanto, el área de ruptura asociada al entonces último terremoto de 1868 había sido identificada como una brecha sísmica de importancia y próxima a la ruptura (Ref. 1, 2, 3). Es importante destacar que los sismos históricos mencionados no son equivalentes ni en magnitud, ni en las áreas comprometidas, aunque todos ellos afectaron el sur del Perú. En la Tabla 1 se reproducen los parámetros determinados por Dorbath et al. (Ref. 2) y se agregaron los datos del sismo de 2001. Se puede observar, que al igual que en otras zonas a nivel mundial, es evidente la existencia de modos variables de ruptura, por lo tanto, los terremotos de subducción no son equivalentes en las áreas involucradas, ni en las energías liberadas a lo largo del tiempo, y aunque existe un proceso a través del cual se acumula energía en el contacto interplaca, dicha energía es liberada de formas distintas en los eventos mayores que las afectan.

TABLA 1

Año	Largo de ruptura (km)	Altura tsunami local (m)	Mw
1582	80	1-2	7.5
1604	450	10-15	8.7
1687	150 (?)		8.0
1715	75		7.5
1784	300	2-4	8.4
1868	500	14	8.8
2001	300	7-8	8.4

El Terremoto del 23 de Junio de 2001, $M_w=8.4$

El terremoto del 23 de Junio de 2001, de magnitud $M_w=8.4$, ha sido clasificado como el sismo más grande de los últimos 25 años y compromete una longitud de ruptura del orden de los 300 km a lo largo de la costa del sur del Perú, entre Ocoña e Ilo. Las réplicas más importantes se encuentran en la Figura 1 y Tabla 2, donde la réplica mayor ocurrió el 7 de Julio con una magnitud $M_w=7.6$ frente a las costas de Ilo; es interesante destacar que la réplica del 5 de Julio corresponde a un mecanismo y profundidad focal diferente al resto de la secuencia, este evento es de carácter tensional y tiene una profundidad que permite definir la extensión a lo largo del plano de ruptura del orden de 60 km.

TABLA 2

Fecha	Hora Origen (UT)	Latitud	Longitud	M_w
01-06-23	20:33	-16.26	-73.64	8.4
01-06-23	21:27	-17.18	-72.64	6.1
01-06-26	04:18	-17.75	-71.65	6.8
01-07-05	13:53	-16.09	-73.99	6.6
01-07-07	09:38	-17.54	-72.08	7.6

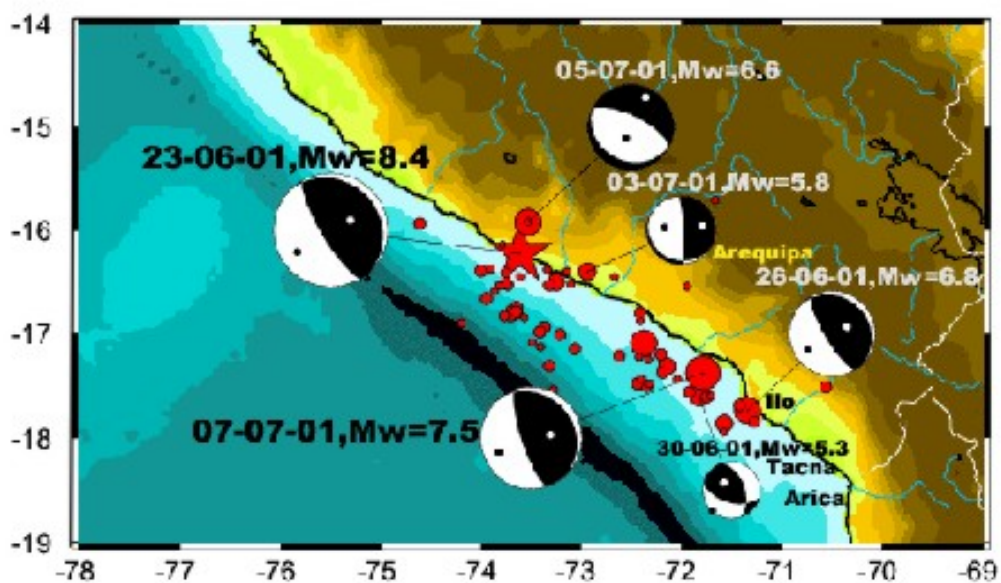


Figura 1.- Distribución de las réplicas mayores asociadas al terremoto del sur de Perú del 23 de Junio de 2001. Se incluyen además los mecanismos focales determinados por Harvard.

El sismo principal presentó una fuerte directividad hacia el sur, a lo largo de la costa y en dirección perpendicular a la de la convergencia en la zona. Los reportes indican del orden de 75 personas fallecidas producto del terremoto, incluyendo 26 personas muertas debido al tsunami asociado, que además registra la desaparición de otras 64 personas; hubo aproximadamente 2700 personas damnificadas, 17.500 casas destruidas y 35.550 casas dañadas en el área Arequipa-Camaná y Tacna. En el norte de Chile fue sentido con gran intensidad a pesar de encontrarse a más de 400 km de distancia, las intensidades de las ciudades más importantes son las siguientes: Arica VII, Iquique VI, Calama IV-V y Tocopilla II-III. En la zona epicentral hubo observaciones de tsunami cuyas variaciones alcanzaron del orden de los 7 m y la inundación alcanzó más de 1 km desde la costa. El Servicio Hidrográfico de la Armada de Chile reportó variaciones promedio del nivel medio del mar del orden de 2.5 m en Arica, 1.5 m en Iquique y 1 m en Coquimbo.

El efecto de este evento en el norte de Chile también fue registrado instrumentalmente por la red de acelerógrafos que posee la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en la Zona. Las aceleraciones y velocidades máximas registradas y la demanda sobre estructuras impuestas por este evento son comparativamente mayores considerando la distancia a la ruptura (Ref. 5).

El análisis detallado de la secuencia de réplicas del terremoto del sur del Perú fue posible debido a la instalación de una red sísmica temporal de estaciones sismológicas que se extendió a lo largo de la zona costera en los distritos de Arequipa y Moquegua, complementando la red permanente Peruana de estaciones sismológicas. (Figura 2). La red temporal incluyó las 10 estaciones de tres componentes de período corto de la U. de Chile-Fundación Andes-IRD-Francia y 7 estaciones banda ancha del Instituto Geofísico del Perú. Dicha red operó durante las primeras semanas después de la ocurrencia del sismo principal y registró las réplicas más importantes incluyendo la mayor de ellas ocurrida el 7 de Julio de 2001, $M_w=7.5$. Los mecanismos focales de la secuencia de réplicas corresponden a fallamientos típicos de subducción, sin embargo también se observan eventos extensionales, el de mayor magnitud corresponde a la réplica del 5 de Julio de 2001, $M_w=6.6$. La distribución de la sismicidad con respecto

a la profundidad permite una definición detallada de la zona de Wadati-Benioff. La determinación hipocentral de la sismicidad ubicada cerca del límite político entre Chile y Perú fue realizada utilizando los datos registrados por la red permanente de monitoreo de Arica, norte de Chile.

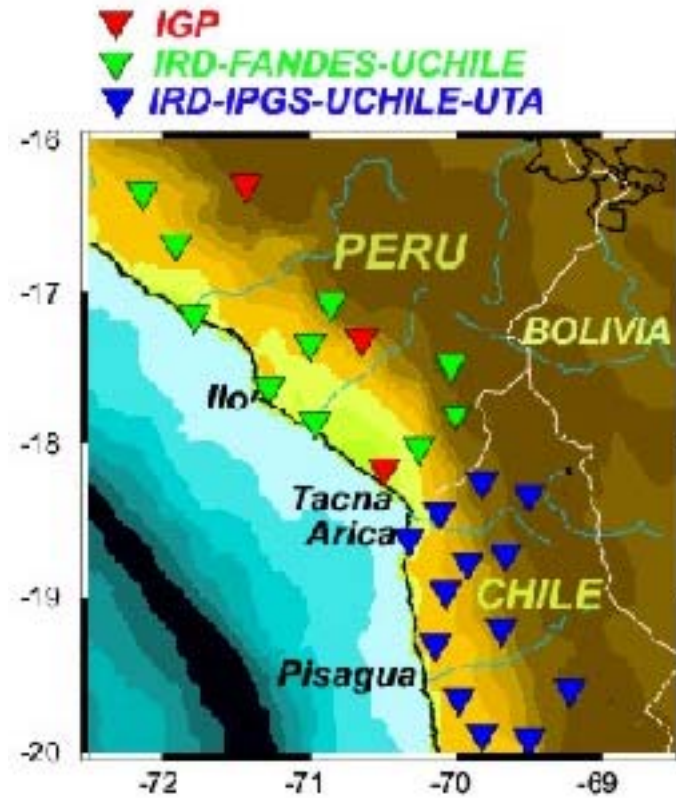


Figura 2.- Distribución de las estaciones sismológicas permanentes y temporales en la zona de estudio.

Discusión y Conclusiones

En términos generales, la determinación del área de ruptura de un terremoto es un parámetro difícil de determinar y cuando se cuenta con datos instrumentales, el procedimiento usual es asociar el área de réplicas con el área de ruptura del evento sísmico, entendiendo que el área de réplicas puede ser mayor que el de ruptura. Con ausencia de datos instrumentales y contando exclusivamente con las descripciones de los daños asociados a los terremotos históricos, la determinación de las áreas de ruptura posee un error aún mayor, porque por una parte la densidad de población no necesariamente es homogénea a lo largo del área involucrada y por otra parte, el efecto

de sitio y una posible directividad en el proceso de ruptura, podrían perturbar notoriamente la determinación del tamaño del terremoto en cuestión.

En el caso del terremoto del sur del Perú de 2001, existen registros instrumentales y utilizando tanto los eventos mayores registrados por la red mundial de estaciones sismológicas, como los datos de las redes locales, el área de réplicas asociada es aproximadamente la misma y se extiende entre el límite sur del terremoto previo de subducción ocurrido en 1996 de magnitud $M_w=7.7$, e Ilo, quedando en evidencia que el segmento comprendido entre Ilo y Tacna permanece aún intacto, aunque participó en la ruptura del gran terremoto de 1868.

El área de réplicas determinada con registros instrumentales y la distribución de daños entregada por el Instituto Geofísico del Perú y por Tavera et al. (Figura 3, Ref. 4) del terremoto de 2001 es muy similar a la descrita por Dorbath et al. (Figura 4, Ref. 2) para el terremoto de 1784, determinada a partir de parámetros macrosísmicos y difiere de la descripción entregada por los registros históricos para los daños asociados al terremoto de 1868.



Figura 3.- Isosistas determinadas por Tavera et al. (Ref. 4) para el sismo del 23 de Junio, 2001

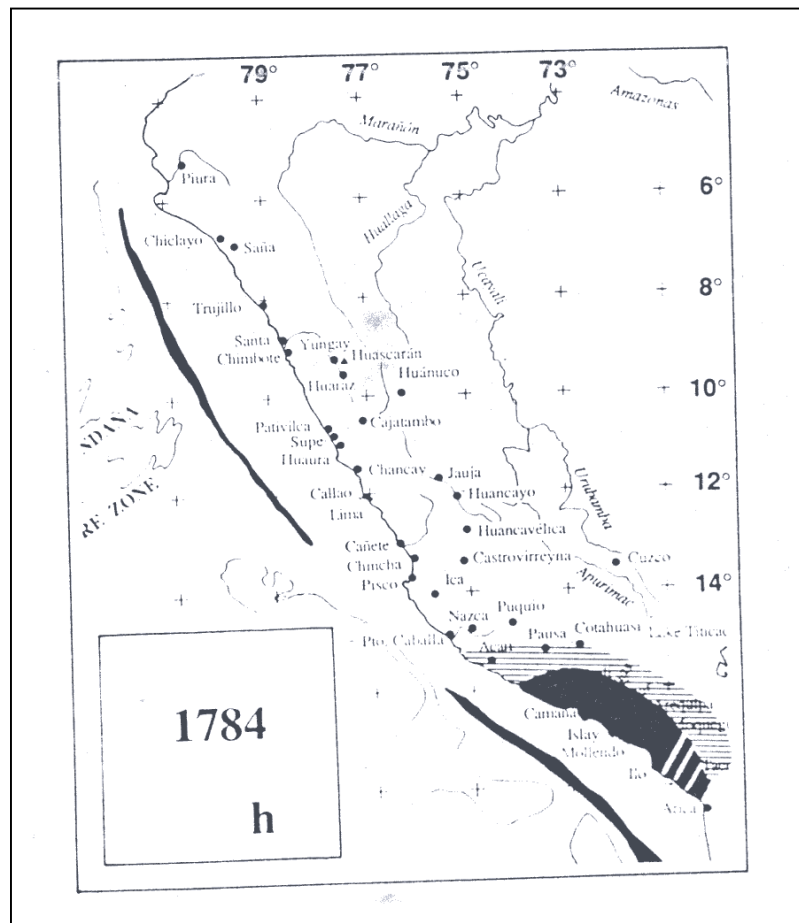


Figura 4.- Isosistas del terremoto de 1784 determinada por Dorbath et al. (Ref. 2).
El área ennegrecida corresponde a la intensidad VIII.

Aunque la descripción de los daños del terremoto de 1868 es una de las más completas de los grandes terremotos que afectaron el sur del Perú, hay dos elementos que son difíciles de discriminar en el sentido de contribuir al daño observado y por lo tanto, en la estimación de la magnitud del mismo. Uno de ellos es la ocurrencia del maremoto destructor asociado al terremoto de 1868, que en el caso de los terremotos de 1784 y 2001 los efectos de los maremotos asociados fueron de carácter más moderado y con efectos destructivos muy localizados. El otro aspecto se refiere al efecto de sitio en las zonas involucradas, en el caso del sismo de 2001 las intensidades y aceleraciones máximas observadas al sur del área de ruptura (Tacna y Arica, por ejemplo) son muy elevadas considerando la distancia de dichas ciudades con respecto al inicio de la ruptura; y el último aspecto está relacionado con el fenómeno de directividad que favorece un proceso de focalización de la energía liberada causando mayores

intensidades en la dirección preferencial de la ruptura, y en el caso del terremoto de 2001 se observa una fuerte directividad hacia el sur (Ref. 6).

Por lo tanto, aunque parece evidente que el terremoto del sur del Perú de 2001 no es equivalente al ocurrido en 1868, los resultados obtenidos del análisis de este terremoto sugieren que la magnitud del terremoto de 1868 debería ser revisada a la luz de los antecedentes mencionados. De igual forma, sería muy interesante el realizar una re-evaluación de la magnitud del terremoto de 1877 que afectó el norte de Chile, considerando que se están realizando estudios de efectos de sitio en esta región.

Finalmente, la ocurrencia de los eventos de 1995 en Antofagasta ($M_w=8.0$) y de 2001 en el sur del Perú, sugieren un aumento de la probabilidad de ocurrencia de un sismo mayor en el norte de Chile, donde se encuentra la brecha sísmica asociada al evento de 1877, sin embargo, el próximo terremoto de subducción que afectará la zona norte del territorio nacional no necesariamente será equivalente al terremoto de 1877.

Agradecimientos

La red sísmológica de intervención se obtuvo a través del proyecto Fundación Andes C13502. Este trabajo fue parcialmente financiado a través del proyecto FONDECYT 1020104.

Bibliografía

1. Nishenko, S., Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal, *J. Geophys. Res.*, 90, 3589-3615, 1985;
2. Dorbath, L., A. Cisternas, C. Dorbath., Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576, 1990
3. Comte, D. y M. Pardo, Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4, 23-44.1991
4. TaveraH., E. Buforn, I. Bernal, Y. Antayhua y L. Vilacapoma, The Arequipa (Perú) earthquake of June 23, 2001, *J. of Seismology*, in press, 2002

5. Boroschek, R. Comte, D., Morales, A. "Características del terremoto de Ocoña del 23 de Junio de 2001", VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, 2002.
6. Dewey, J, and J. Bariola, Preliminary observations of the southern Peru earthquake of June 23, 2001: The earthquake and aftershock activity, *EERI Special Earthquake Report*, November 2001.

Nombre de archivo: sismo56_chi
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: 1
Asunto:
Autor: EDuran
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 12/07/2002 03:03 P.M.
Cambio número: 3
Guardado el: 08/08/2008 12:32 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:33 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 2,046 (aprox.)
Número de caracteres: 11,663 (aprox.)

Mecanismo Focal del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este estudio se determina el mecanismo focal del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus réplicas de magnitud mayor –25 de Junio, 5 y 7 de Julio- a partir de la distribución azimutal de la polaridad de la onda P identificada en registros obtenidos a distancias regionales y tele sísmicas. Los resultados indican que el mecanismo focal del terremoto de Arequipa es del tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo el plano con buzamiento al ENE casi horizontal. Las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio presentan similar solución que el terremoto de Arequipa; mientras que, la réplica del 5 de Julio corresponde a un mecanismo de tipo normal con ejes de tensión (T) orientado en la dirección de convergencia de placas.

Abstract

In this paper the focal mechanism of the June 23, 2001 Arequipa earthquake and of three of its aftershocks with larger magnitude –June 25, July 5 and 7– as of the azimuthal distribution of the P-wave polarity, identified in records obtained at regional and teleseismic distances. The results indicate that the focal mechanism of Arequipa earthquake is of the inverse type, with nodal planes oriented in the NNW-SSE direction, being the plane with dip to ENE almost horizontal. The June 25 and July 7 aftershocks present a solution similar to the one for the Arequipa earthquake and the July 5 aftershock corresponds to a mechanism of normal type with tension axes (T) oriented in the direction of plate convergence.

Introducción

En la región Sur de Perú, el día sábado 23 de Junio de 2001 (15h 33m hora local) ocurre un terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter que causó muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna, además de las ciudades de Arica e Iquique en Chile. La intensidad máxima del terremoto fue evaluada en VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada y su epicentro fue localizado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (departamento de Arequipa) sobre la línea de costa. Este terremoto es uno de los más grandes y destructores que se haya producido en esta región en los últimos 100 años.

El terremoto de Arequipa debe su origen a la principal fuente sismógena de Perú; es decir, la sismicidad producida por la fricción de placas dentro del proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Sudamericana, la misma que se realiza a una velocidad relativa de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). Según la Figura 1, en la región Sur de Perú la sismicidad puede ser clasificado en sismos con foco superficial ($h < 60$ km), intermedio ($60 < h < 350$ km) y profundo ($h > 350$ km). La sismicidad que se

concentra entre la fosa y la línea de costa está directamente relacionada con la interacción de las placas y es además, causante de la ocurrencia de los sismos mas destructores en las regiones Centro y Sur de Perú (ejemplo: 1868, 1913, 1940, 1942, 1966, 1974, 1996, etc.). En general, los mecanismos focales de todos estos sismos son del tipo inverso con planos nodales orientados, en promedio, en dirección NNW-SSE y con el plano que buza en dirección E-NE prácticamente horizontal. La orientación de los ejes de esfuerzo principal o eje de compresión P, es coherente con la dirección de convergencia de placas (Tavera y Buforn, 2001).

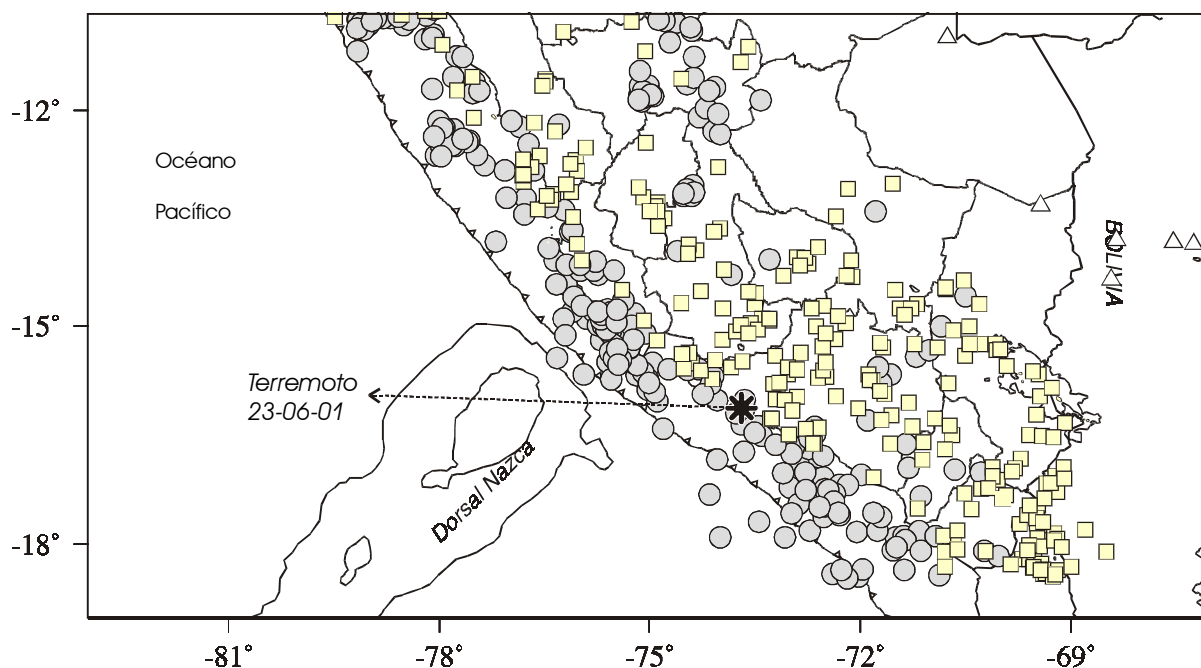


Figura 1.- Sismicidad en la región Sur de Perú para el periodo 1964-1996 ($M > 5.0$). Los círculos corresponden a los sismos de foco superficial, los cuadrados con foco intermedio y los triángulos con foco profundo.

El terremoto de Arequipa fue seguido por un gran número de réplicas, las mismas que se distribuyen en dirección SE sugiriendo que el área de ruptura posiblemente se propagó en esa dirección. Durante los primeros 15 días de ocurrido el terremoto se produjo alrededor de 280 réplicas con magnitudes mb mayores a 4.0 y de estas, tres presentaron magnitudes de $M_w=6.8$ (25 de Junio), $M_w=6.6$ (5 de julio) y $M_w=7.5$ (7 de Julio).

En este estudio se estima la orientación de la fuente y de los ejes de esfuerzo principal del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus réplicas de magnitud mayor a partir de las características del registro de la onda P en estaciones de la Red Sísmica Nacional (Instituto Geofísico del Perú) y de la red mundial.

Orientación de la Fuente

La orientación de la fuente del terremoto de Arequipa del 23 de Junio y de tres de sus réplicas de magnitud mayor (25 de junio, 5 y 7 de Julio), han sido estimados usando el algoritmo de Brillinger et al., (1980) y Udías y Buforn (1998), el mismo que permite obtener la orientación de los ejes de tensión (T) y compresión (P), y sus desviaciones estándar. Los datos utilizados corresponden a los primeros movimientos de la onda P registrado en estaciones ubicadas a distancias regionales y telesísmicas. Los parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa y de sus réplicas son presentados en la Tabla 1 de Tavera et al., (en este informe).

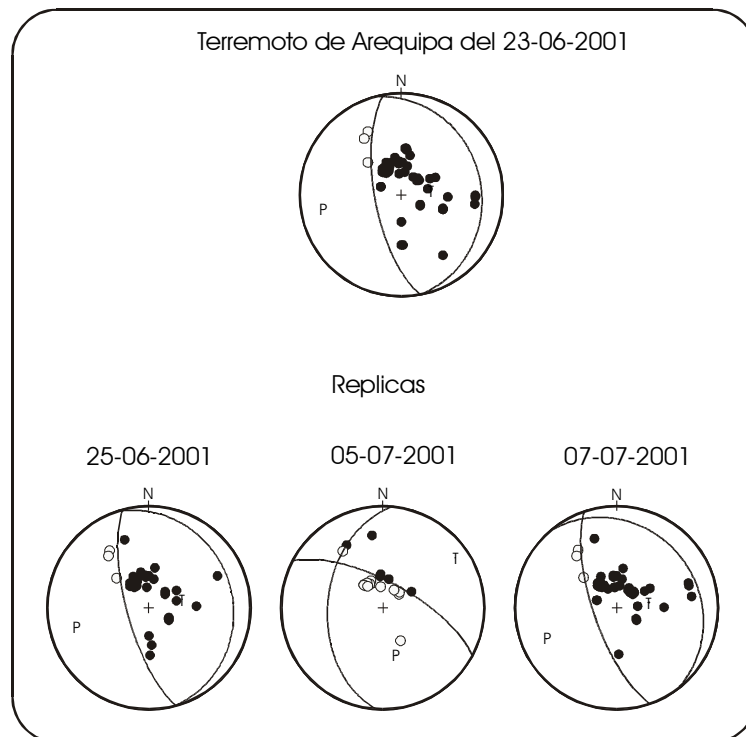


Figura 2. Mecanismos focales para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio y de tres de sus réplicas de mayor magnitud representados en el hemisferio inferior de la esfera focal. Los círculos en negro indican compresión y los vacíos dilatación. Las letras P y T corresponden a la orientación de los ejes de compresión y tensión respectivamente.

Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2 y en ella se observa que la solución para el terremoto de Arequipa corresponde a un mecanismo focal de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo uno de los planos casi vertical ($\delta=68^\circ$) y el otro prácticamente horizontal con un buzamiento del orden de 21° en dirección ENE. Soluciones similares han sido obtenidas para las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio. Para la réplica del 5 de Julio se obtiene un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección N-S y NW-SE, ambos buzando con ángulos de 68° y 44° respectivamente. En todos los casos, la orientación del eje P para el terremoto de Arequipa y réplicas del 25 de Junio y 7 de julio, así como la orientación del eje T para la réplica del 5 de Julio, es en dirección NE a ENE coherente con la dirección de convergencia de placas

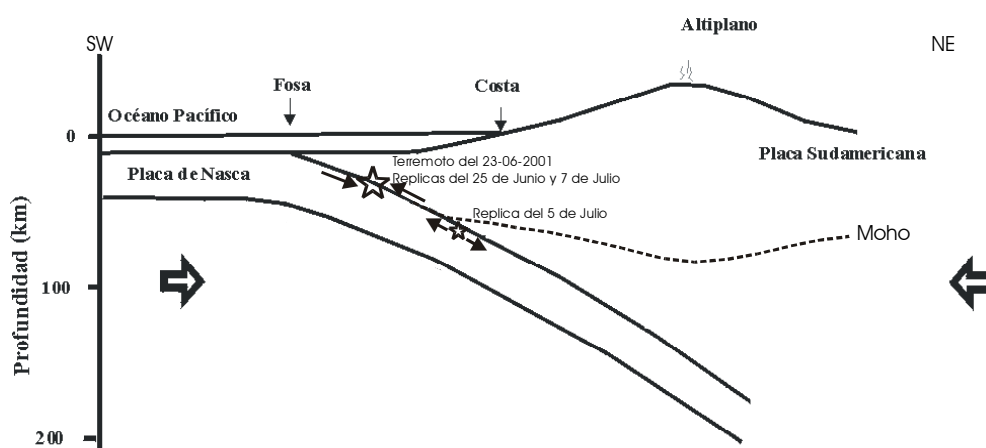


Figura 3. Esquema del proceso de subducción en la región Sur de Perú, hipocentros y tipo de esfuerzo asociado al terremoto de Arequipa del 23 de Junio y a las réplicas del 25 de Junio y 5, 7 de Julio de 2001. Las fechas grandes indican la dirección de convergencia entre las placas de Nazca y Sudamérica.

Conclusiones

El terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001, se constituye como el de mayor magnitud ocurrido a niveles superficiales en la región Sur de Perú. Este terremoto es asociado a la fricción entre las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso de subducción. El terremoto de Arequipa, al igual que otros con el mismo

origen, presenta un mecanismo focal de tipo inverso con el eje P orientado en la misma dirección que la convergencia de placas. Los mecanismos focales de las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio son similares al del terremoto de Arequipa y sugieren que el plano de fricción de placas buza con un ángulo de 21°-23° en dirección ENE. El mecanismo focal de la replica del 5 de Julio es de tipo normal con eje de tensión (T) orientado en dirección NE. Este tipo de mecanismo es coherente con los procesos de deformación a los cuales esta sometida la placa de Nazca a profundidades mayores a 60 km, tal como se muestra en el esquema de la Figura 3.

Bibliografía

Brillinger et al., (1980). Bull. Seism. Soc. Am., 70, 1479-1485.

DeMets et al., (1990). Geophys. Jour. Int., 101, 425-478.

Tavera y Buforn, (2001). Journal of Seismology, 5, 519-540.

Udias y Buforn, (1998). Seismological Algorithms. Acad. Press. Londres., 443-453.

Nombre de archivo: sismo6
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Mecanismo focal del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:05 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:05 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 1 minuto
Impreso el: 07/08/2008 11:35 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 6
Número de palabras: 1,011 (aprox.)
Número de caracteres:5,764 (aprox.)

Proceso de Ruptura del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus Réplicas de Magnitud Mayor (Resultados Preliminares)

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

La orientación de la fuente y las características del proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_L=6.9$, $M_w=8.2$) y de tres de sus réplicas de magnitud mayor (25 de Junio, $M_w=6.8$; 5 de Julio, $M_w=6.5$; 7 de Julio, $M_w=7.5$), es analizado a partir del modelado de ondas de volumen a distancias telesísmicas. Los resultados sugieren que el terremoto de Arequipa y las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio fueron producidos por fuentes con mecanismos de tipo inverso con el plano nodal que buza en dirección ENE casi horizontal. Los ejes de presión (P) se orientan en dirección ENE-WSW. Para la réplica del 5 de Julio el mecanismo es de tipo normal con planos nodales orientados en dirección NE-SW. Las características de la función temporal de la fuente sísmica (STF) sugieren que el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa tuvo una duración del orden de 85 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas aleatorias, siendo la tercera la de mayor tamaño. El momento sísmico es del orden de $1.3E+21$ Nm, equivalente a una magnitud $M_w=8.2$. Las réplicas analizadas en este estudio, muestran un STF relativamente simple y de menor duración. El terremoto de Arequipa tuvo su origen en el proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana, siendo esta fuente sismogénica la más importante en el Perú.

Abstract

The orientation of the source and the characteristics of the rupture process of the June 23, 2001 Arequipa earthquake ($M_L=6.9$, $M_w=8.2$) and of three of its aftershocks of larger magnitude (June 25, $M_w=6.8$; July 5, $M_w=6.5$; July 7, $M_w=7.5$), is subject to analysis based on the modeling of P-waves at teleseismic distances. The results suggest that the Arequipa earthquake, as well as the June 25 and July 7 aftershocks, present focal mechanism of inverse type, with the nodal plane dip in the ENE-direction almost horizontal. The P-axes are oriented in the ENE-WSW direction. The June 5 aftershock has a mechanism of the normal type with nodal planes oriented in the NE-SW direction. The characteristics of the source time function (STF) suggest that the Arequipa earthquake had duration of 85 seconds and the occurrence of three ruptures, being the third that of greater size. The seismic moment is of the order of $1.3E+21$ Nm, equivalent to a magnitude $M_w=8.2$. The aftershocks analyzed in this paper show a STF that is relatively simple and shorter in duration. The Arequipa earthquake originated in the subduction process of the Nazca plate beneath the South American plate, being this seismogenic source the most important in Peru.

Introducción

La actividad sísmica en el borde Oeste de América del Sur y por ende en el Perú, tiene su origen en el proceso conocido como subducción y por el cual la placa de Nazca se introduce bajo la Sudamericana con una velocidad relativa de 8 cm/año en dirección $N80^\circ$ (DeMets et al, 1990). Esta alta velocidad de convergencia genera un fuerte acoplamiento de placas que produce sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad. Las características de la sismicidad generada por este proceso y

principalmente la que se produce en la región Sur de Perú, han sido analizadas y evaluadas por diversos autores (Stauder, 1975; Barazangi y Isacks, 1976; Grange et al, 1984; Schneider y Sacks, 1987; Rodriguez y Tavera, 1991; Tavera y Buforn, 1998; Tavera y Buforn, 2001; Bernal, 2002); siendo las principales las relacionadas con su distribución en superficie y con la profundidad de sus focos.

Por otro lado, en la región Sur de Perú la energía sísmica liberada por terremotos de magnitud mayor asociados al proceso de subducción, es menor en comparación con la observada en la región Central del Perú debido a la poca frecuencia de ocurrencia de terremotos de magnitud elevada. Según Dorbath et al., (1990), en la región Sur los terremotos destructores presentan periodos de retorno del orden de 100 años, siendo más común la ocurrencia de sismos de profundidad intermedia, los mismos que frecuentemente producen daños leves en superficie, tal como ocurrió con los terremotos del 8 de Octubre de 1998 y 3 de Abril de 1999 (Tavera et al., 2000). El último terremoto de magnitud elevada y foco superficial, ocurrió el del 13 de Agosto de 1868 ($M_w=9.0$) y es considerado como el más destructivo del cual se tiene información confiable. Otros terremotos que produjeron destrucción en menor escala fueron los de 1913, 1942 y recientemente el de 1996 que generó en gran parte de la región sur intensidades del orden de V en MM.

El 23 de Junio de 2001 y después de 133 años, la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de foco superficial y magnitud elevada ($M_L=6.9$, $M_w=8.4$ CMT), el mismo que produjo intensidades máximas del orden de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Este terremoto fue conocido como “Terremoto de Arequipa” tuvo gran duración y de acuerdo a las características de los daños observados, es posible que se haya debido a un complejo proceso de ruptura.

En este estudio se presenta los resultados preliminares obtenidos para conocer la orientación de la fuente del terremoto de Arequipa y analizar su proceso de ruptura utilizando información sísmica de la red mundial. La disponibilidad y la buena calidad de esta información ha permitido analizar la complejidad de este terremoto, así como estimar la profundidad de su foco, la orientación de la fuente sísmica y su tamaño.

Similar procedimiento se sigue para analizar los procesos de ruptura y orientación de la fuente de tres réplicas de mayor magnitud ocurridos el 25 de Junio, 5 y 7 de Julio de 2001.

Orientación de la Fuente Sísmica

Metodología

A fin de cuantificar la orientación de la fuente (mecanismo focal), la profundidad del foco (h), la función temporal de la fuente sísmica (STF) y el momento sísmico escalar (M_0), se realiza el modelado de la amplitud y forma de las ondas P registradas en estaciones sísmicas localizadas a distancias telesísmicas ($30^\circ < d < 90^\circ$) siguiendo la metodología desarrollada por Nabeleck (1984). Este método, permite ajustar mediante la técnica de mínimos cuadrados el grado de correlación existente entre los registros observados y teóricos generados para una fuente puntual cuya orientación es definida previamente. Es decir, mediante un proceso iterativo se pretende hacer mínima la desviación estándar de los residuos de la correlación existente entre los registros observados y teóricos, siendo este evaluado a partir de la “raíz media cuadrática (RMS)” del ajuste. Los registros teóricos son construidos a partir de las fases directas P y S combinadas con las reflejadas en la superficie libre (pP, sP y sS) y cuyas amplitudes son corregidas por los factores de expansión geométrica y atenuación usando el operador de Futterman. A fin de facilitar el modelado de las ondas de volumen, las amplitudes de los registros han sido normalizadas a una amplificación de 5000 y a una distancia epicentral de 40° .

El procedimiento seguido durante el modelado es similar al de Taymaz et al., (1990), Tavera y Buforn (1998) y Tavera y Buforn (2001). El proceso se inicia considerando como orientación para la fuente la obtenida a partir de la polaridad de la onda P (Tavera, en este informe) y los parámetros hipocentrales presentados en la Tabla 1 según Tavera et al., (en este informe). Como parte del procedimiento de inversión, inicialmente la orientación de la fuente es fijada; mientras que, los valores para la profundidad del foco y la función temporal de la fuente sísmica varían de manera independiente hasta lograr obtener un valor mínimo para el RMS del ajuste entre los registros observados y teóricos.

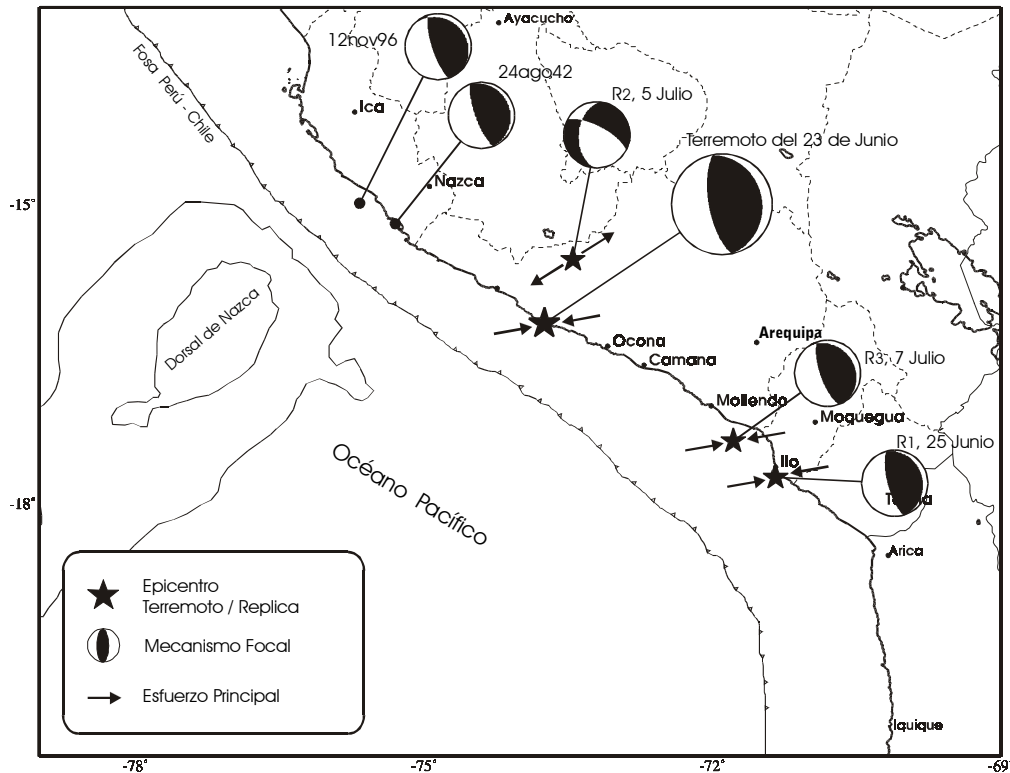


Figura 1. Localización epicentral del terremoto de Arequipa y replicas de magnitud mayor, así como de los terremotos de Nazca de 1942 y 1996. Además se presenta los mecanismos focales y orientación de los esfuerzos principales (compresión y tensión).

Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

El epicentro del terremoto de Arequipa fue localizado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña en el departamento de Arequipa (Figura 1) y presentó una magnitud de $M_L=6.9$ y $M_w=8.4$ según el CMT (Universidad de Harvard). La calidad de los registros obtenidos para este terremoto (relación señal/ruido mayor a 150), permitió analizar y evaluar la complejidad de la señal correspondiente al grupo de la onda P, tal como se observa en la Figura 2 y cuyos registros corresponden a las estaciones de DBIC y SJG, ambas de la red mundial y ubicadas en la Cote d'Ivoire y Puerto Rico. En la Figura 2a, se observa que el registro del terremoto de Arequipa presente al inicio de la señal, dos pulsos de amplitud pequeña (E1, E2) separados por 6 segundos y un tercer pulso de mayor amplitud aproximadamente 40 segundos después. Estas características sugieren que el terremoto de Arequipa se inicia con dos rupturas menores y después de 40 segundos se produce otra de mayor tamaño liberando mucha más energía.

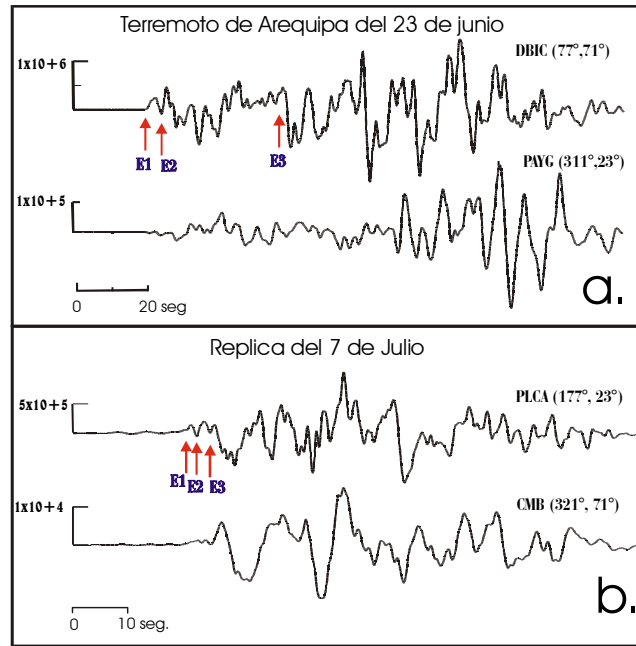


Figura 2. Registros telesísmicos del grupo de la onda P para el terremoto de Arequipa (a) y replica del 7 de Julio (b). La amplitud de la señal está expresada en cuentas. En paréntesis se indica el azimut y la distancia epicentral en grados para cada estación sísmica. E1..E3, indica el número de evento o ruptura.

En este estudio se realiza el modelado de 11 registros de la onda P distribuidos en su mayoría en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal. Según el procedimiento descrito anteriormente, el mejor ajuste entre los sismogramas observados (línea oscura) y teóricos (línea gris) fue obtenido para un RMS de 0.30 y la solución se presenta en la Figura 3. En esta figura se observa que el mecanismo focal corresponde a una falla inversa con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, buzando uno de los planos 26° hacia el ENE y el otro 65° hacia el WSW respectivamente. En general, la correlación obtenida entre los registros observados y teóricos es buena; sin embargo, algunos picos de amplitud al final de la señal no han sido correctamente modelados, lo cual sugiere la existencia de un posible efecto de directividad de la ruptura; es decir, correspondería a un proceso de ruptura unilateral. Asimismo, en la Figura 3 se observa que la función temporal de la fuente (STF) es compleja (área sombreada) y tiene una duración de 85 segundos, tiempo durante el cual la energía se ha liberado en varias etapas y por fuentes distribuidas sobre el mismo plano de falla. Las dos primeras fuentes corresponden a rupturas menores con duraciones de 6 y 9 segundos; mientras que, la tercera corresponde a una ruptura mayor que se inicia con

una lenta liberación de la energía y una duración total de 70 segundos. Estos resultados son similares a los observados directamente sobre la señal sísmica (Figura 2). Esta metodología ha permitido estimar la profundidad del foco del terremoto en 28 km y obtener un momento sísmico escalar de $1.3E+21$ Nm equivalente a una magnitud Mw de 8.2.

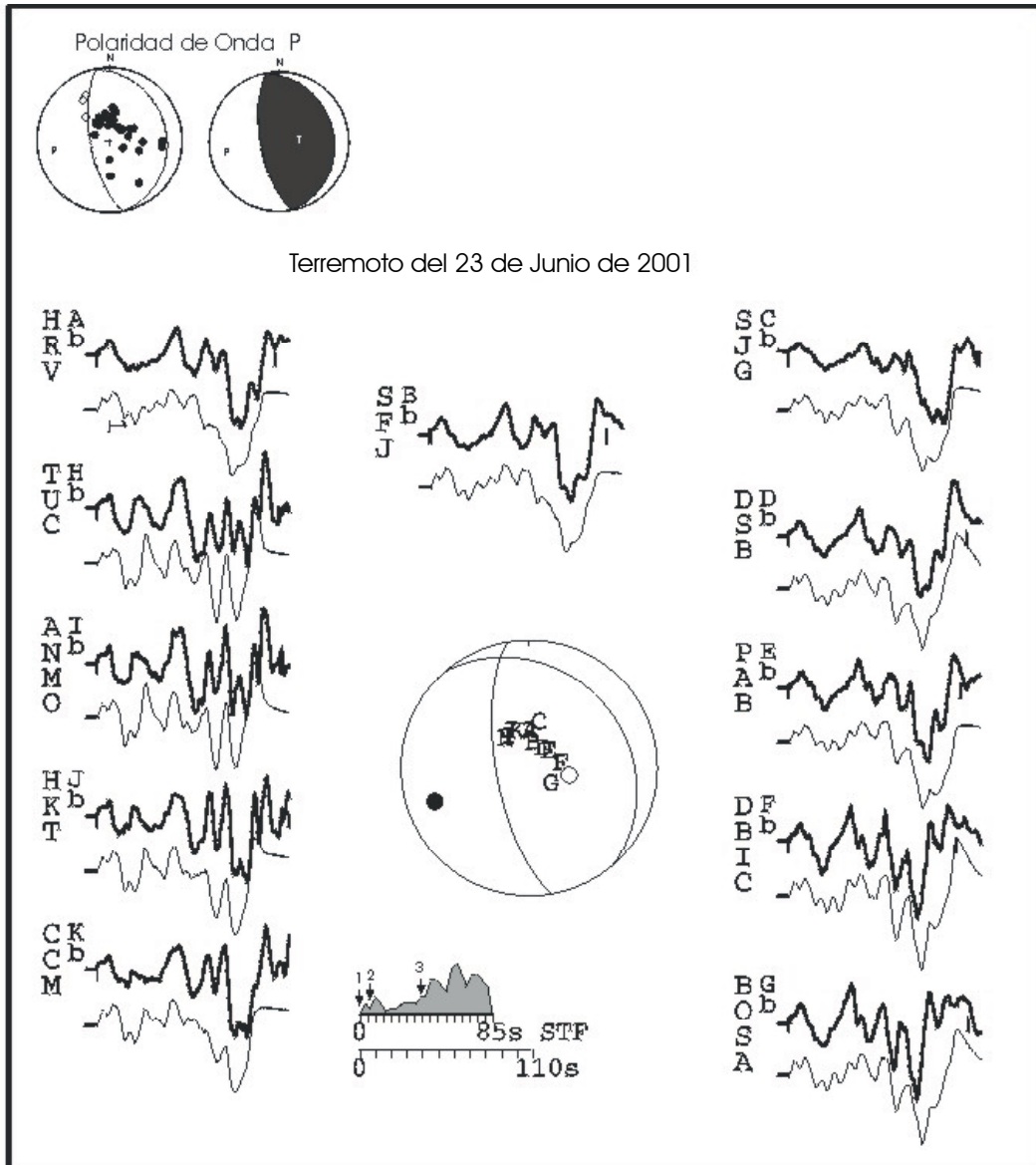


Figura 3. Resultado del modelado de ondas P para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Las estaciones son presentadas con una letra sobre la esfera focal. Registros observados en negro y teóricos en gris. El área sombreada indica la Función Temporal de la Fuente Sísmica (STF). La escala inferior corresponde a la longitud del registro. Los círculos en negro identifica al eje de tensión (T) y el vacío al eje de compresión (P). Los registros han sido normalizados a una magnificación de 5000. Arriba se muestra el mecanismo focal obtenido por Tavera (este volumen) a partir de la polaridad de la onda P. El cuadrante negro corresponde al de compresión y el blanco a dilatación.

Réplica del 25 de Junio de 2001

El epicentro de esta réplica fue ubicado a 11 km al Sur de la localidad de Ilo (Figura 1) y para el modelado de ondas de volumen se utiliza 10 registros de la onda P distribuidos en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal. El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30 y su solución se presenta en la Figura 4a. En dicha figura se observa que el mecanismo focal es similar al obtenido para el terremoto de Arequipa y la correcta correlación entre las señales teóricas y observadas permite obtener una profundidad para el foco de 25 km. La STF es simple y tiene una duración de 8 segundos aproximadamente y un momento sísmico escalar de $9.5E+18$ Nm equivalente a una magnitud M_w de 6.8.

Réplica del 5 de Julio de 2001

La réplica del 5 de Julio tuvo su epicentro a 25 km al NW de la localidad de Caravelí, Departamento de Arequipa (Figura 1). Para esta réplica se realiza el modelado utilizando 5 registros de la onda P distribuidos en el primer y segundo cuadrante de la esfera focal (Figura 4b). El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30, siendo la solución obtenida correspondiente a un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección N-S y NW-SE y buzamientos próximos a 45° (Figura 4b). La buena correlación entre los registros observados y teóricos permite ajustar la profundidad del foco en 64 km. La STF es simple y tiene una duración de 7 segundos. El momento sísmico escalar es de $5.8E+18$ Nm equivalente a una magnitud M_w de 6.5.

Réplica del 7 de Julio de 2001

Esta réplica es la de mayor tamaño de todas las ocurridas después del terremoto de Arequipa, siendo su epicentro ubicado a 23 km al Sur de la localidad de Punta de Bombón en Arequipa (Figura 1). Al igual que para el terremoto de Arequipa, se ha realizado el análisis de las características del registro de esta réplica en estaciones ubicadas a distancias telesísmicas. Así en la Figura 2b se presenta el registro correspondiente a la estación de PLCA y CMB ubicados a distancias epicentrales de 23° y 71° (Argentina y California, EEUU), y en ellas se observa que esta réplica presenta una secuencia de hasta tres pulsos iniciales de baja amplitud (E1, E2, E3) y al menos otras tres de mayor amplitud pero de corta duración.

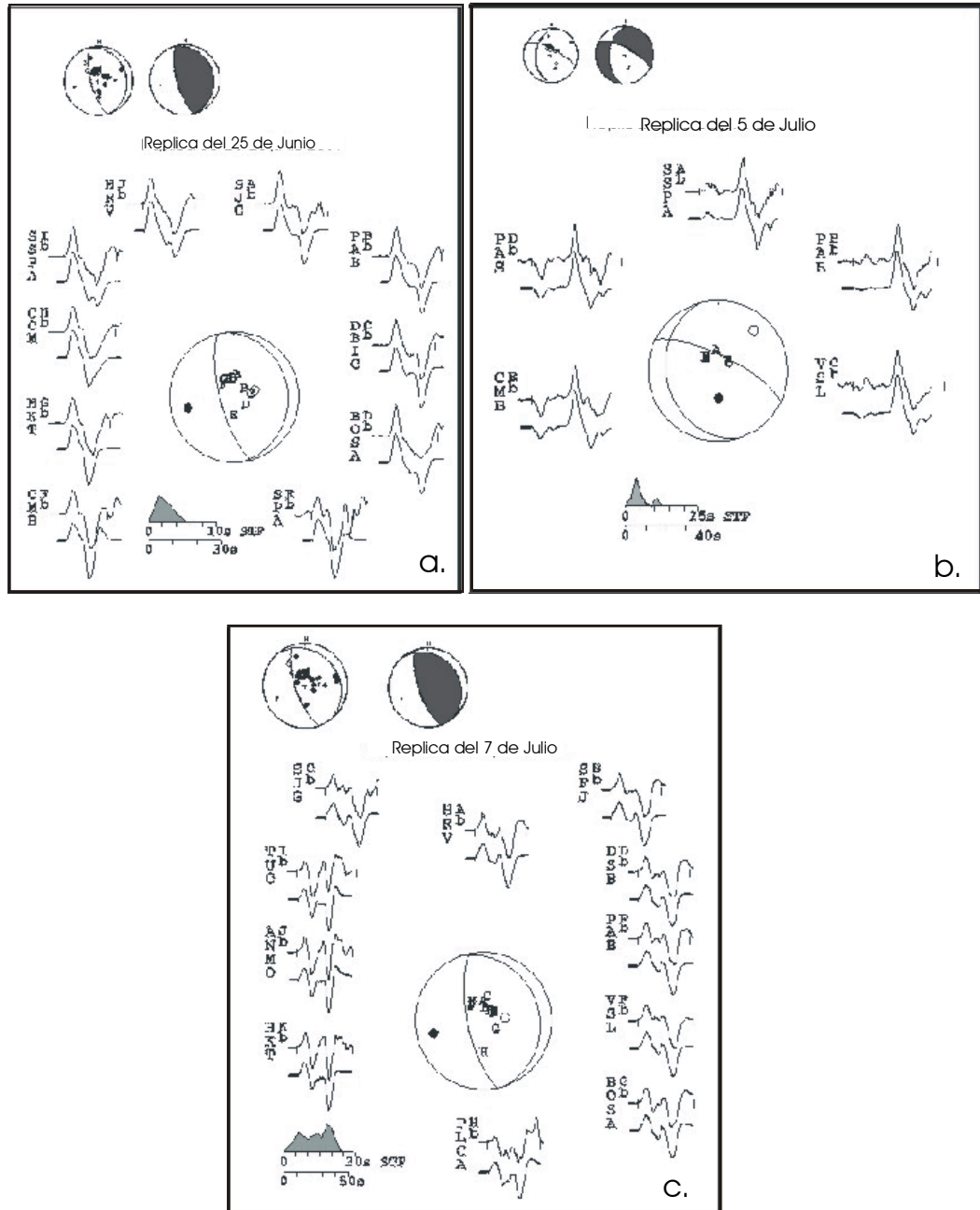


Figura 4. Resultados del modelado de ondas P para las replicas del 25 de Junio (a), 5 de Julio (b) y 7 de Julio (c). Otros, ver Figura 3.

El modelado de ondas de volumen se realiza con 11 registros de la onda P distribuidos en el primer, segundo y cuarto cuadrante de la esfera focal (Figura 4c). El mejor ajuste entre los registros observados y teóricos ha sido obtenido para un RMS de 0.30, siendo la solución para el mecanismo focal igual a la obtenida para el terremoto de Arequipa. La correlación ente los registros observados-teóricos ha permitido estimar una profundidad para el foco de 19 km. La STF muestra la complejidad del proceso de ruptura asociado a esta réplica (área sombreada) con una duración de 25 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas aleatorias que liberaron en total una energía equivalente a un momento sísmico escalar de $1.9E+20$ Nm, el mismo que corresponde a una magnitud Mw de 7.5.

Orientación de los Esfuerzos Principales

Los terremotos de magnitud elevada que frecuentemente ocurren en el borde Oeste de Perú, son debidos a la fricción de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso conocido como subducción. En este proceso, los terremotos presentan mecanismos focales de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo el plano que buza en dirección ENE prácticamente horizontal y coherente con el tipo de subducción característico de esta región.

El mecanismo focal del terremoto de Arequipa y de sus réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio presentan características similares a otros terremotos ocurridos en la misma región y con origen en el mismo proceso. La réplica del 5 de Julio corresponde a un mecanismo de tipo normal con planos nodales orientados en dirección N-S y NW-SE, siendo el plano con buzamiento hacia el NE próximo a la vertical. En la Figura 1 se presenta los mecanismos focales del terremoto de Arequipa y de sus réplicas, además de los correspondientes a los terremotos de Agosto de 1942 y Noviembre de 1996. De acuerdo a las características sismotectónicas del proceso de subducción en el borde Oeste de Perú, los planos nodales que buzan en dirección NNE a NE corresponden a la superficie de contacto entre las placas de Nazca y Sudamericana a niveles superficiales.

En la Figura 1 se presenta además, la proyección horizontal de los ejes de presión (P) obtenidos para el terremoto de Arequipa y para dos de sus réplicas de magnitud mayor. Para la réplica del 5 de Julio se proyecta el eje e tensión (T). En todos

los casos, los ejes P y T se orientan en dirección ENE-WSW a NE-SW, coherente con la dirección de desplazamiento de la placa de Nazca bajo la Sudamericana.

Conclusiones

La orientación de la fuente y las características de los procesos de ruptura del terremoto de Arequipa y de tres de sus réplicas de magnitud mayor, han sido obtenidos utilizando datos telesismicos de la red mundial. Los mecanismos focales muestran que el terremoto de Arequipa y las réplicas del 25 de Junio y 7 de Julio corresponden a mecanismos inversos con planos nodales orientados en dirección NNW-SSE, siendo el plano que buza en dirección ENE prácticamente horizontal y coherente con el ángulo de inclinación de la placa e Nazca dentro del proceso de subducción. La orientación del eje de compresión es en dirección ENE-WSW similar con la dirección de desplazamiento de las placas. La réplica del 5 de Julio presenta un mecanismo de tipo normal con planos orientados en dirección N-S, NW-SE, siendo el plano con buzamiento hacia el NE próximo a la vertical. La profundidad para los focos del terremoto de Arequipa es de 28 km; mientras que, para las réplicas es de 25 km (25 de Junio), 64 (5 de Julio) y 19 km (7 de Julio). Los momentos sísmicos escalares son de $1.3E+21$ Nm para el terremoto de Arequipa y para las réplicas del 25 de Junio, 5 y 7 de Julio de $9.5E+18$ Nm, $5.8E+18$ Nm y $1.9E+20$ Nm respectivamente.

La STF para el terremoto de Arequipa muestra el carácter complejo de la ruptura con una duración de 85 segundos, tiempo durante el cual se produjo hasta tres rupturas aleatorias, las dos últimas separadas de la primera por 6 y 40 segundos. La última ruptura fue de mayor tamaño y duración. Las características de la señal sísmica y de la STF muestran una evidente propagación unilateral de la ruptura hacia el SE, la misma que será evaluada en estudios posteriores.

Bibliografía

- Barazangi, M. y Isacks, B. (1976). *Geology*, 4, 686-692.
- Bernal, I. (2002). Tesis de Ingeniería, Univ. Nac. San Agustín de Arequipa, 220 p.
- Brillinger et al., (1980). *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, 419-436.
- Dorbath et al., (1990). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 551-576.
- Grange et al., (1984). *Jour, Geophys. Res.*, 89, 6139-6152.

- Nabeleck, (1984). Tesis PHD, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Rodriguez y Tavera, (1991). *Rev. Bras. Geofísica*, 9, 141-159.
- Schneider y Sacks, (1987). *Jour, Geophys. Res.*, 92, 13887-13902.
- Stauder, (1975). *Jour. Geophys. Res.*, 80, 1058-1064.
- Tavera y Buforn, (1998). *Revista Física de la Tierra*, U.C.M.
- Tavera y Buforn, (2001). *Journal of Seismology*, 5, 519-539.
- Taymaz et al., (1990). *Geophys. J. Int.*, 102, 695-731.

Nombre de archivo: sismo7
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Proceso de Ruptura del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:38 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:38 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:38 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 12
Número de palabras: 2,612 (aprox.)
Número de caracteres: 14,890 (aprox.)

Características Espacio-Tiempo del Proceso de Ruptura del Terremoto del 23 de Junio de 2001 (Región Sur del Perú)

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En el presente estudio se analiza las características del complejo proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001 a fin de conocer la dirección de propagación de la energía y la ubicación epicentral de otros posibles puntos de ruptura. Para tal fin, se analiza en detalle las formas de onda de 8 registros teleseísmicos distribuidos alrededor del epicentro del terremoto y los resultados obtenidos por Kikuchi y Yamanaka (2001). Las características de las formas de onda, amplitudes y periodos, sugieren que la mayor energía se ha liberado en dirección SE (77°-120° Sur). Asimismo, se identifica la ocurrencia de tres rupturas aleatorias separadas de la primera por 5-6 y 36-40 segundos, siendo la última de mayor tamaño y ubicada cerca de la localidad de Camaná (Arequipa), coincidiendo con el área de mayor daño y con la afectada por el tsunami generado por dicho terremoto.

Abstract

This study analyzes the characteristics of the complex rupture process of the June 23, 2001 earthquake in order to determine the direction of propagation of the energy and the epicentral location of other possible rupture points. For this purpose, we analyze in detail the waveforms of 8 teleseismic records distributed around the earthquake's epicenter, as well as the results obtained by Kikuchi y Yamanaka (2001). The characteristics of the waveforms, their amplitudes and periods, suggest that most energy was released in the SE-direction (77°-120° S). Also, we identify the occurrence of three related ruptures separated from the first by 5-6 and 36-40 seconds respectively, the latter being larger in size and located close to town of Camaná (Arequipa), which is precisely the area that suffered the greatest damage and that was affected by tsunami produced by the earthquake.

Introducción

En la región Sur de Perú, el 23 de Junio de 2001 ocurre un terremoto de magnitud elevada (8.2 Mw) el día 23 de Junio de 2001, que causó daños importantes en los departamentos de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna. Este terremoto presentó varias características importantes como su gran duración, distribución preferencial de las réplicas y daños en toda la región Sur, lo que sugiere que se debió a un proceso complejo de ruptura. El epicentro del terremoto fue localizado por el Instituto Geofísico del Perú, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Departamento de Arequipa) y

produjo intensidades máximas del orden de VII-VIII (MM) desde Ocoña hasta la ciudad de Iquique en Chile. Estos resultados indican que en dirección NW, a partir del epicentro, el terremoto no causó mayores efectos. Después de ocurrido el terremoto del 23 de Junio, algunos distritos ubicados en la línea de costa de la localidad de Camaná fueron destruidos por un tsunami de carácter local con olas que presentaron alturas del orden de 5-7 metros.

El terremoto del 23 de Junio corresponde a un típico terremoto interplaca asociado a la convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso conocido como subducción. En este estudio se analiza las formas de onda de ocho registros telesísmicos a fin de conocer las características de la propagación de la ruptura producida por el terremoto del 23 de Junio. Estos resultados son comparados y discutidos con los obtenidos por Kikuchi y Yamanaka (2001).

Análisis de las Formas de Onda

La distribución azimutal de las formas de onda del terremoto del 23 de Junio se presenta en la Figura 1. Las señales han sido deconvolucionadas de su respuesta instrumental y normalizadas a la escala de la señal de mayor amplitud, en estas condiciones los registros en desplazamiento pueden ser directamente comparables. En dicha figura se observa que existe una clara variación de la amplitud total de la señal, de Norte a Sur, siendo mayores para las estaciones de DBIC y BOSA ubicadas a 77° y 120° de azimut con relación al epicentro del terremoto. De existir una posible directividad en la propagación de la ruptura, tal como se muestra en el esquema superior de la Figura 1, las máximas amplitudes de la señal emitida por la fuente se presentarán en la dirección en la cual se propaga la energía; en tal sentido y en el caso del terremoto del 23 de Junio, la energía y la ruptura se habría propagado en dirección SE.

En la Figura 2 se muestra los resultados obtenidos por Kikuchi y Yamanaka (2001) para el terremoto del 23 de Junio a partir de la generación de registros teóricos. En la figura se muestra la distribución espacio-tiempo, sobre el plano de falla, del vector de dislocación. Según los autores, la inclinación del plano de falla es del orden de 21° y la ruptura se inicia en el círculo pequeño que aparece en la figura junto al epicentro del terremoto obtenido por

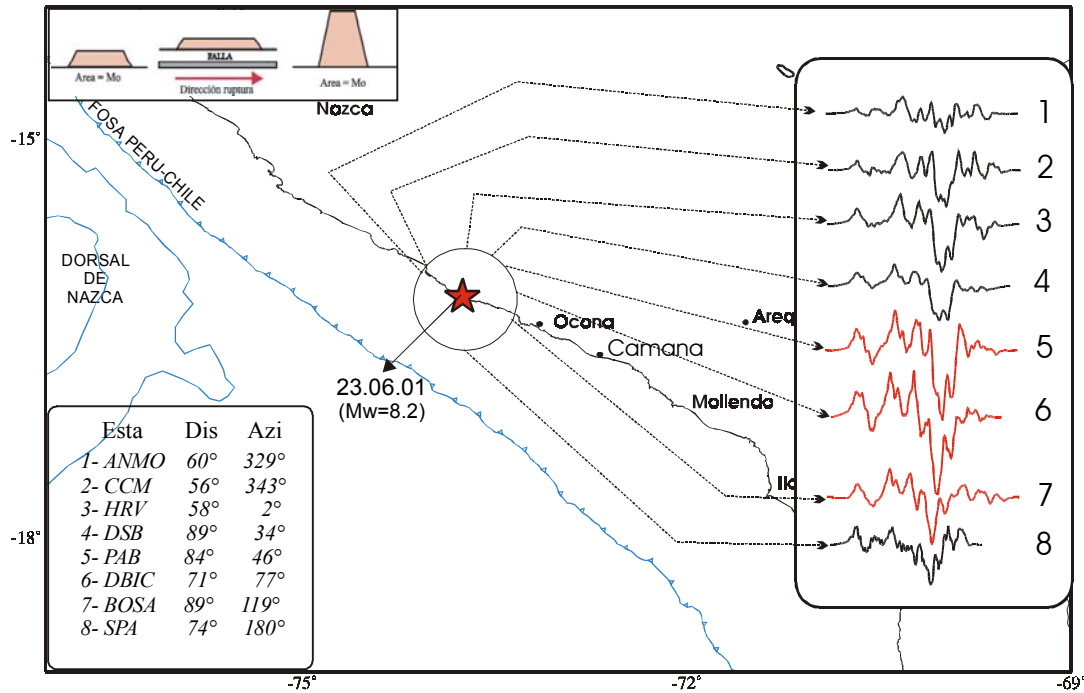


Figura 1. Distribución azimutal de los registros del terremoto de Arequipa del 23 de Junio obtenidos de estaciones ubicadas a distancias telesísmicas. Cada registro es identificado por su número en el cuadro inferior (Dis, distancia epicentral; Azi, azimut epicentro-estación en grados). El cuadro superior indica las características de la fuente cuando existe propagación unilateral de la ruptura.

el IGP. Los máximos valores para el vector de dislocación se concentra entre las localidades de Camaná y Mollendo, siendo estos del orden de 4.0 metros (valor promedio de 2.8 m) dentro de un área total de 200x100 km². Esta área se ubica a una distancia de 150 km en dirección SE a partir del punto inicial de la ruptura. Según estos resultados, la ruptura se habría propagado en dirección N130° a partir de un foco ubicado a una profundidad de 30 km. Todo este proceso habría liberado una cantidad de energía equivalente a 2.2E+21 Nm (8.2Mw) durante un periodo de tiempo de 107 segundos.

Por otro lado, el análisis de las formas de onda de las estaciones ANMO y BOSA ubicadas a 320° y 120° de azimut con respecto al epicentro del terremoto (Figura 3); es decir, registros de estaciones ubicadas en direcciones contrarias y paralelas a la línea de costa, permiten estimar el tiempo de ocurrencia y posible ubicación de las rupturas secundarias ocasionadas por el terremoto del 23 de Junio. El análisis de las formas de onda y los resultados obtenidos por Kikuchi y Yamanaka (2001) han mostrado que la ruptura y energía liberada por el terremoto se ha propagado en

dirección SE, ósea en dirección de la estación BOSA. Asimismo, y de acuerdo a la forma de la función temporal de la fuente sísmica (STF) obtenida para el terremoto por Tavera (en este informe) en comparación con la señal sísmica en la estación BOSA, es posible identificar la ocurrencia aleatoria de al menos tres puntos de ruptura o liberación de energía. La segunda y tercera ruptura se habrían producido 4 y 36 segundos después de la primera. Considerando una velocidad de ruptura de $V_r=0.7*V_s$ ($V_s=4.6$ km/seg), la segunda y tercera ruptura se ubicarían a distancias de 20 y 115 km de la primera en dirección SE. De estas rupturas la más importante, por la cantidad de energía liberada, se ubicaría próxima a la localidad de Camaná, tal como se observa en la Figura 3.

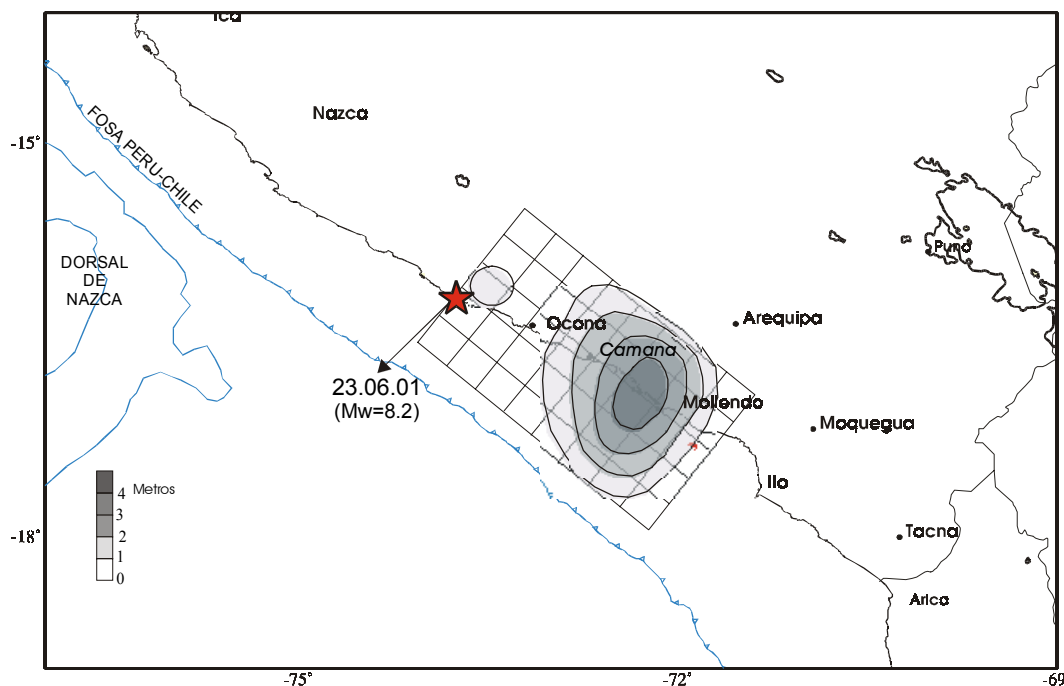


Figura 2.- Distribución del vector de dislocación asociado al proceso de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001, según Kikuchi y Yamanaka (2001).

Resultados

Los resultados obtenidos en este estudio, desde un punto de vista cualitativo, han permitido evaluar las características de propagación de la ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001. La variación azimutal de las amplitudes de la señal sísmica en ocho registros teleseísmicos, ha permitido considerar que la energía liberada por el terremoto

del 23 de Junio se ha propagado en dirección SE, tal como sugieren los resultados obtenidos por Kikuchi y Yamanaka (2001). Durante todo el proceso de ruptura que acompañó al terremoto del 23 de Junio, se ha producido tres rupturas secundarias, siendo las dos primeras de menor magnitud y duración; mientras que, la tercera habría liberado prácticamente el total de la energía durante un periodo de tiempo mayor. Esta tercera ruptura se ubicaría a distancias de 115-150 km en dirección SE a partir del epicentro del terremoto. Estos resultados serían coherentes con la distribución de daños en la región Sur y con el área en donde se originó el tsunami que afectó a la localidad de Camaná.

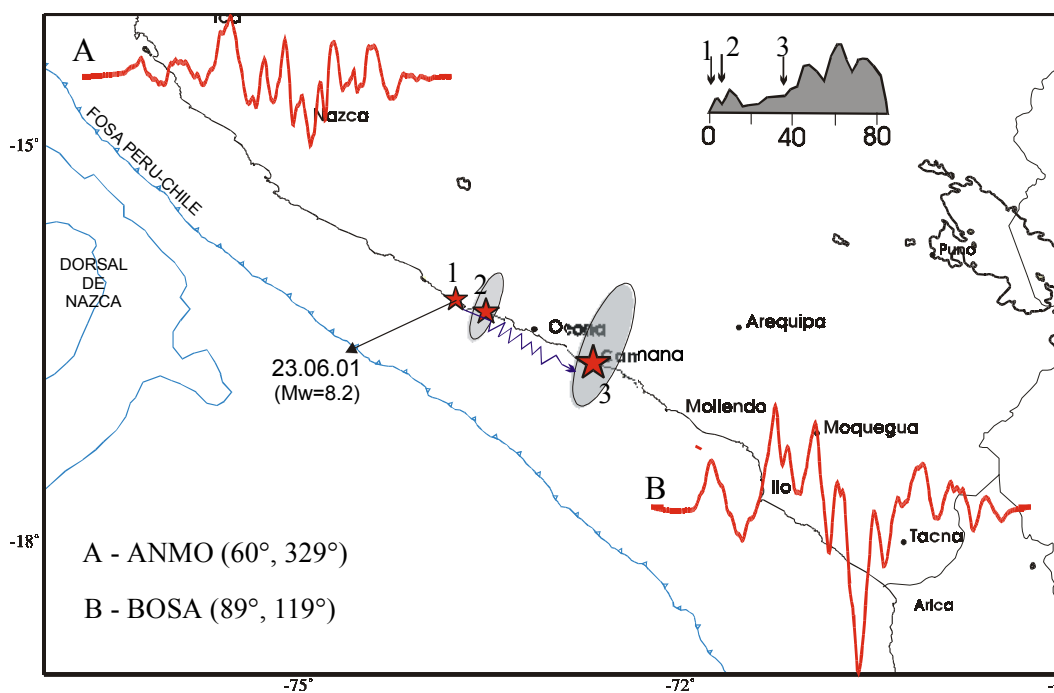


Figura 3. Características de las formas de onda de las estaciones de ANMO y BOSA (distancia epicentral y azimut en grados) en comparación con la función temporal de la fuente sísmica (STF) según Tavera (en este informe). Los números sobre las estrellas y la STF indican el orden de ocurrencia de las rupturas asociadas al terremoto del 23 de Junio de 2001

El terremoto del 23 de Junio habría tenido una duración de 85-110 segundos, tiempo durante el cual se habría liberado una energía equivalente a un momento sísmico escalar de $1.3E+21$ Nm (8.2Mw). El área de ruptura obtenido a partir de la distribución espacial de las replicas por Antayhua et al (en este informe) es de 370×150 km²; es decir, mayor al estimado por Kikuchi y Yamanaka (2001) debido a que estos autores

solamente consideran el área en donde se ha producido la mayor dislocación (200x100 km²).

Bibliografía

Kikuchi y Yamanaka (2001). http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/

Nombre de archivo: sismo8
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Características espacio-tiempo del Proceso de Ruptura del
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:42 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:42 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:40 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 6
Número de palabras: 1,227 (aprox.)
Número de caracteres:6,994 (aprox.)

Orientación de la Fuente del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de algunas Réplicas Importantes

Hernando Tavera, Simeón Rodríguez y Efraín Fernández
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

Se analiza la orientación de la fuente sísmica del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de una serie de 15 réplicas importantes para las cuales se dispone de mecanismos focales. La distribución espacial de las réplicas muestra una propagación bilateral de la ruptura en dirección SE cubriendo un área de 370x150 km². El mecanismo focal del terremoto de Arequipa y de las réplicas ubicadas entre la línea de costa y la fosa indican el desarrollo de un proceso compresivo dentro de un rango de profundidad menor a 50 km y con eje de presión orientado en dirección similar al desplazamiento de las placas. Las réplicas que se ubican en el interior del continente corresponden a procesos extensivos producto de la deformación interna de la placa de Nazca a profundidades del orden de 60 km y a la deformación continental cerca de la superficie.

Abstract

We analyze the orientation of the seismic source of the June 23, 2001 Arequipa earthquake and of a series of 15 important aftershocks whose focal mechanisms are available. The spatial distribution of the aftershocks shows a bilateral propagation of the rupture in the SE-direction covering an area of 150x370 km². The focal mechanism of the Arequipa earthquake and of the aftershocks located between the coastline and the trench indicate the development of a compressive process within a depth range smaller than 50 km and with the pressure axes oriented in a direction similar to that of plate displacement. The aftershocks located in the continental interior correspond to extensive processes produced by the internal deformation of the Nazca plate at depths in the order of 60 km and to continental deformation close to the surface.

Introducción

En la región Sur de Perú, el terremoto del 23 de Junio de 2001 (Mw=8.2) ocurrió después de un periodo de silencio sísmico de 133 años, considerando al terremoto de Agosto de 1868 como el último ocurrido en esta región. El terremoto de Arequipa fue sumamente destructivo ya que produjo daños graves en la infraestructura local y causó muchas muertes en los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna. La intensidad máxima observada en estos departamentos fue de VII-VIII MM, el mismo que se extendió hasta las ciudades de Arica e Iquique en Chile.

El estudio de las réplicas obtenidas por una red sísmica local (Antayhua et al., en este informe), ha permitido inicialmente observar un área de ruptura de 370x150 km², además de una posible propagación de la ruptura en dirección SE. Asimismo, Tavera (en este informe) indica que el terremoto de Arequipa del 23 de Junio obedece a un

proceso compresivo cuyo mecanismo focal sugiere un eje de presión orientado en dirección E-W aproximadamente; sin embargo, no se conoce si las réplicas obedecen a este mismo proceso o si existe una diversidad de orientaciones para los ejes principales propios de los procesos complejos de ruptura asociados a terremotos de magnitud elevada. En este estudio se presenta los parámetros focales del terremoto de Arequipa y de una serie de 15 réplicas de magnitud mayor e igual a 5 mb para los cuales la Universidad de Harvard ha reportado valores para sus mecanismos focales. También se discute las características de la distribución de los ejes de esfuerzo principal, además de realizar el recálculo de los parámetros hipocentrales de las réplicas utilizando datos de la Red Sísmica Nacional a cargo del Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Tabla 1

Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de algunas de sus réplicas importantes

Fecha ddmmaaaa	Tiempo GMT hh.mm.ss	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Prof. (km)	Mag. (mb)	N°
23062001	20:33:14.2	-16.20	-73.75	28.0	6.9	1
25062001	03:49:	-16.02	-74.01	24.4	5.0	5
25062001	06:38:	-16.42	-73.10	25.5	5.1	6
25062001	22:14:	-17.26	-70.53	60.2	5.4	7
26062001	04:18:0000	-17.73	-71.34	25.0	6.0	2
26062001	08:47	-15.79	-74.19	33.0	5.1	8
26062001	17:27:	-17.79	-72.32	14.5	5.2	9
27062001	00:21:	-18.16	-71.65	26.5	5.2	10
28062001	21:35:	-17.16	-73.15	14.2	5.0	11
29062001	22:33:	-15.86	-70.92	8.1	5.0	12
30062001	08:57:	-18.11	-72.27	5.8	5.5	13
01072001	11:06:	-17.41	-73.34	15.0	5.1	14
03072001	12:57:	-16.67	-74.05	8.8	5.4	15
05072001	13:53:0000	-15.56	-73.45	64.0	6.1	3
07072001	09:38:0000	-17.38	-71.78	19.0	6.5	4
27072001	22:42:	-17.07	-73.15	9.7	5.2	16

Datos

Los parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa y de sus réplicas principales contenidas en la Tabla 1, fueron obtenidos por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) utilizando datos de estaciones de la Red Sísmica Nacional distribuidas en la región Sur (www.igp.gob.pe/cns/). Para calcular los parámetros hipocentrales de cada réplica se ha utilizado lecturas de las fases P y S en más de 4 estaciones, el modelo de

velocidad de Grange et al., (1984), además de la relación de velocidades de $V_p/V_s=1.78$ obtenido por Antayhua et al., (en este informe) a partir del registro por una red local de las réplicas del terremoto. El programa de localización corresponde a una versión del Fasthypo modificado para su uso en el IGP por Rodríguez (1994). En general, el rango de error obtenido en los parámetros hipocentrales es menor a 5 km. La magnitud de las réplicas fue estimada utilizando la duración del registro de la señal y una relación obtenida del ajuste de mínimos cuadrados entre la magnitud mb reportada por el NEIC y su registro en las estaciones de la red sísmica nacional.

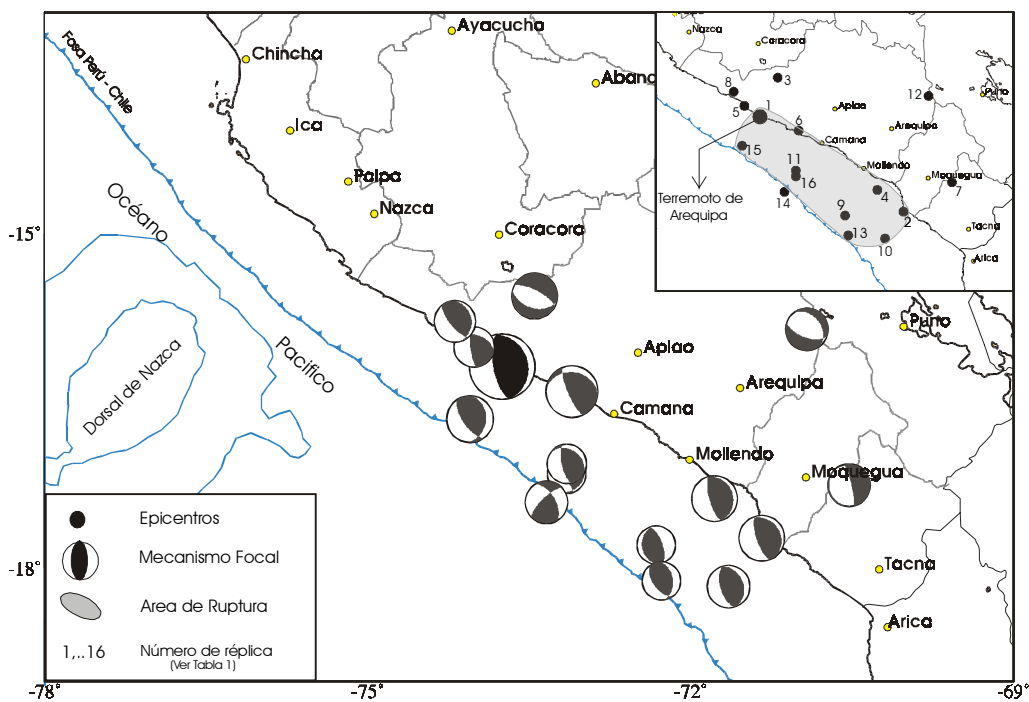


Figura 1. Distribución espacial y mecanismo focal del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de algunas réplicas importantes

En el extremo superior de la Figura 1 se muestra la distribución espacial de las réplicas utilizadas en este estudio y en ella se observa que todas se distribuyen entre la línea de costa y la fosa sugiriendo que deben su origen al mismo proceso; es decir, la fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana dentro del proceso de subducción. Estas réplicas se distribuyen en dirección SE con respecto al epicentro del terremoto de Arequipa, sugiriendo la propagación de la energía y mostrando una superficie de ruptura del orden de $150 \times 370 \text{ km}^2$, similar al propuesto por Antayhua et al., (en este informe).

Las réplicas 3 y 7 se deben a procesos de deformación interna de la placa de Nazca a niveles intermedios y la réplica 12, a deformaciones producidas cerca de la superficie.

Orientación de la Fuente

Los parámetros que definen la orientación de la fuente del terremoto de Arequipa y para las réplicas 2, 3 y 4 fueron obtenidos por Tavera (en este informe), y para el resto de réplicas reportadas por la Universidad de Harvard a partir del método CMT (Centroid Moment Tensor). En general, el terremoto de Arequipa y las réplicas ubicadas entre la línea de costa y la fosa presentan mecanismos focales con similar orientación y describen el desarrollo de procesos compresivos originados por la convergencia de las placas, tal como se muestra en la Figura 1. Los planos nodales de estos mecanismos se orientan en dirección NNW-SSE coherente con la orientación del plano de fricción de placas y con la dirección de desplazamiento de la placa de Nazca (N80°). Asimismo, estas réplicas presentan profundidades menores a 50 km. Los mecanismos focales para las réplicas 3 y 7 son del tipo normal y presentan profundidades del orden de 60 km, lo cual indica que estos deben su origen al proceso de deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente como resultado del desplazamiento de las placas durante el terremoto de Arequipa.

La réplica 12, corresponde a uno de los sismos de magnitud moderada ($m_b=5.0$) producidos por el proceso de deformación continental a consecuencia del terremoto de Arequipa. Este sismo presenta un mecanismo de tipo normal y una profundidad para su foco del orden de 8.1 km coherente con el tipo de deformación presente en la Alta Cordillera. Al ocurrir este sismo, causó alarma en las localidades de Santa Lucía y Lampa (departamento de Puno) debido a que produjeron deslizamientos de tierra y piedras, además de emanaciones de agua. La intensidad evaluada en la ciudad de Puno y en la localidad de Ilave fue de IV (MM) y en Juliaca y Ayaviri de III (MM).

Distribución de Esfuerzos

En la Figura 2a se presenta el mapa de distribución de la proyección en superficie de los ejes P y T para el terremoto de Arequipa y réplicas principales según la Tabla 1. Los ejes de presión (P) de las réplicas ubicadas entre la línea de costa y la fosa presentan una orientación similar a la del terremoto de Arequipa; es decir, entre NE-SW

hasta NEE-SWW, coherente con el patrón de deformación regional según Tavera y Bufo (2001) y con la dirección del desplazamiento de placas según DeMets et al., (1990). En el interior del continente, la orientación de los ejes de tensión (T) sigue el mismo patrón definido anteriormente.

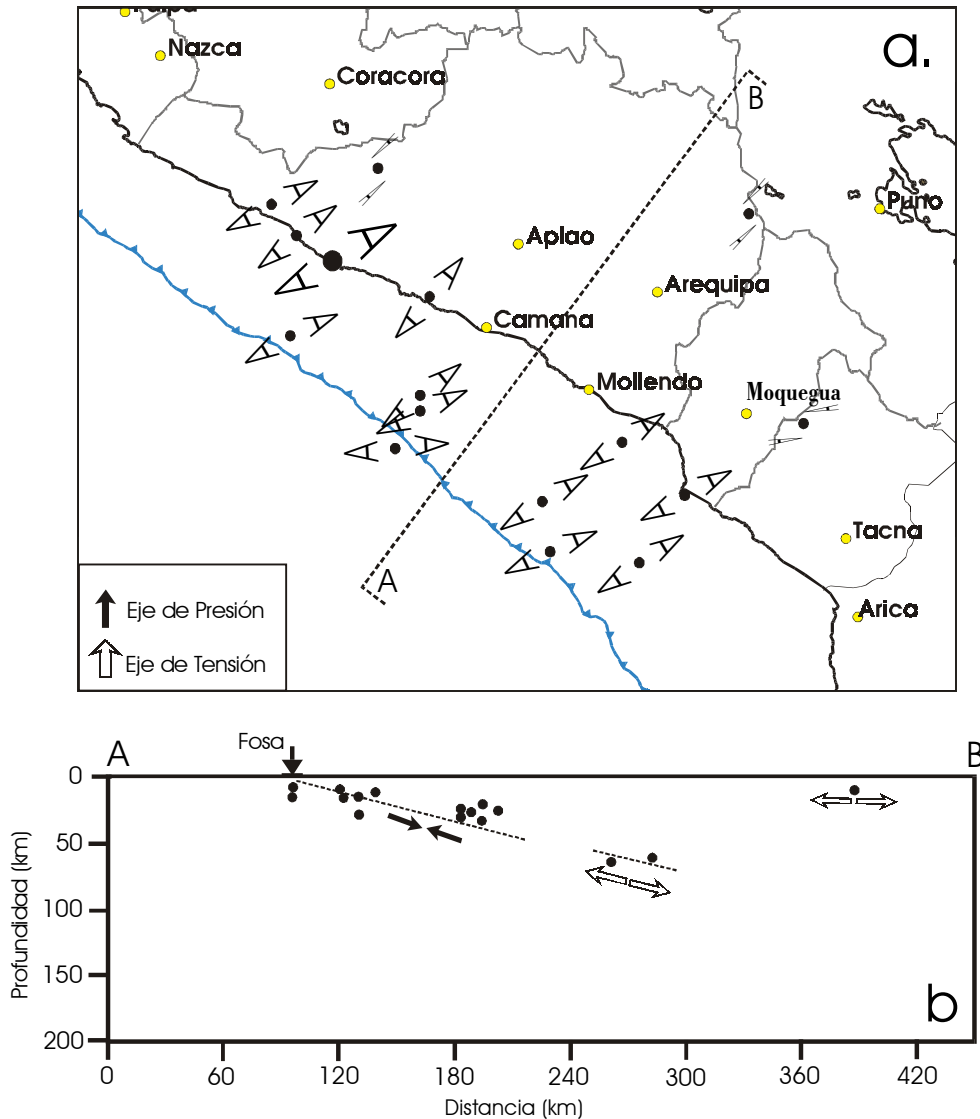


Figura 2. a). Distribución de la proyección en superficie de los ejes P y T para el terremoto del 23 de Junio de 2001 y réplicas principales. b) Sección vertical según la dirección A-B y principales ejes de esfuerzo.

La distribución del total de las réplicas en función de la profundidad de sus focos, muestra la presencia de dos tipos de deformación a diferentes niveles de profundidad. La primera corresponde a un proceso netamente compresivo debido a la convergencia de placas y que se desarrolla hasta una profundidad menor a 50 km. Este

proceso dió origen al terremoto de Arequipa y esta indicado en la Figura 2b con flechas negras. El segundo proceso de debe a la presencia de fuerzas de tensión a profundidades del orden de 60 km asociados a procesos de deformación interna de la placa de Nazca. Asimismo, a niveles muy superficiales, se ha producido una importante deformación de tipo extensional presente en la Alta Cordillera. Este último tipo de deformación se ha producido en respuesta a la deformación regional producida por el terremoto de Arequipa a todos los niveles de profundidad.

Conclusiones

El terremoto de Arequipa tuvo su origen en el proceso de convergencia de placas, desarrollado en la región Sur de Perú. La distribución espacial de las réplicas sugiere que la ruptura se propagó de forma unilateral desde el hipocentro, en dirección SE cubriendo un área de aproximadamente 370x150 km².

El terremoto de Arequipa y las réplicas que se ubican entre la fosa y la línea de costa presentan mecanismos focales de tipo inverso con planos nodales orientados en dirección perpendicular a la dirección de desplazamiento de las placas. La distribución de las réplicas en función de la profundidad de sus focos, sugiere que la superficie de fricción de placas alcanza una profundidad máxima del orden de 60 km. Las réplicas con epicentros en el interior del continente, presentan mecanismos focales de tipo normal y sugieren la ocurrencia de procesos extensivos a profundidades del orden de 60 km debidos probablemente a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente.

El terremoto de Arequipa y su serie de réplicas produjeron o reactivaron posibles fallas de tipo normal presentes en la Alta Cordillera.

Bibliografía

- DeMets et al., (1990). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.
- Rodríguez, (1994). Informe Interno, Instituto Geofísico del Perú, 14 p.
- Tavera et al., (2002). *Journal of Seismology*, (in press).
- Tavera y Buforn, (2001). *Journal of Seismology*, 5, 519-540.
- Wollard, (1975). *Rev of Geophys.*, 14, 87-137.

Nombre de archivo: sismo9
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Características de la Fuente del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:45 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:45 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 4 minutos
Impreso el: 07/08/2008 11:51 P.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 6
Número de palabras: 1,632 (aprox.)
Número de caracteres:9,304 (aprox.)

Parámetros del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres Réplicas de Magnitud Mayor deducidos del Análisis Espectral de Ondas de Volumen

Hernando Tavera y Yanet Antayhua
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este estudio se estima el momento sísmico escalar (M_0), el radio de fractura (r) y el desplazamiento medio (Δu) del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 y de tres de sus réplicas de magnitud mayor —25 de Junio, 5 y 7 de Julio— a partir de los espectros de amplitud de la onda P registrada a distancias tele-sísmicas y asumiendo un modelo de falla circular. Los resultados obtenidos indican para el terremoto de Arequipa un M_0 de $1.2E+21$ Nm equivalente a una magnitud $M_w=8.2$. Para las réplicas del 25 de Junio, 5 y 7 de Julio, el momento sísmico escalar es de $1.8E+19$ Nm ($6.8M_w$), $7.2E+18$ Nm ($6.5M_w$) y $2.0E+20$ Nm ($7.5M_w$) respectivamente.

Abstract

In this study, we estimate the scalar seismic moment (M_0), the fracture radius (r) and the median displacement (Δu) of the June 23, 2001 Arequipa earthquake and three of its aftershocks of largest magnitude —June 25, July 5 and 7— based on the amplitude spectra of the P -wave recorded at teleseismic distances and assuming a model of circular faulting. The results obtained suggest a M_0 of $1.2E+21$ Nm, equivalent to a magnitude $M_w=8.2$, for the Arequipa earthquake. For the June 25, July 5, and July 7 aftershocks, the scalar seismic moments are $1.8E+19$ Nm ($6.8M_w$), $7.2E+18$ Nm ($6.5M_w$) and $2.0E+20$ Nm ($7.5M_w$) respectively.

Introducción

El día 23 de Junio de 2001, un terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter afectó a toda la región Sur de Perú ocasionando un importante número de pérdidas humanas y destrucción en un buen número de localidades y ciudades de la región sur de Perú. El epicentro de este terremoto fue ubicado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) a 82 km en dirección NW de la localidad de Ocoña, aunque los mayores efectos fueron observados en dirección SE con respecto a su epicentro. Durante los primeros 30 días de ocurrido el terremoto, se ha registrado alrededor de 5000 réplicas y de estas, tres produjeron intensidades del orden de V en la escala Mercalli Modificada en las localidades de Mollendo, Ilo y Caraveli (ver Tavera, en este informe). Inicialmente, la magnitud del terremoto de Arequipa y de sus réplicas fueron proporcionadas por el IGP y por el National Earthquake Information Center (NEIC) en diferentes escalas generando incertidumbre en los usuarios de la información. En la Tabla 1 se observa que la magnitud expresada en la escala M_w es mayor que M_L obtenida por el IGP, esto debido probablemente a que la segunda hace uso de registros de alta frecuencia;

mientras que, la primera al ser estimada a partir de señales con predominio de frecuencias bajas permite que se considere toda la señal asociada a la ruptura, principalmente cuando estos procesos son heterogéneos o complejos.

A fin de determinar el tamaño del terremoto de Arequipa y de tres de sus réplicas mayores (Tabla 1), en este estudio se calcula el momento sísmico escalar a partir de los espectros de amplitud de la onda P registradas en seis estaciones sísmicas ubicadas a distancias telesísmicas ($>30^\circ$). Además del momento sísmico, se estima el radio de fractura (r) y el desplazamiento medio (Δu) de cada una de las réplicas antes indicados asumiendo un modelo de fractura de tipo circular.

Tabla 1.

Parámetros hipocentrales del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001 y de tres de sus réplicas principales.

Fecha dd:mm:aa	H. Origen hh:mm:ss.s	Lat.-S	Long.-W	Prof. km	Mag.	Agencia
23:06:01	20:23:04.4	16.20°	73.75°	28	6.9 ML/8.2Mw	IGP
23:06:01	20:33:13.0	16.15°	73.40°	33	8.4 Mw	NEIC
26:06:01	04:18:31.6	17.73°	71.34°	25	6.8 Mw	NEIC
05:07:01	13:53:49.7	15.56°	73.45°	64	6.6 Mw	NEIC
07:07:01	09:38:43.0	17.38°	71.78°	19	7.5 Mw	NEIC

Método

Los parámetros de la fuente de los terremotos pueden ser estimados a partir de dos de las características de los espectros de amplitud, la frecuencia esquina (f_c) y la parte plana del mismo (Ω_0). El valor de f_c es inversamente proporcional a las dimensiones de la fuente ($r_0=f_c^{-1}$); mientras que, Ω_0 es proporcional al momento sísmico escalar (Aki, 1967; Hanks y Wyss 1972; Thatcher, 1972; Stavrakakis et al., 1989). Si se considera una completa caída de esfuerzos, el momento sísmico es definido como (Keilis-Borok, 1960; Hanks y Wyss, 1972):

$$M_0(P) = 4\pi\rho k\alpha^3\Omega_0(P)G(\Delta)/R_{\theta\phi}(P)$$

Mientras que, la dimensión de la fuente y el desplazamiento medio pueden ser estimados a partir de (Brune, 1970):

$$r(P) = 2.34\alpha / 2\pi f_c(P) \qquad \Delta u = Mo(P) / \pi\mu r^2(P)$$

donde, α es la velocidad de la onda P, ρ la densidad del medio, $\Omega_0(P)$ la parte plana del espectro, $G(\Delta)$ el factor de expansión geométrica, k el coeficiente en la superficie libre, $R_{\theta\phi}$ el patrón de radiación de la onda P y μ la rigidez del medio.

Conocido el momento sísmico escalar, la magnitud M_w puede ser estimada con la siguiente relación: $M_w = (3/2) \log Mo - 10.73$

Tabla 2

Parámetros de las estaciones utilizadas en el análisis espectral de ondas de volumen. E, terremoto de Arequipa; R1, replica del 25 de Junio; R2 y R3 réplicas del 5 y 7 de Julio

Estación	Latitud	Longitud	Ubicación	
SJG	18.11	-66.15	Puerto Rico	E, R1, R3
ANMO	3.95	-106.46	Nuevo Mexico, USA	E, R3
DBIC	6.67	-4.85	Cote d'Ivoire	E, R1
PAB	39.54	-4.34	España	E, R1, R2, R3
SFJ	66.99	-50.61	Greenland	E
HRV	42.50	-71.55	Massachusetts, USA	E, R1, R3
CMB	38.03	-120.38	California, USA	R1, R2
CCM	38.05	-91.24	Missouri, USA	R1, R2
PAS	34.14	-118.17	California, USA	R2
VSL	39.49	9.37	Italia	R2
SSPA	40.63	-77.88	Pennsylvania, USA	R2
DUG	40.19	-112.81	Utah, USA	R2
PLC	37.63	-121.95	California, USA	R3
DSB	53.24	-6.37	Ireland	R3

Datos

La información utilizada en este estudio corresponde a los registros en velocidad del terremoto principal y de las réplicas de magnitud mayor obtenidos de seis (6) estaciones sísmicas ubicadas a distancias epicentrales mayores a 30°; es decir, a distancias telesísmicas a fin de evitar la triplicación de fases debido a procesos de reflexión o difracción de ondas en el manto terrestre. Las coordenadas de las estaciones se muestran en la Tabla 2.

Resultados

Los resultados obtenidos para el terremoto de Arequipa y sus réplicas se muestran en la Tabla 3 y en ella se observa que el momento sísmico obtenido para el terremoto de Arequipa se encuentra dentro del rango de valores reportados por otras agencias. Asimismo, los valores del M_0 obtenidos para las réplicas del 25 de Junio, 5 y 7 de Julio son similares a los reportados por el NEIC. Estos valores corresponden al promedio de los obtenidos para cada una de las seis estaciones, tanto para el terremoto de Arequipa como para sus réplicas. Un ejemplo de los espectros elaborados se presenta en la Figura 1.

Tabla 3

Parámetros de la fuente obtenidos a partir del espectro de ondas de volumen.

Fecha	M_0 (N.m.)	M_w	r (km)	ΔU (cm)
23.06.2001	1.2×10^{21}	8.2	99	130
26.06.2001	1.8×10^{19}	6.8	20	48
05.07.2001	7.2×10^{18}	6.5	18	24
07.07.2001	2.0×10^{20}	7.5	47	90

Por otro lado, la longitud del radio de ruptura del terremoto de Arequipa es estimada en 99 km, siendo este valor aproximadamente 4 veces menor que el reportado a partir de la distribución espacial de las réplicas por Antayhua et al., (en este informe).

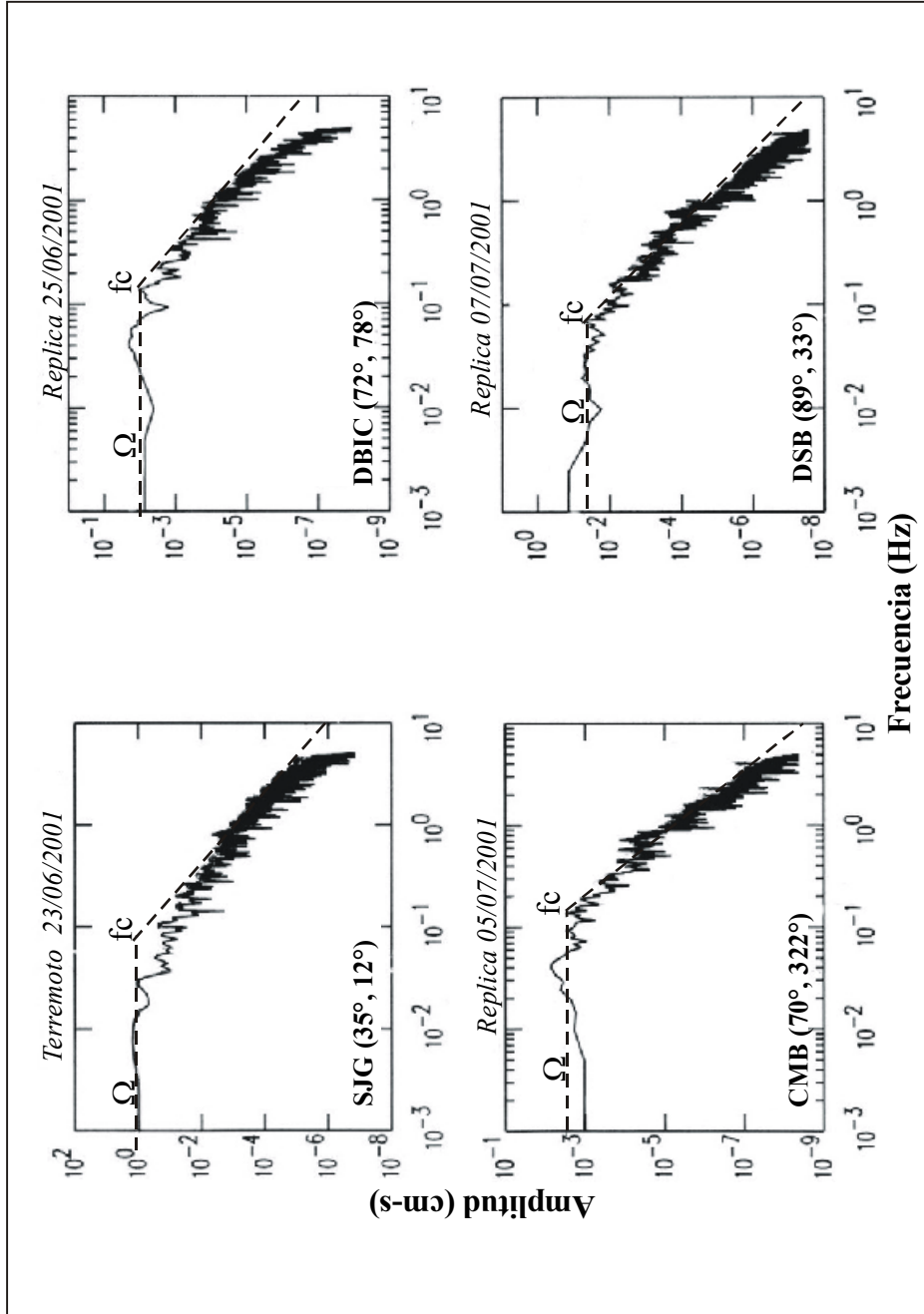


Figura 1.- Espectros de Amplitud, del terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 y de sus tres replicas de mayor magnitud. Ω =parte plana del espectro y f_c =la frecuencia esquina.

Estas diferencias son debidas a que en este estudio se ha considerado un modelo de fractura del tipo circular; por lo tanto, no considera la propagación de la misma puesta en evidencia a partir de la distribución de las réplicas. El desplazamiento medio estimado para el terremoto de Arequipa es de 130 cm, similar al observado a partir de mediciones GPS (Ruegg et al., 2001) y próximo a los calculados por Antayhua et al., (en este informe) y Tavera (en este informe) a partir de la distribución de las réplicas y modelado de ondas de volumen. Para las réplicas se obtiene radios medios de fractura entre 18 a 47 km y desplazamientos medios de 24 a 90 cm.

Bibliografía

- Aki, (1966). Bull. Earthquake Res. Inst. Univ., Tokyo, 44, 73-88.
- Brune, (1970). Jour. Geophys. Res., 75, 4997-5009.
- Hansk y Wyss, (1972). Bull. Seismol. Soc. Am., 67, 561-589.
- Ruegg, (2001). Seism. Res. Lett., 72, 673-678.
- Stavarakakis et al., (1989). Tectonophysics, 185, 261-275.
- Thatcher, (1972). Jour. Geophys. Res., 77, 1549-1566.

Nombre de archivo: sismo10
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Análisis espectral del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:50 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:50 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:22 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 6
Número de palabras: 1,203 (aprox.)
Número de caracteres:6,859 (aprox.)

Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas producidas por el Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

*Hernando Tavera y Henry Salas
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Resumen

En este trabajo se analiza los valores de aceleración máxima registrada por tres estaciones acelerográficas debido a la ocurrencia del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$): MOQ (Moquegua), JAB (Jabonillos, Huancavelica) y CAM (Camacho, Lima). En términos de aceleración neta, la registrada en MOQ es 30 veces mayor que la de JAB y a su vez, 61 veces mayor que la registrada en CAM. Las estaciones de JAB y CAM se ubican en dirección opuesta a la de MOQ y a distancias mayores en 95 y 232 km con relación a la ubicación del epicentro del terremoto. Las diferencias en los valores de aceleración sugieren que la mayor cantidad de energía liberada por el terremoto se ha propagado en dirección de la estación MOQ, siendo estas apreciaciones coherentes con la geometría de la superficie de ruptura y con las áreas que soportaron mayor daño en superficie.

Abstract

In this study, we analyze the maximum acceleration values recorded by three strong-motion stations as a consequence of the June 23, 2001 Arequipa earthquake: ($M_w=8.2$): MOQ (Moquegua), JAB (Jabonillos, Huancavelica) and CAM (Camacho, Lima). In terms of net acceleration, the one recorded by MOQ is 30 times larger than the one recorded by JAB and 61 times larger than that recorded by CAM. The JAB and CAM stations are located in a direction opposite that of the MOQ station and at distances greater than 95 and 232 km with respect to the location of the earthquake epicenter. The differences in the acceleration values suggest that the largest amount of energy released by the earthquake has propagated in the direction of the MOQ station, this concept being in agreement with the geometry of the rupture surface and the areas that sustained the worst damage on the ground.

Introducción

El terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$) ocurre a 82 km al NW de la localidad de Ocoña en el departamento de Arequipa. Este terremoto produce daños importantes en las viviendas y/o estructuras de ciudades y localidades de los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna. Según los informes de Defensa Civil, el daño mayor se presenta en la ciudad de Moquegua, la misma que se caracteriza por presentar viviendas muy antiguas y muchas de ellas de material precario. Asimismo, se debe indicar que la mayoría de ciudades y localidades que se distribuyen a lo largo de la costa de Perú, han sido construidas sobre terrenos sedimentarios, de ahí que estas presenten mayores daños debido a las altas aceleraciones que pueden generar los sismos de magnitud elevada.

En el este estudio se analiza las aceleraciones máximas registradas y espectros del terremoto de Arequipa en las estaciones acelerográficas instaladas en Moquegua (Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, CISMID), Jabonillos (Huancavelica) y Camacho (CAM), todas ubicadas a distancias desde el epicentro de 329 km, 424 km y 561 km respectivamente. El objetivo es cuantificar los niveles de aceleración máxima observada en las estaciones antes mencionadas a fin de explicar su posible relación con las características del proceso de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

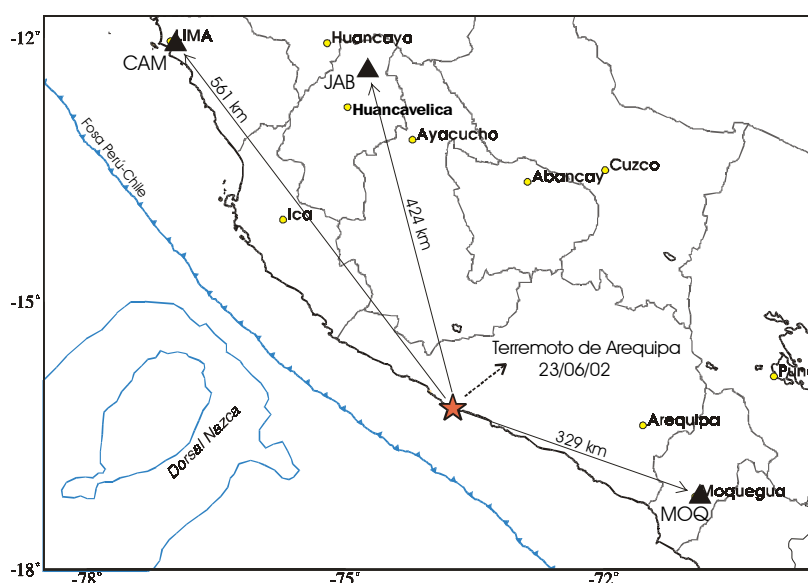


Figura 1. Ubicación de las estaciones acelerográficas y del epicentro del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

Datos

Los datos utilizados en el presente análisis corresponden a los extraídos de las estaciones acelerográficas de Camacho (CAM) y Jabonillos (JAB), ambas a cargo del Instituto Geofísico del Perú y MOG del CISMID. La primera estación corresponde a un acelerógrafo de tipo Kinometrics SSA-2 con sensibilidad de registro de 0.25g y ubicada a una distancia de 561 km en dirección NW con relación al epicentro del terremoto (CAM). Esta estación acelerográfica presenta registro en sus tres componentes (Z, NS, EW); sin embargo, debido a la distancia epicentro-estación el sistema de registro se activó con la llegada de la onda S. La segunda estación acelerográfica es del tipo Guralp-5T con una sensibilidad de 0.1g y ubicada a una distancia de 424 km en

dirección NNW con respecto al epicentro del terremoto de Arequipa (JAB). Esta estación ha registrado el total de la señal sísmica en sus tres componentes. La estación de MOQ se ubica a una distancia de 329 km en dirección SE y su registro fue proporcionado por el CISMID a través de internet. En la Figura 1 se presenta la ubicación de las estaciones acelerográficas indicadas anteriormente.

Aceleraciones Máximas

En la Figura 2 se muestra los registros de aceleración del terremoto de Arequipa en las estaciones de MOQ, JAB y CAM. En la estación MOQ (Figura 2a), la más cercana al epicentro del terremoto de Arequipa (329 km), las aceleraciones máximas en la componente vertical fueron de 106 cm/s^2 , en la componente NS de 220 cm/s^2 y en la componente EW de 295 cm/s^2 . La *aceleración neta*; es decir, la raíz cuadrada de la suma de las componentes horizontales al cuadrado dividido por dos, producida por el terremoto en la estación MOQ fue de 184 cm/s^2 . Este nivel de aceleración es proporcional al grado de intensidad máxima observado en la ciudad de Moquegua ($I_{\text{max}}=\text{VII-VIII MM}$).

La estación de JAB ubicada a 424 km en dirección NNW con respecto al epicentro del terremoto de Arequipa (Figura 2b), presenta aceleraciones máximas de 3.1 cm/s^2 en la componente vertical, 6.0 cm/s^2 en la componente N-S y de 11 cm/s^2 en la componente E-W. En este caso, la *aceleración neta* es del orden de 6.2 cm/s^2 , siendo este valor coherente con el nivel de intensidad máxima observada en el extremo norte del departamento de Huancavelica ($I_{\text{máx}}= \text{II-III en MM}$).

En la estación de CAM, ubicada a 561 km del epicentro en dirección NW (Figura 2c), las aceleraciones máximas fluctúan entre 3.4 a 4.6 cm/s^2 , siendo mayor la aceleración en la componente N-S. La *aceleración neta* es de 3.1 cm/s^2 proporcional al nivel de intensidad observado en la ciudad de Lima ($I_{\text{máx}}= \text{II en Mercalli Modificada}$).

En la Tabla 1 se presenta el resumen de los valores de aceleración máxima registrados en las estaciones de MOQ, JAB y CAM. Según esos valores, la aceleración máxima registrada en la estación de MOQ es 27 veces mayor que la de JAB y 74 veces mayor que la de CAM. Por otro lado, si se considera que las estaciones de MOQ y

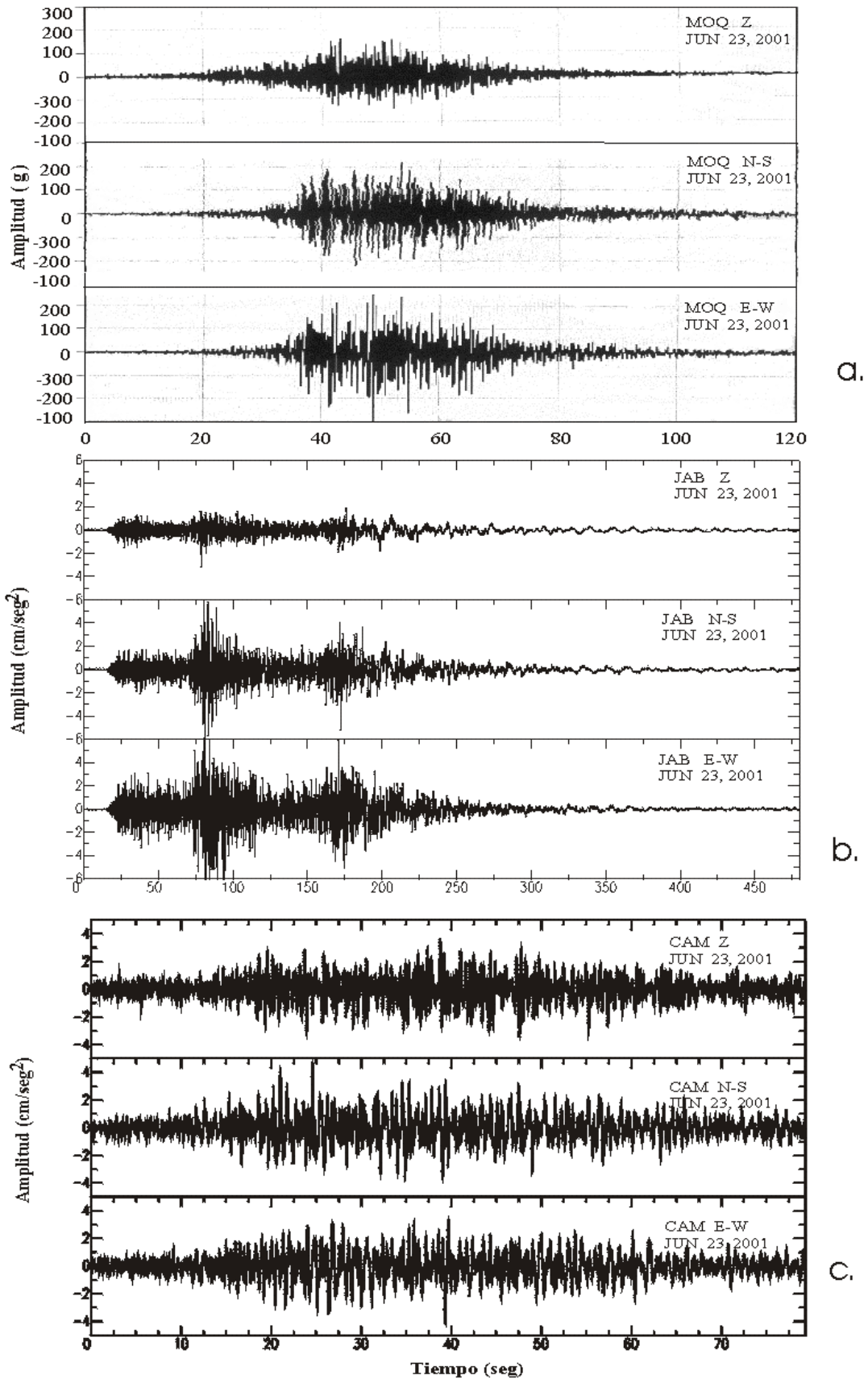


Figura 2. Registros de aceleración del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 en las estaciones de MOQ (CISMID), JAB y CAM (IGP). Los registros de la estación CAM corresponden a la fase S.

CAM, además de MOQ y JAB se ubican en ambos extremos del epicentro del terremoto de Arequipa con una diferencia en distancia epicentro-estación de 232 km y 95 km, los valores de aceleración deberían ser próximos entre sí. Sin embargo, si no se considera los efectos locales del suelo, la elevada aceleración observada en MOQ indicaría que la mayor cantidad de energía liberada por el terremoto de Arequipa se habría irradiado dirección SE, siendo esta característica coherente con la geometría del área de ruptura y con las intensidades máximas observadas en toda la región Sur de Perú.

Tabla 1

Aceleraciones máximas registradas durante el terremoto de Arequipa

Estación	Comp. Z (cm/s ²)	Comp. NS (cm/s ²)	Comp. EW (cm/s ²)	Acel. Neta (cm/s ²)	Distancia Epi-esta
MOQ	160.6	220.0	295.3	184.1	329 km
JAB	3.1	6.0	11.0	6.2	424 km
CAM	3.4	4.6	4.1	3.1	561 km

Frecuencias Predominantes

En la Figura 3a se observa que las amplitudes máximas en la estación JAB han sido registradas en la componente EW en una proporción de 3.5 mayor que en la componente vertical. En esta estación el rango de frecuencias varía entre 0.8 a 4 Hz, con picos máximos entre 1-2 Hz. En el caso de la estación CAM (Figura 3b), las amplitudes máximas en las tres componentes son similares; mientras que, el rango de frecuencias predominantes se encuentra entre 0.6 a 5 Hz con picos máximos a 1-2 Hz.

Discusión

Durante la ocurrencia del terremoto de Arequipa, la única estación acelerográfica cercana al epicentro y al área de mayor daño fue la de MOQ (CISMID), habiéndose registrado en ella aceleraciones máximas de 295.3 cm/s² en la componente EW y una aceleración neta de 184.1 cm/s². En estaciones ubicadas en dirección opuesta a MOQ, tal como JAB y CAM con diferencias en distancia-epicentro de 95 y 232 km, se observa que la aceleración neta en la estación de MOQ es 30 y 61 veces mayor. Estas diferencias en aceleración sugieren que la mayor cantidad de energía se habría irradiado en dirección de la estación MOQ coincidiendo con la distribución temporal de las réplicas y con las áreas de mayor daño.

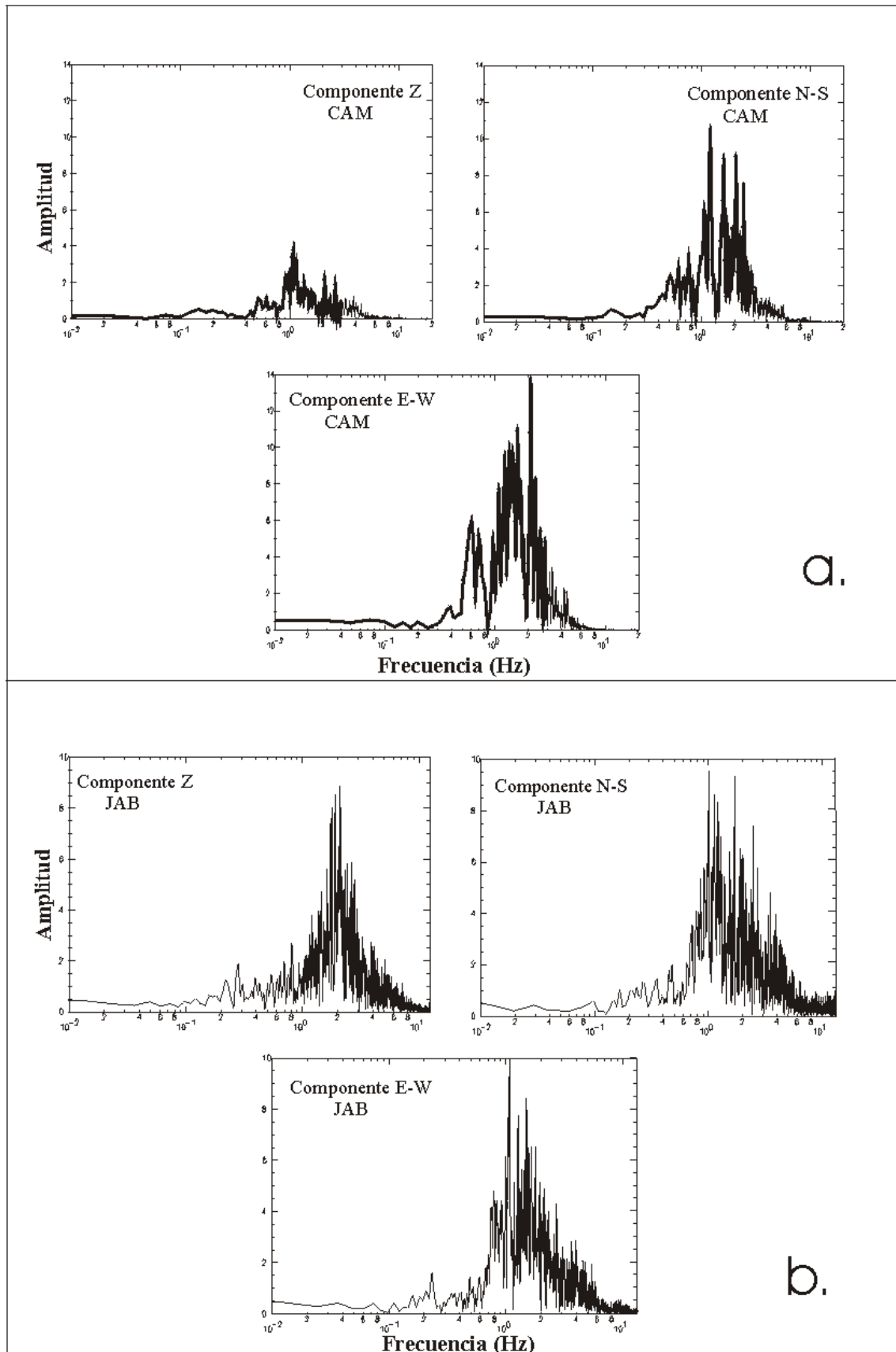


Figura 3. Frecuencias predominantes en las estaciones de JAB y CAM debidas al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

Nombre de archivo: sismo11
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:53 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:53 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:20 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 6
Número de palabras: 1,216 (aprox.)
Número de caracteres:6,936 (aprox.)

Evaluación de la Respuesta del Suelo en Camaná, Atico y Chala a partir de las Réplicas del Terremoto del 23 de Junio de 2001

*Luis Vilcapoma, Henry Salas y Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Resumen

En este trabajo se presenta los resultados obtenidos del análisis realizado sobre el contenido de frecuencias observadas en las estaciones acelerográficas instaladas en Chala, Atico y Camaná (Departamento de Arequipa), a partir del registro de 13 réplicas del terremoto del 23 de Junio de 2001. Los resultados sugieren que para las componentes horizontales, el suelo de Atico es mas consolidado que el de Camaná; mientras que, para la componente vertical el de Camaná es más estable. Asimismo, el suelo en la estación de Chala muestra mayor rigidez que el de Atico. La mayor aceleración registrada corresponde a una réplica de magnitud $ML=4.9$, siendo esta de 232 gals en la estación de Camaná.

Abstract

In this paper we present the results of the analysis of the frequency content observed in the strong-motion stations installed in Chala, Atico and Camana city (Arequipa), based on the records corresponding to 13 aftershocks of the June 23, 2001 earthquake. The results suggest that for the horizontal components, the ground in Atico is more stable than that in Camana, while, for the vertical components, the ground in Camana is more stable. Also, the ground in Chala station shows more consolidated than that in Atico. The largest recorded acceleration corresponds to an aftershock of ML magnitude 4.9, is of 232 gals in Camana station.

Introducción

El 23 de Junio del 2001 a las 20:33 (GMT), ocurrió un fuerte terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter y epicentro localizado en las coordenadas 16.20° S y 73.75° W; es decir, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Tavera et al., 2001). Este terremoto se sintió fuertemente en la región Sur del país y causó daños graves en los departamentos de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna produciendo la muerte de 77 personas y 2713 heridos según informe de Defensa Civil. En general, el tipo de daño causado por este terremoto en las distintas localidades y ciudades se debió básicamente al tipo de suelo y a la calidad de las construcciones predominantes en toda la región Sur de Perú.

Posterior al terremoto del 23 de Junio, se realizó la instalación de siete acelerógrafos en la región Sur de Perú a fin de monitorear las réplicas de este terremoto. Las señales correspondientes a ocho y cinco replicas registradas en las estaciones de Camaná, Atico y Chala son utilizados para analizar y evaluar el contenido frecuencial característico del tipo de suelo de cada estación. Estos parámetros son de importancia para los estudios de ingeniería orientados a la construcción de viviendas y otras obras de

gran envergadura. En la Tabla 1 se presenta las características de las estaciones y en la Figura 1 su ubicación geográfica. Las réplicas utilizadas tienen sus epicentros en el Océano Pacífico frente a la ubicación de las estaciones de Camaná, Chala y Atico; por lo tanto, el análisis del contenido frecuencial que se realiza en este estudio es válido al considerarse el registro de sismos netamente locales, ya que de esta manera se evitaría la influencia del medio, tal como sugiere Seed et al., (1969).

Tabla 1

Parámetros y características de los acelerógrafos utilizados en este estudio

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud msnm	Tipo de Sensor	Sensibilidad	Tipo de Suelo
Atico	16.22°	73.61°	64	Altus	0.25 g	Grava
Camaná	16.62°	72.71°	66	Altus	0.25 g	Aluvial
Chala	15.86°	74.24°	52	Altus	0.25 g	Roca

Ubicación de las Estaciones Acelerográficas

Las estaciones acelerográficas instaladas en las localidades de Chala, Atico y Camaná son digitales de tres componentes (N-S, E-W, Z) y sensor del tipo Altus con una sensibilidad de registro de 0.25 g (Tabla 1). Para la instalación de estos acelerógrafos se tuvo en cuenta principalmente el tipo de suelo y la seguridad de los equipos. Los puntos seleccionados fueron:

Estación de Chala. Esta estación se instaló sobre una losa de concreto en el interior del Hotel “Evertyh” ubicado a 1 km al norte de la Municipalidad de Chala. El hotel se encuentra construido sobre suelo rocoso a orillas del mar. En general, el suelo de la localidad de Chala pertenece al Jurásico Inferior (Mesozoico) y muestra afloramientos que descansan de manera discordantemente sobre rocas del grupo Tarma, además de estar constituido por arenisca, conglomerados y brechas andesíticas. La base de estas estructuras no es visible debido a que se pierde en el mar e infrayacen concordantemente a los volcánicos del miembro Lucmilla (Olchanski 1980).

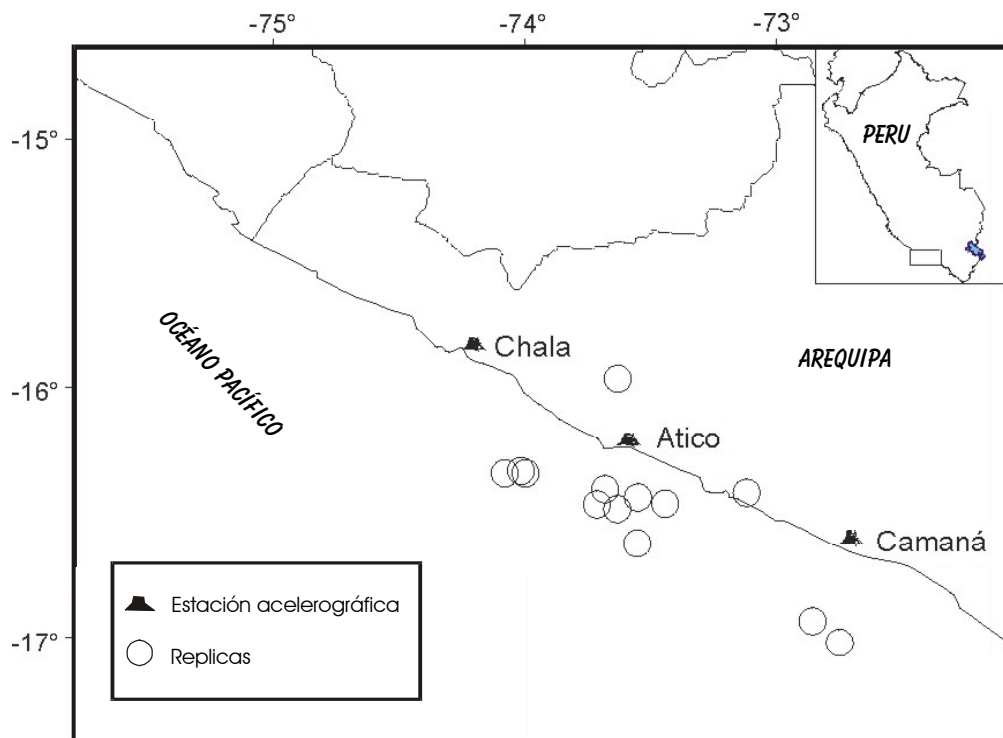


Figura 1. Ubicación de las estaciones acelerográficas y distribución de las réplicas del terremoto del 23 de Junio de 2001 utilizadas en este estudio según Antayhua et al. (En este informe).

Estación de Atico.- La estación fue instalada en una losa en el interior de la Municipalidad de Atico, la misma que se encuentra construida sobre un material compuesto por grava. La ciudad de Atico se encuentra ubicada sobre material formado por terrazas aluviales, depósitos eólicos y de talud de la era Cuaternaria reciente (Bellido et al., 1960). En general, estos depósitos no tienen mucho espesor y descansan directamente sobre rocas gnéisicas.

Estación de Camaná.- Esta estación fue instalada en el interior de la Municipalidad de Camaná y encima de una losa construida sobre depósitos aluviales. El suelo de la localidad de Camaná pertenece al Cuaternario reciente y esta compuesto por depósitos fluviales formados por conglomerados y gravas de textura y composición variable mezclado con arenas y arcillas (Pecho et al., 1969). En general, se observa la presencia de depósitos aluviales muy extensos que forman planicies a manera de terrazas en algunos valles o abanicos deyectivos compuesto por arcillas, arenas, cenizas, conglomerado y gravas en matriz arenosa.

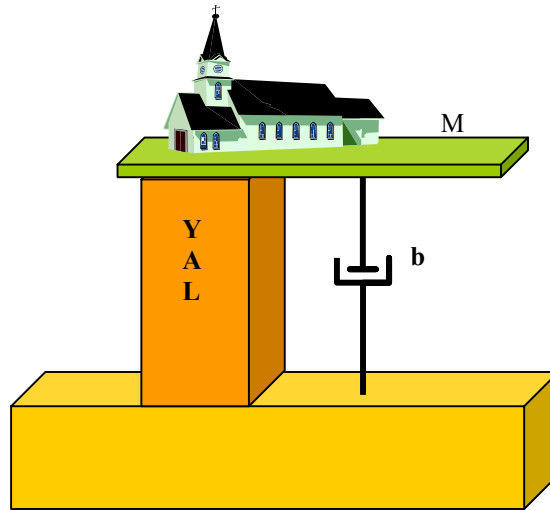


Figura 2. Sistema unidimensional de oscilación amortiguada de una masa M ligada a una barra con módulo de Young Y , área A , longitud L , y amortiguamiento b .

Análisis Dinámico del Suelo

A fin de explicar el comportamiento del suelo ante un elemento perturbador como la ocurrencia de un terremoto es necesario considerar, de acuerdo a la Figura 2, la ecuación diferencial para un oscilador armónico compuesto por una barra cuyo material (M) es definido por su módulo de Young (Y), con una área transversal (A) de longitud arbitraria (L) y con una determinada constante de amortiguamiento (b). La masa (M) que oscila debido a una perturbación instantánea puede ser definida por la siguiente ecuación diferencial,

$$M \ddot{x} + b \dot{x} + \frac{YA}{L} x = 0$$

donde:

$$2\gamma = \frac{b}{M}, \quad w_o = \sqrt{\frac{YA}{ML}}, \quad \text{con } w^2 = w_o^2 - \gamma^2 \quad \text{y} \quad w = \frac{2\pi}{T}$$

De estas relaciones se deduce que,

$$T = \frac{8\pi M^2 L}{4MYA - b^2 L}$$

Esta relación muestra que el periodo de oscilación (T) de la masa (M) depende únicamente del módulo de Young (Y); es decir, de la elasticidad del terreno que es afectado por una perturbación, en este caso, por un terremoto.

Espectros de Respuesta

Tal como se describió anteriormente, el periodo de oscilación de una determinada masa, en este caso una ciudad o localidad, va a depender de las propiedades físicas del suelo o material en la que descansan; por lo tanto, al disponerse de los registros de vibración del suelo de un determinado punto, es posible conocer la frecuencia máxima a la que ha sido sometido el terreno y calcular su periodo (T) de vibración. Este valor puede ser utilizado para compararse con los periodos de oscilación de otras ciudades afectadas por el mismo sismo.

La transformada de Fourier es aplicada a un total de 8 registros de aceleración correspondientes a las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 obtenidos de los acelerógrafos instalados en las localidades de Camaná, Chala y Atico (Tabla 1). Una vez obtenido el espectro amplitud-frecuencia, se procede a analizar el contenido frecuencial de la señal a fin de identificar el valor de la frecuencia equivalente a la máxima amplitud de la señal en aceleración. Los resultados son presentados en términos de periodos (T) de oscilación en la Tabla 2 para el binomio Camaná-Atico y en la Tabla 3 para Chala-Atico. Asimismo, algunos ejemplos de los espectros obtenidos se muestran en las Figuras 3 y 4.

Estaciones de Camaná y Atico

Para realizar la correlación de los periodos predominantes entre las estaciones de Camaná y Atico se utilizaron 8 réplicas del terremoto del 23 de Junio con magnitudes que oscilan entre 3.1 a 4.9 M_L , todas con epicentros en el océano y ubicadas entre estas

dos localidades. La réplica de mayor magnitud (4.9 M_L), provocó una aceleración máxima de 84 gals en la estación de Camaná; mientras que, en la estación de Atico fue de 232 gals. Esta diferencia es debido a que el epicentro de la réplica estuvo mucho más cerca de la estación de Atico.

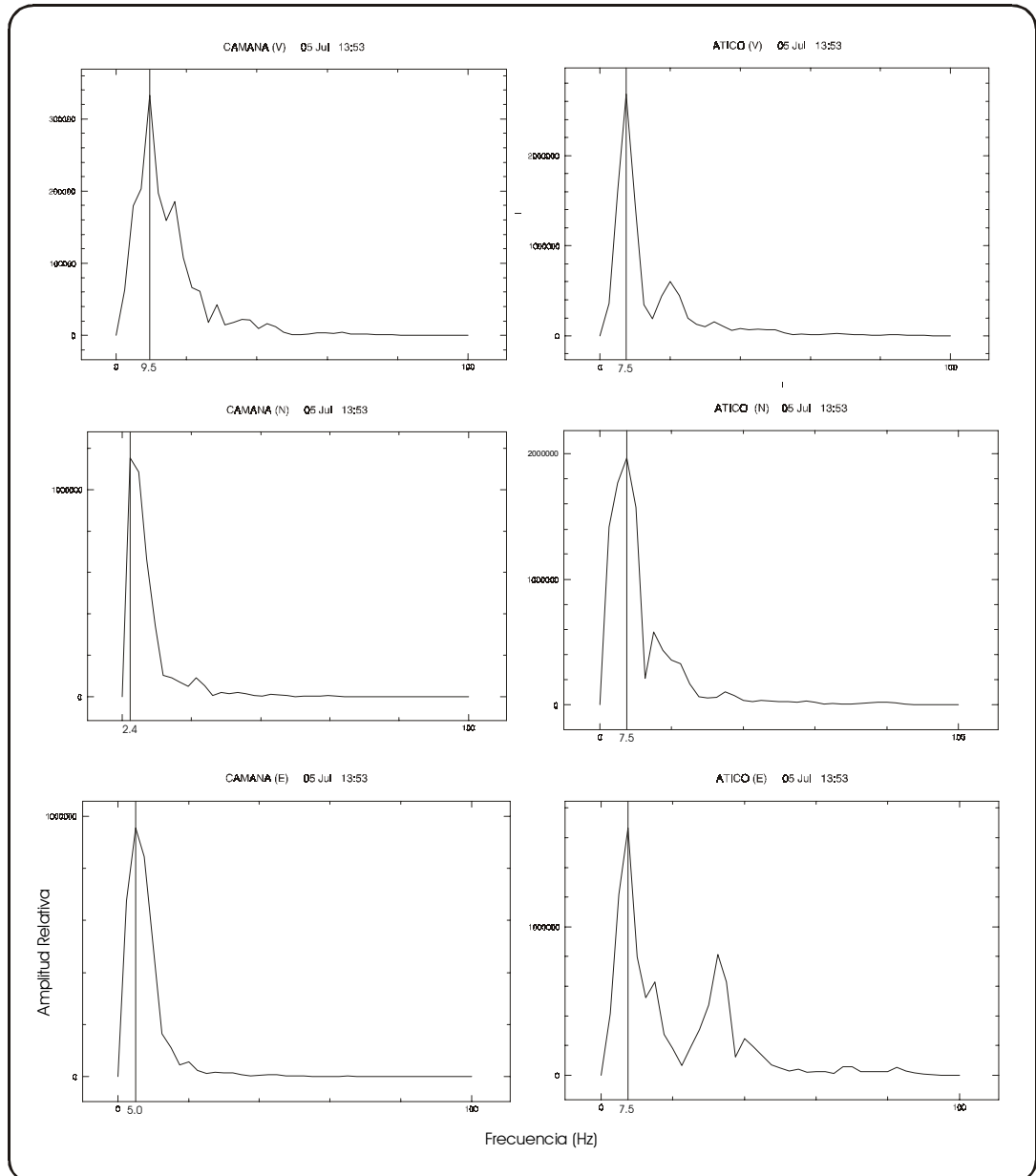


Figura 3. Espectros de amplitud-frecuencia para las estaciones Camaná y Chala.

En la Figura 3 se presenta el espectro correspondiente a la réplica de mayor magnitud ($M_L=4.9$) y en ella se observa que la frecuencia correspondiente al pico máximo de amplitud, medida en las componentes horizontales (N-S, E-W) de la estación de Atico, es mayor a las obtenidas para la estación de Camaná; sin embargo, para la componente vertical la frecuencia en la estación de Camaná supera a la registrada en la estación de Atico. Este mismo patrón se repite en los registros correspondientes al resto de las réplicas analizadas. Estos valores sugieren que en las componentes horizontales (N-S, E-W), los periodos de oscilación que soportó el suelo de la estación de Atico fueron menores al de Camaná; mientras que, en la componente vertical (Z), los periodos de oscilación en Atico superan a los de Camaná, tal como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2

Periodos (T) predominantes en las tres componentes de registro de las estaciones acelográficas de Camaná y Atico correspondientes a ocho réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

Fecha y Hora	CAMANA			ATICO		
	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)
03 Jul 23:34	0.213	0.060	0.213	0.080	0.100	0.133
04 Jul 19:21	0.105	0.060	0.141	0.100	0.133	0.133
05 Jul 08:19	0.213	0.084	0.141	0.105	0.105	0.105
05 Jul 12:02	0.400	0.100	0.400	0.100	0.105	0.084
05 Jul 13:53	0.417	0.105	0.200	0.133	0.133	0.133
05 Jul 16:44	0.139	0.105	0.105	0.100	0.208	0.100
05 Jul 18:08	0.141	0.084	0.141	0.105	0.133	0.105
06 Jul 09:21	0.141	0.081	0.208	0.105	0.141	0.105

Estación de Chala y Atico

Para evaluar la respuesta del suelo en las estaciones de Chala y Atico se ha utilizado 5 réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio con magnitudes que oscilan entre 2.8 a 4.0 M_L , todas distribuidas entre las dos estaciones y frente a la línea

de costa. El valor de aceleración máxima registrada en la estación de Chala fue de 4.5 gals; mientras que, en la estación de Atico fue de 7.3 gals.

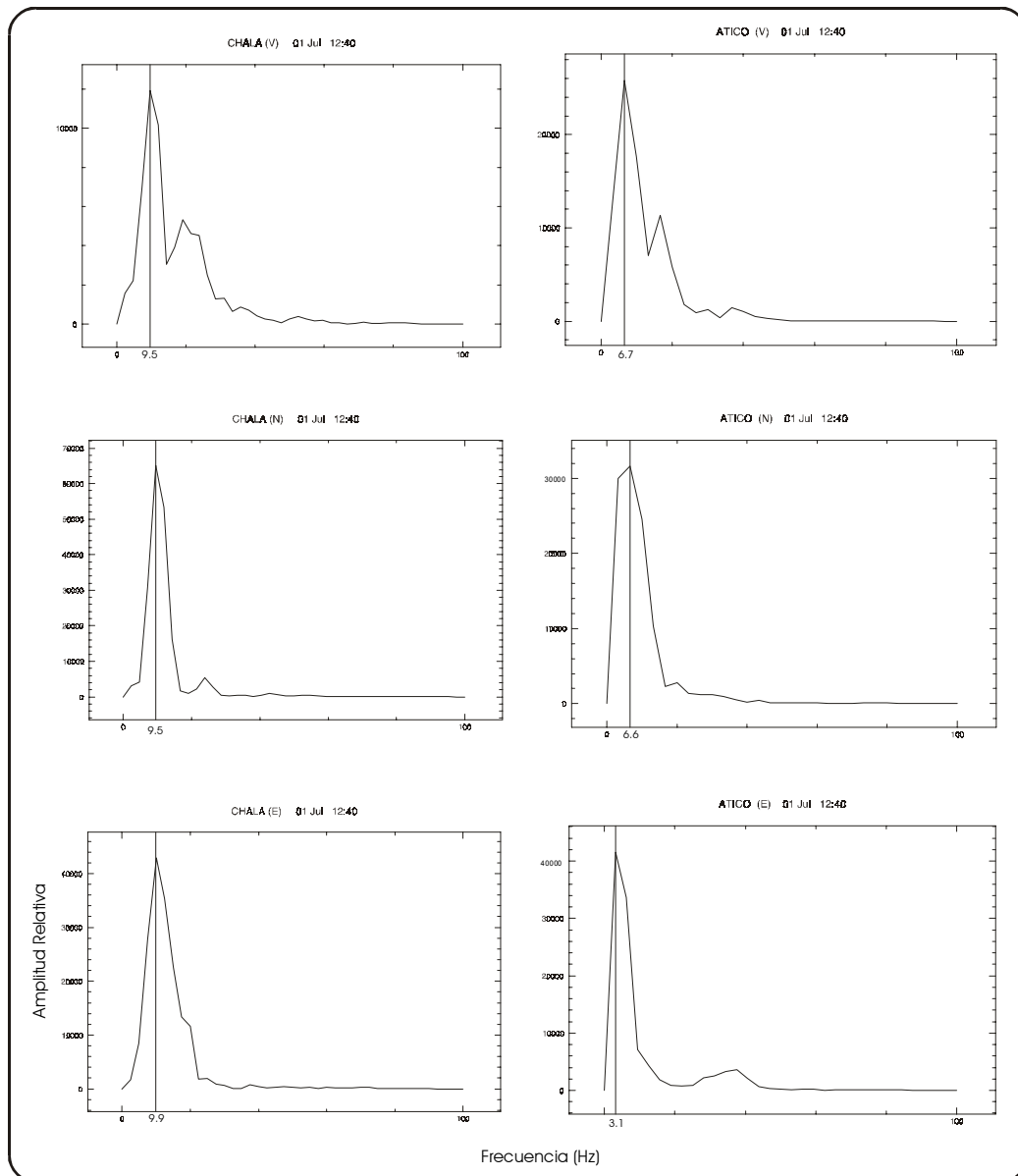


Figura 4. Espectros de amplitud-frecuencia para las estaciones Chala y Atico..

En la Figura 4 se puede observar que los valores de las frecuencias correspondientes a la máxima amplitud del registro de aceleración en la estación de Chala son preferentemente mayores a las registradas en la estación de Atico (componentes V, N-S, E-W). Los resultados obtenidos para las 5 réplicas muestran que los periodos de oscilación del suelo en la estación de Atico fueron mayores que los registrados en la estación de Chala (Tabla 3).

Tabla 3

Periodos (T) predominantes en las tres componentes de registro de las estaciones acelerográficas de Chala y Atico correspondientes a cinco réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

Fecha y Hora	CHALA			ATICO		
	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)
28 Jun 08:24	0.077	0.070	0.070	0.080	0.080	0.081
29 Jun 00:07	0.100	0.080	0.101	0.133	0.133	0.133
29 Jun 18:26	0.133	0.133	0.133	0.084	0.208	0.141
01 Jul 12:40	0.105	0.105	0.101	0.151	0.149	0.322
01 Jul 15:28	0.080	0.067	0.080	0.200	0.182	0.200

Resultados

La topografía del terreno y su constitución física influye significativamente en la intensidad del movimiento sísmico observado en superficie, pudiendo producir un efecto amplificador o atenuador de la energía irradiada por el sismo. En todo caso, son las constantes elásticas del medio las que controlan el comportamiento del suelo ante un elemento perturbador pudiendo observarse casos de anisotropía cuando la respuesta del terreno no es homogénea en sus tres direcciones como se observa en la estación de Camaná.

La frecuencia característica correspondiente a la máxima amplitud del registro de aceleración en las estaciones de Camaná y Atico indican que el suelo en la estación de Atico es relativamente más consolidado que el de Camaná, siendo esta apreciación

coherente con su composición litológica. Los valores para los periodos de oscilación en la estación de Camaná son mayores en su componente N-S (entre 0.105 a 0.417 segundos); mientras que en la estación de Atico, estos son mayores en la componente Vertical (entre 0.100 a 0.208 segundos).

Del mismo modo, los resultados obtenidos para las estaciones de Chala y Atico permiten suponer que la rigidez del suelo en la estación de Atico es relativamente menor en comparación con el de Chala. Los periodos en las tres componentes de la estación de Chala son similares y fluctúan entre 0.070 a 0.133 segundos; mientras que, en la estación de Atico el periodo varía entre 0.081 a 0.322 segundos.

Si el suelo de las estaciones representase el comportamiento dinámico de la ciudad, entonces los periodos predominantes identificados en este estudio (menor a 0.5 segundos) sugieren que las viviendas de 1 a 4 pisos recibieron la mayor cantidad de energía durante la ocurrencia de las réplicas del terremoto del 23 de Junio. Se ha encontrado concordancia entre los valores de periodo máximo identificado en cada estación con las características físicas de su suelo. Además, existe una relación de estos periodos predominantes en cada estación y los niveles de intensidad y daños producidos por el terremoto del 23 de Junio del 2001 en las localidades de Chala, Atico y Camaná.

Bibliografía

- Bellido et al., (1960). Geología del cuadrángulo de Atico (hoja 33-o), Carta Geológica Nacional del Perú.
- Olchanski, (1980). Geología del cuadrángulo de Chala (hoja 32-ñ), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú.
- Pecho et al., (1969). Geología de los Cuadrángulos de Camaná y la Yesera, Bol. N° 21, Servicio de Geología y Minería del Perú.
- Seed et al., (1969) Characteristics of rock motions during earthquakes, Journal Soil Mechanics and Foundations Division, Asce Vol. 95, No. SM5, September 1969.

Nombre de archivo: sismo12
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CALCULO DE LA ECUACION DE ATENUACION APARTIR DE LAS REPLICAS DEL TERREMOTO DEL 23 DE JUNIO DEL
2001
Asunto:
Autor: CNDG
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 12:58 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 12:58 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:24 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 2,105 (aprox.)
Número de caracteres:12,003 (aprox.)

Características Generales del Tsunami Asociado al Terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 (Mw=8.2)

*Julia Carpio, Yolanda Zamudio y Henry Salas
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Resumen

En el presente estudio se evalúa y analiza las características generales del tsunami originado por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (Mw=8.2). Este tsunami de carácter local afectó principalmente a la localidad de Camaná con olas que alcanzaron alturas del orden de 7 metros llegando a producir la muerte de 23 personas y cuantiosas pérdidas materiales. La interpretación de la información recolectada ha permitido elaborar mapas de replegamiento medio del nivel del mar, de inundación horizontal y vertical a la línea de costa. Asimismo, el registro del mareógrafo de Matarani (localidad de Mollendo, departamento de Arequipa) muestra que el terremoto de Arequipa fue precedido por desplazamientos asísmicos que se produjeron entre 5 a 10 minutos antes del terremoto.

Abstract

The present study evaluates and analyses the general characteristics of the tsunami originated by the June 23, 2001 Arequipa earthquake (Mw=8.2). This tsunami, of local character, mainly affected the province of Camana with waves that reached heights in the order of 7 meters, causing the death of 23 people and great material loss. The interpretation of the recorded information has enabled the making of maps of sea-level Withdrawal ("replegamiento"), and of horizontal and vertical flooding with respect to the coastline. Also, the records from the Matarani tide meter ("mareógrafo") (Mollendo city in Arequipa) shows that the Arequipa earthquake was preceded by aseismic displacements produced 5 to 10 minutes before the earthquake.

Introducción

El Perú es uno de los países de mayor sismicidad en el mundo debido al proceso de convergencia, presente en su borde Oeste, de las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso conocido como subducción, el mismo que da origen a los terremotos de mayor magnitud que se haya producido en Perú (Tavera y Buforn, 2001). De acuerdo a la historia sísmica, se tiene referencia de la ocurrencia de más de 50 terremotos con magnitudes mayores a 7 que han generado tsunamis a lo largo de su costa, produciendo en su mayoría efectos netamente locales. De estos tsunamis, uno de los más grandes fue generado por el terremoto ocurrido en la región Sur de Perú el 13 de Agosto de 1868 (Mw=9.0), el mismo que produjo daños en un radio de 500 km que incluye a los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, además de las ciudades de Arica e Iquique en Chile.

Recientemente y después de 133 años (desde 1868), la región Sur de Perú es nuevamente afectada por un terremoto de magnitud elevada ($M_w=8.2$) que produjo muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y toda la región Norte de Chile (Silgado, 1978). Este terremoto produjo intensidades regionales máximas de VII-VIII en la Escala Mercalli Modificada. Luego de aproximadamente 15 minutos de ocurrido el terremoto de Arequipa, un tsunami de carácter local produce daños y muerte en la localidad de Camaná (Arequipa) con olas que alcanzaron alturas entre 4 y 7 metros en promedio.

Después de ocurrido el terremoto del 23 de Junio, el Instituto Geofísico del Perú envía un grupo de ingenieros y técnicos a la zona afectada por el terremoto a fin de realizar la evaluación de los daños y efectos causados por el tsunami en la localidad de Camaná. En este estudio, se presenta los resultados obtenidos del análisis de la información recolectada en campo y que muestra las características generales del tsunami, además de los niveles de replegamiento del mar, de inundación y la altura máxima alcanzada por las olas del tsunami.

Reseña Histórica

Una de las causas principales para la generación de tsunamis en todo el borde de la placa del Pacífico, es la sismicidad producida por la convergencia de ésta y las diferentes placas continentales que la circunda; por lo tanto, los países que se distribuyen alrededor del Océano Pacífico han sufrido en algún momento de su historia los efectos de un tsunami catastrófico de carácter local o transoceánico. De los 1,414 tsunamis generados por el proceso de convergencia de placas (desde el año 47 AC), 211 han tenido su origen en el borde Oeste de América Latina y de estos, 32 han sido producido por terremotos ocurridos en el extremo Oeste de Perú (Figura 1, Tabla 1). El tsunami más catastrófico del cual se tiene información fue generado por el terremoto ocurrido el 13 de Agosto de 1868 ($M_w=9.0$) en la región Sur de Perú y que ocasionó grandes daños desde la ciudad de Trujillo (región Norte de Perú) hasta la ciudad de Concepción al sur de Chile. Este tsunami viajó a través del océano afectando las playas de Japón, Nueva Zelanda, Australia, Hawaii y otras. Según la Siberian Division Russian Academy of Sciences, el tsunami más antiguo que afectó las playas del departamento de

Arequipa fue producido por el terremoto ocurrido el 22 de Enero de 1582, el mismo que habría tenido su epicentro en continente.

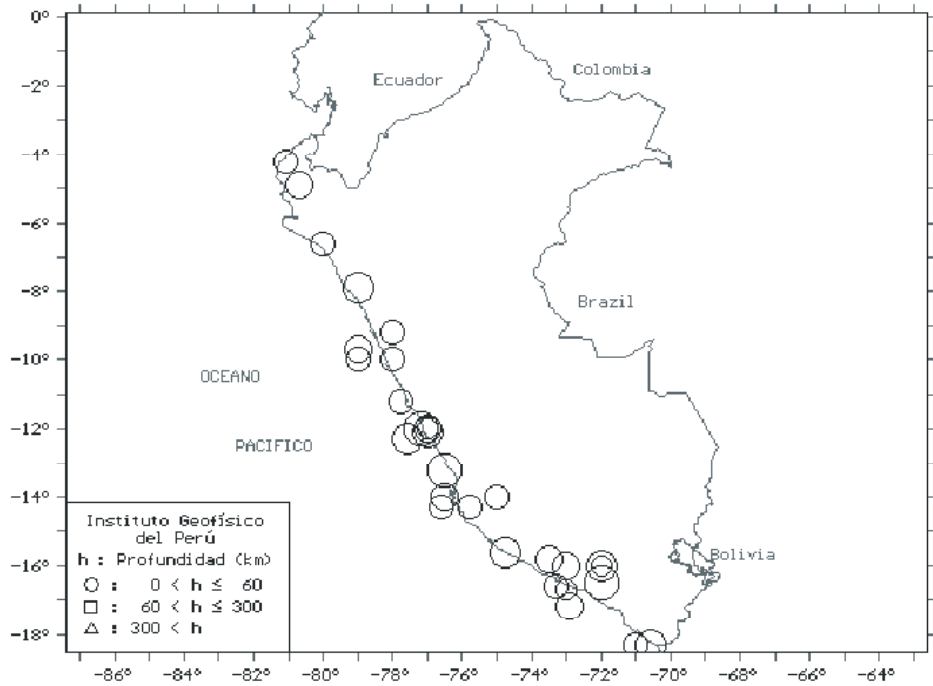


Figura 1. Distribución de los terremotos de magnitud elevada que dieron origen a importantes tsunamis en el borde oeste de Perú desde el año 1580.

Tabla 1

Parámetros de los principales terremotos que produjeron tsunami en la región sur de Perú.

Fecha (a/m/d)	Hora origen (h:m:s)	Latitud (°)	Longitud (°)	Prof. (km)	Ms	Int. (MSK)
1582/01/22	16:30:00	-16.0	-72.0	40	8.6	10
1590/ -/-	-	-17.2	-72,9	40	7.7	7
1725/03/27	00:00:00	-16.7	-73.0	50	-	7
1784/05/13	12:36:00	-16.5	-72.0	27	8.0	10
1868/08/13	21:45:00	-18.3	-70.6	25	8.8	10
1906/05/05	00:36:00	-18.3	-71.0	33	-	7
1913/07/28	6:39:00	-16.6	-73.3	30	7.0	9
1934/12/04	17:24:40	-19.5	-69.5	11	6.9	6
1942/08/24	22:50:28	-15.6	-74.7	33	8.6	10
1960/01/13	15:40:34	-16.2	-72.1	60	7.5	10

Tsunami del 23 de Junio del 2001

El último tsunami producido en Perú, es el generado por el terremoto ocurrido el día sábado 23 de Junio de 2001 (Mw=8.2) a horas 15 con 33 minutos (hora local). El epicentro del terremoto fue localizado sobre la línea de costa y a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (departamento de Arequipa), siendo la profundidad del foco de 28-30 km; es decir, netamente superficial.

Este tsunami se inició 15 minutos después de ocurrido el terremoto del 23 de Junio con el replegamiento del mar, el mismo que se produjo mayormente entre las playas de las localidades de Chala e Ilo con distancias que oscilaron entre 100 a 200 metros (Figura 2). En las playas de las localidades de Chala y Atico fue calmado y su retorno suave sin ocasionar daños; mientras que, entre Atico y Ocoña, la mar se replegó hasta 200 metros y a su retorno inundó las playas entre 30 a 50 metros por la desembocadura del río Ocoña. En la localidad de Camaná, el repliegue de la mar alcanza distancias de 200 metros y a su retorno ocasionó severos daños en las playas. Finalmente, en las localidades de Quilca, Matarani, Mollendo e Ilo, la mar se retiró entre 100 a 150 metros y a su retorno no ocasionó daños. Asimismo, en la Figura 2 se observa que las máximas distancias de repliegue se ha producido en las localidades de Atico, Ocoña y Camaná; es decir, en las proximidades del epicentro del terremoto del 23 de Junio.

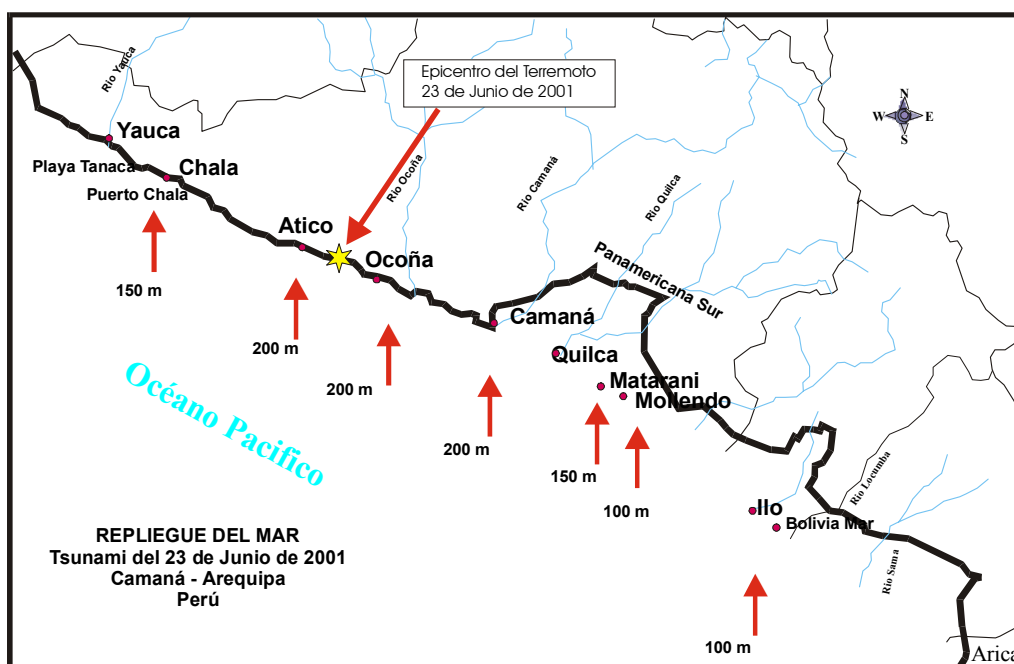


Figura 2. Niveles medios de replegamiento del mar debido al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

En la Figura 3 se muestra el área de la localidad de Camaná en donde el tsunami del 23 de Junio produjo mayor desastre. Las olas producidas por el tsunami alcanzaron alturas del orden de 4 a 7 metros entre las playas de La Chira y Las Cuevas en los extremos NW y SE de la localidad de Camaná respectivamente. Las olas alcanzaron alturas máximas de 7 metros en El Chiflón y la playa El Chorro en las proximidades de la desembocadura del río Camaná y de la laguna Tilimaco.

La información obtenida sobre los niveles de inundación indica que estos fueron máximos en las playas La Punta y Las Cuevas ubicadas en el extremo SE de la localidad de Camaná sobre una extensión de 23 km paralela a la línea de costa, tal como se muestra en la Figura 4. Asimismo, la inundación perpendicular a la línea de costa, osciló entre 50 y 1300 metros, siendo la máxima en el lugar denominado El Chiflón cerca al río Camaná y por cuyo valle la ola del tsunami avanzó libremente llegando a inundar y cubrir con arena más de 2000 hectáreas de terrenos agrícolas cuyos cultivos estaban próximos a su cosecha. Mientras que, en las playas más pobladas como El Chorro, La Punta y Las Cuevas ocasionó la destrucción total de 3500 edificaciones de material noble y daños moderados en otras 1000 aproximadamente, las mismas que en mayor número eran utilizadas en los periodos de verano. A consecuencia del tsunami, en la localidad de Camaná fallecieron 23 personas y otras 64 fueron reportadas como desaparecidas. Las pérdidas económicas en esta localidad han sido cuantiosas ya que toda su población subsiste de la agricultura y el comercio.

Registro del Mareógrafo de Matarani

La estación Mareográfica del puerto de Matarani esta ubicada en el muelle de la Empresa Nacional de Puertos, siendo este el más próximo al epicentro del terremoto y del cual se cuenta con un registro confiable de lo ocurrido con el nivel medio del mar antes y después del terremoto del 23 de Junio. En la Figura 5, se observa que aproximadamente 9 minutos antes de producirse el terremoto del 23 de Junio (15h 33m); es decir, a las 15h con 24 minutos la marea sufrió un desnivel de aproximadamente 2.5-2.8 metros para luego aumentar su amplitud como indicación de que se había producido el terremoto y de la llegada de la primera ola del tsunami que afectó a la localidad de Camaná. Durante el desarrollo del tsunami y según la

información obtenida, en el puerto de Mataraní, el nivel medio del mar osciló entre 2.5 y 3.2 metros.

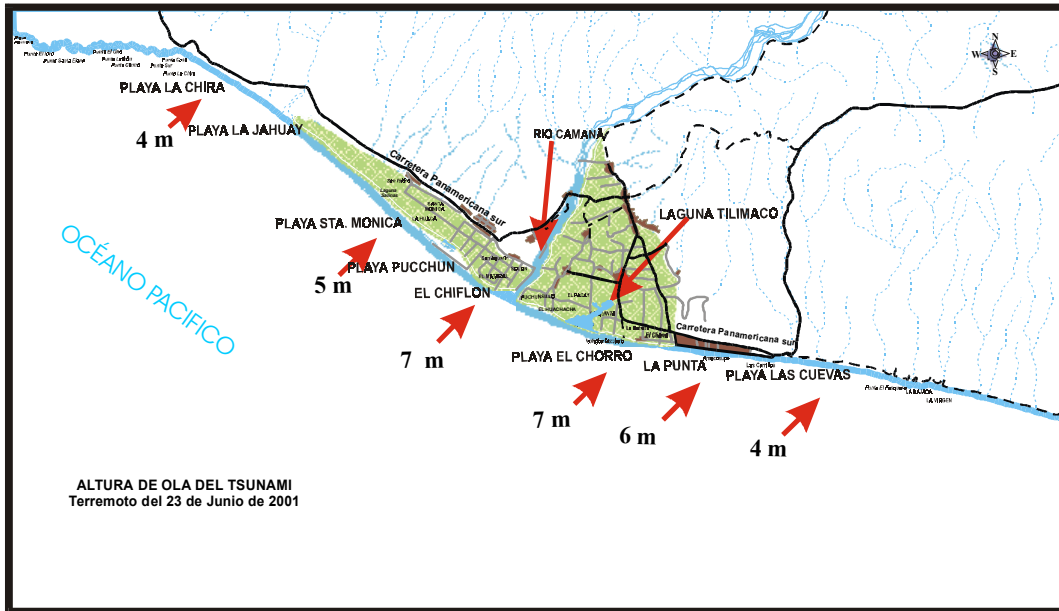


Figura 3. Distribución de los valores de altura máxima de la ola producida por el tsunami generado por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 en la localidad de Camaná.

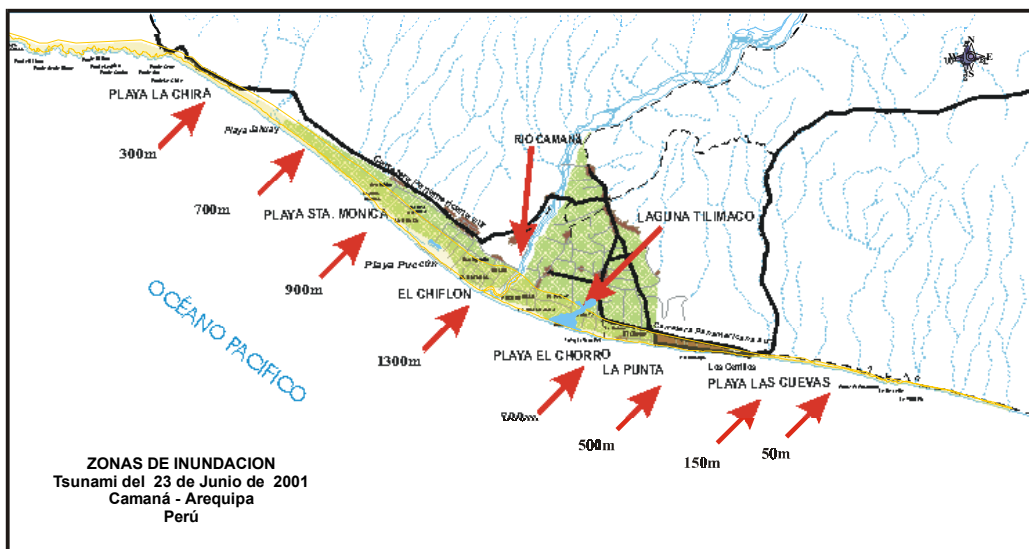


Figura 4. Niveles medios de inundación producidos en las localidades de Camaná debido al tsunami producido por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

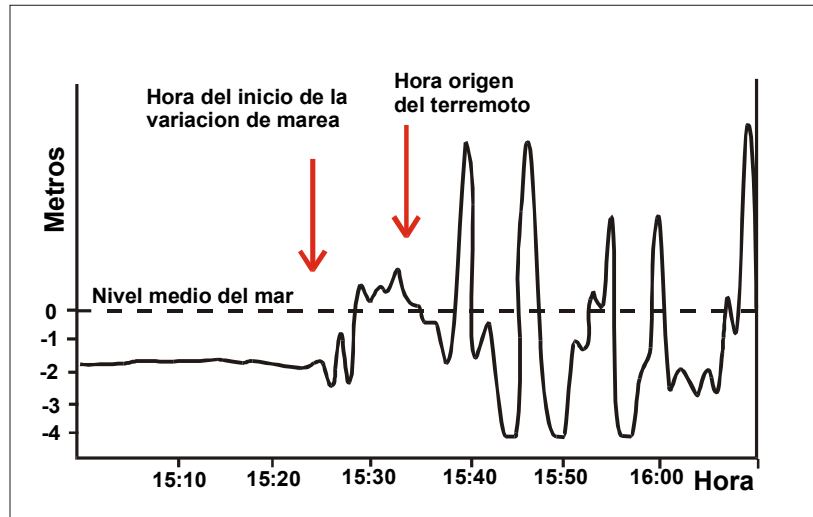


Figura 5. Registro del mareograma que muestra la variación del nivel medio del mar debido al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Mareografo del puerto de Matarani en Arequipa.

Discusión y Conclusiones

De acuerdo al total de la información analizada y evaluada, el tsunami producido por el terremoto del 23 de Junio fue de carácter netamente local, debido principalmente a que los mayores efectos del mismo se concentraron de manera puntual en las playas de la localidad de Camaná. En esta localidad se observó que el nivel máximo de replegamiento del mar fue de 200 metros, la inundación perpendicular a la línea de costa de 1300 metros y paralela a línea de costa de 23 km. La altura máxima de la ola del tsunami fue de 7 metros.

Por otro lado, la información obtenida indica que los volúmenes de agua afectados por el terremoto en las localidades de Chala, Atico y Ocoña formaron corrientes de agua que discurrieron en dirección SE; mientras que, en las localidades de Mollendo y Matarani lo hacían en dirección NW. Estas apreciaciones permiten sugerir que el tsunami que afectó a la localidad de Camaná se formó debido al choque de ambas corrientes de agua, de ahí que las olas del tsunami se propagasen casi perpendicular a la línea de costa, según información proporcionada por observadores directos.

La información obtenida del personal que labora en el puerto de Matarani, indica que la mar se retiró en promedio una distancia de 50 metros aproximadamente entre 5 y 10 minutos antes de producirse el terremoto, siendo el suceso notorio debido a que el

muelle que estaba en construcción quedo prácticamente vacío llegando a verse el fondo del mismo con un desnivel de 3.5-4 metros. Esta observación sustenta la información obtenida del mareógrafo de Matarani. La variación del nivel medio del mar, previo al terremoto, sugiere que se produjo un movimiento asísmico entre las placas de Nazca y Sudamérica alrededor de las localidades de Mollendo e Ilo para luego producirse el terremoto a 370 km de distancia en dirección NW paralela a la línea de costa.

Bibliografía

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513-1974). Boletín N°3, Serie C, Geodinámica, INGEOMIN, 129 p.

Tavera y Buform (2001). Revista de Física, UCM, España, N°10, 187-219.

Nombre de archivo: sismo13
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Características del tsunami generado por el Terremoto de Arequipa del 23 de Junio del 2001 (Mw=8
Asunto:
Autor: igp
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 01:01 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 01:01 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:25 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 1,697 (aprox.)
Número de caracteres:9,673 (aprox.)

Grandes Terremotos y Areas de Ruptura en la Región Sur de Perú: Terremoto de Arequipa del 23/06/2001

Hernando Tavera e Isabel Bernal
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

El 23 de junio de 2001, la región Sur de Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 8.2Mw. Este terremoto ocurre después de 133 años de silencio sísmico y su área de ruptura cubre solamente el 75% del área fracturada por el terremoto ocurrido en esta misma región en 1868 (9.0Mw). Sin embargo, es posible que el terremoto del 23 de Junio sea el inicio de una nuevo periodo de ocurrencia de grandes terremotos en la región Sur de Perú y Norte de Chile. La ocurrencia de otros terremotos alrededor del área de ruptura de los terremotos de 1868 (Sur de Perú) y 1878 (Norte de Chile) a diferentes niveles de profundidad, sustentan esta hipótesis.

Abstract

On June 23, 2001, an earthquake of magnitude 8.2Mw affected southern Peru. This earthquake occurs after 133 years of seismic silence and its rupture area covers only 75% of the area fractured by the earthquake that took place in this same region in 1868 (9.0Mw). However, it is possible that the June 23 earthquake is just the beginning of a new period of great earthquakes in southern Peru and northern Chile. The occurrence of other earthquakes around the rupture area of the 1868 earthquake (south of Peru) and 1878 (north of Chile), at different depths, support this hypothesis.

Introducción

La sismotectónica del borde Oeste de Sudamérica y por ende del Perú, es dominada por la convergencia de las placas de Nazca y la Sudamericana, la misma que se realiza con una velocidad relativa del orden de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). El reacomodo de las placas da origen a un proceso de compresión típico de fallas inversas y en la cual, la placa Sudamericana se remonta por encima de la placa de Nazca con un ángulo de inclinación que varía entre 25° a 30° y buzamiento en promedio en dirección NE. Este proceso es denominado como Subducción. La fricción que se produce en la interface de ambas placas, es el origen de todos los terremotos de magnitud elevada que ocurren frente a la costa de Perú, siendo los mas recientes los de 1966 (Mw=8.1), 1974 (Mw=8.1) y 1996 (Mw=7.7). Otros terremotos se han producido por la deformación interna de la placa de Nazca a niveles superficiales como el de Mayo de 1970 (Mw=7.9) y deformación interna a niveles intermedios como los ocurridos el Octubre de 1988 (6.0Mw) y Abril de 1999 (6.2Mw).

El terremoto ocurrido el 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$), al igual que todos los ocurridos frente a la costa de Perú, tiene su origen en la fricción que se produce en la interface de las placas de Nazca y Sudamérica. Este terremoto, en términos de energía sísmica liberada, es el mayor ocurrido en la última centuria en Perú y el más grande en el mundo desde 1965 en que se produjo el terremoto de Alaska. El epicentro del terremoto del 23 de Junio fue ubicado a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Arequipa) y su relación con otros terremotos con el mismo origen, es que su epicentro se localiza en el extremo Norte de una área de aproximadamente 1000 km de longitud que permanecía irrompible desde hace 133 años. Esta área corresponde a las rupturas producidas por los terremotos de 1868 y 1877 y que es conocida como “Zona de Silencio Sísmico”. Estos terremotos son de mayor potencial sísmico que el ocurrido el 23 de Junio.

En este estudio se analiza y evalúa la situación sísmica actual en la que se encuentra la región Sur de Perú y Norte de Chile después de los terremotos de 1868 y 1877, en relación del terremoto ocurrido el 23 de Junio de 2001.

Grandes Terremotos

En el Perú, la distribución de los sismos en superficie y profundidad, permite distinguir claramente la existencia de dos fuentes sismogénicas y si se toma en cuenta la frecuencia de ocurrencia de los terremotos de magnitud mayor, estas pueden ser clasificadas en fuente principal y secundaria principalmente para los sismos de foco superficial.

La fuente principal agrupa a todos los terremotos que ocurren, de Norte a Sur, frente a la línea de costa y por lo tanto, considera a los más grandes de los cuales se tiene información histórica o instrumental. Estos terremotos deben su origen al proceso de subducción y son mas frecuentes en el tiempo, así los más importantes ocurridos en los últimos 100 años son:

- .- Región Norte: terremoto de 1916
- .- Región Central: terremotos de 1940, 1942, 1966, 1970, 1974 y 1996.
- .- Región Sur: terremotos de 1913 y 2001.

De todos estos terremotos, el que liberó mayor energía es el ocurrido el 23 de Junio 2001 ($1.3E+24$ ergios); sin embargo, el terremoto ocurrido en 1970 en la región Central de Perú continua siendo el más catastrófico, debido a que el número de víctimas fue de 50000 muertos, 20000 desaparecidos y 150000 heridos. De acuerdo al número de terremotos ocurridos en los últimos 100 años, es evidente que la región Central es la de mayor potencial sísmico. Contrariamente, en la región Sur la no-ocurrencia continua de terremotos indicaría que estos al producirse liberarían mayor cantidad de energía y por ende alcanzarían magnitudes mayores a 8. La historia sísmica de la región Norte es incompleta ya que solo se cuenta con información de la ocurrencia de un solo sismo, de ahí que se asuma la hipótesis que los sismos de magnitud elevada ocurrirían con periodos superiores a los 500 años.

La fuente secundaria, considera a todos los terremotos que ocurren en el interior del país, los mismos que son menos frecuentes y presentan magnitudes moderadas; es decir, menores a 6.5mb. Estos terremotos se distribuyen principalmente, de Norte a Sur, a lo largo de la zona Subandina y están directamente asociados a sistemas de fallas activas que se distribuyen en esta zona y en los altos andes (Tavera y Buforn, 2001). Sin embargo, es necesario mencionar que en el Perú pueden ocurrir terremotos de diversa magnitud a diferentes niveles de profundidad, como el que se produjo cerca del límite Perú-Bolivia el 9 de Junio de 1994 ($M_w=9.0$) a una profundidad de 700 km. Este terremoto libero tanta energía como la que liberan todos los sismos ocurridos durante un año en el mundo. De ocurrir un terremoto de tal magnitud cerca de la superficie ($h < 60$ km), este sería catastrófico.

Complejidad de la Ruptura

A la ocurrencia de un terremoto, la propagación de su frente de ruptura sobre el plano de falla, es por lo general heterogénea y muchas veces difícil de describir. Dos modelos han sido desarrollados para explicar la complejidad y heterogeneidad de la fuente sísmica: el modelo de Barreras y el de Asperezas. El primero se define como la parada de la ruptura debido a la presencia de un medio muy resistente como el contacto entre dos tipos de roca o un salto lateral de falla. Este medio limita la dimensión del frente de ruptura, pero si el esfuerzo es continuo es posible saltar la barrera y continuar con la ruptura y al final es posible que resten pequeñas zonas de la falla sin romperse, y

que al hacerlo producirán las réplicas. El modelo de aspereza, es definido como el lugar donde se inicia el proceso de ruptura en un medio muy heterogéneo, debido a que ya hubo terremotos anteriormente, entonces la zona se encontraría libre de esfuerzos. Una idea clara, es que el terremoto se inicia en una zona en donde no se ha producido por un tiempo terremotos, lo que sugiere la presencia de zonas en la cual se esta produciendo una gran acumulación de energía y que son llamadas “Zonas de Silencio Sísmico”. En estas condiciones, el tamaño del terremoto por ocurrir dependerá de las dimensiones de la zona y del tiempo transcurrido desde el último terremoto.

El terremoto ocurrido el 23 de Junio, presento un proceso heterogéneo de ruptura evidenciado por la complejidad de su señal observada en registros de diversas estaciones, así como a partir de la generación de registros teóricos (Tavera, en este informe), distribución espacial de las réplicas (Antayhua et al., en este informe) y mediciones de GPS (Ruegg et al., 2001). Todos estos estudios sugieren que el proceso de ruptura de este fue prácticamente unilateral en dirección SE y con una duración de aproximadamente 100 segundos, tiempo durante el cual se produjeron hasta tres rupturas importantes separadas de la primera por 6 y 40 segundos respectivamente. La tercera ruptura y por ende la mayor, se habría producido frente a la localidad de Camaná, coincidiendo con las intensidades máximas observadas y con la ocurrencia de un tsunami de carácter netamente local.

Predicción Sísmica

Uno de los objetivos primordiales de las investigaciones en sismología, es tratar de predecir los terremotos; sin embargo, esta meta debe ser considerada a largo plazo debido a la complejidad de las características de este fenómeno. Actualmente, los resultados más confiables han sido obtenidos a partir del análisis y evaluación de la historia sísmica de una determinada región, información que permite identificar a las zonas sísmicas con mayor y menor potencial, así como conocer su posible influencia en las ciudades. Estas apreciaciones son tomadas en cuenta en el método de Predicción Tectónica, el mismo que a partir de las zonas de “Silencio Sísmico” y fallas activas permite conocer el lugar y el tamaño del terremoto por ocurrir, pero no la fecha del mismo.

En general, los terremotos de magnitud elevada pueden tener periodos de retorno de muchos años y mientras tanto, las zonas comprometidas son consideradas como “Zonas de Silencio Sísmico”. En el caso de Sudamérica y por ende en el Perú, la distribución de los grandes terremotos ocurridos en los últimos 100 años y sus respectivas áreas de ruptura muestran claramente donde se ubican las zonas de silencio sísmico, las mismas que deberán ser afectadas por futuros terremotos en algún momento en el tiempo.

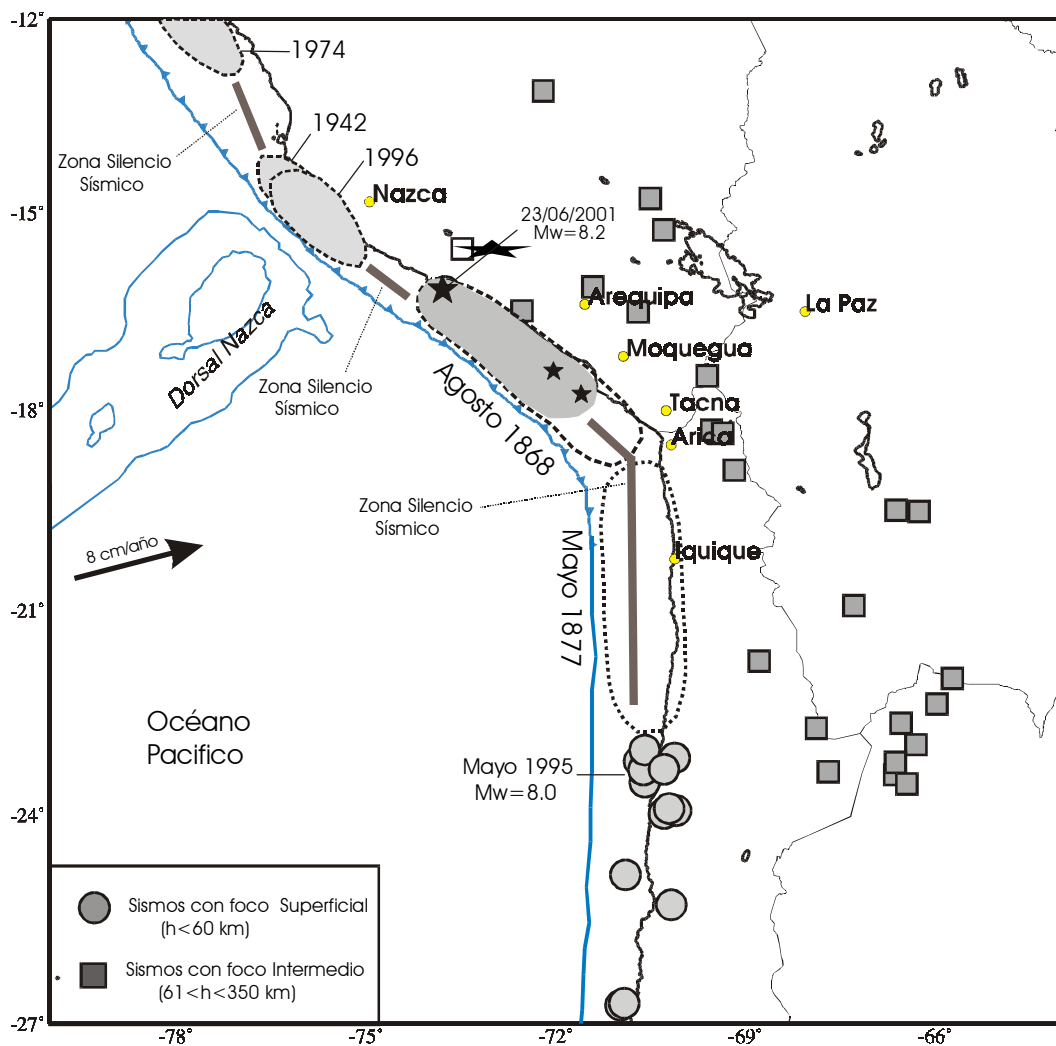


Figura 1. Distribución de las áreas de ruptura de grandes terremotos asociados al proceso de subducción y ocurridos en la región sur de Perú y norte de Chile durante los siglos XIX y XX. La zona sombreada de gris oscuro corresponde al área de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (estrella grande) y su serie de replicas (replicas mayores con estrellas pequeñas).

En el Perú, las zonas más relevantes y comprometidas para la ocurrencia de terremotos son (Figura 1): Zona de 150 km de longitud que se ubica entre las áreas de

ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996, y zona de 500 km de longitud que prácticamente considera toda la región Sur de Perú. La zona de mayor longitud es asociada al área de ruptura del gran terremoto de 1868 (9.0Mw), el mismo que produjo intensidades del orden de IX (MM) y un tsunami con olas que alcanzaron alturas de 16 metros (Silgado, 1978). En el año 1877 la región Norte de Chile fue afectada por un terremoto de gran magnitud (Mw=9.0) que continuó con la ruptura del área iniciada por el terremoto de 1868 hasta alcanzar una longitud final de 1000 km aproximadamente.

Tal como se ha descrito, analizado y discutido en los diferentes artículos de este informe, el 23 de Junio de 2001 y después de 133 años, la región Sur del Perú fue afectada por un terremoto de magnitud 8.2Mw causando muerte y destrucción en toda la región Sur de Perú y Norte de Chile. Este terremoto tuvo su epicentro a 82 km al NW de la localidad de Ocoña y de acuerdo a los resultados obtenidos a partir del análisis de las formas de onda registradas a diferentes distancias, a la generación de sismogramas teóricos, distribución de réplicas y mediciones de GPS, presentó un proceso de ruptura muy heterogéneo con eminente propagación en dirección SE. El tiempo promedio de duración de la ruptura fue de 100 segundos, tiempo durante el cual se habría producido hasta tres rupturas importantes, siendo la tercera la de mayor tamaño y con posible epicentro próximo a la localidad de Camaná. La distribución espacial de las réplicas producidas durante un periodo de 30 días muestra una longitud de ruptura del orden de 370 km en dirección SE.

En la Figura 1, se presenta la ubicación epicentral y el área de ruptura del terremoto del 23 de Junio, así como de los terremotos de 1868, 1877, 1942, 1974 y 1996, además de los epicentros de los terremotos de magnitud mb igual o mayor a 6.0 ocurridos entre 1990 y 2001. Obsérvese que el epicentro del terremoto del 23 de Junio se ubica en el extremo Norte del área de ruptura del terremoto de 1868 y el total de las réplicas ocurridas en los 30 días siguientes (incluye las 3 réplicas de magnitud mayor) se distribuyen sobre un área que cubre aproximadamente el 75% del área de ruptura del terremoto de 1868. Esta característica indicaría que el próximo terremoto a producirse debe comprometer a esta área y posiblemente parte del área asociada al terremoto de 1877, hipótesis que no permitiría tener idea del tamaño del terremoto a ocurrir, pero este debe ser al menos comparable o mayor al ocurrido el 23 de Junio.

La distribución espacial de los terremotos de magnitud mb igual o mayor a 6.0 ocurridos entre 1990-2001 (sin considerar a los terremotos de 1996 y 2001), muestran que la mayor deformación y por ende la mayor liberación de energía se ha producido a profundidades mayores a 60 km y estos prácticamente bordean a las áreas involucradas en los procesos de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877. Asimismo, en la Figura 1 se observa una gran acumulación de sismos con foco intermedio al Este del epicentro del terremoto de Chile de 1995, de manera similar en la región Sur de Perú la mayor concentración de este tipo de sismos se ha producido entre las latitudes de 16° y 19° Sur coherente con parte del área afectada por el terremoto del 23 de Junio, restando romperse entre las latitudes 17° y 19° Sur. A fin de evaluar esta hipótesis, en la Figura 2 se muestra las curvas de las isosistas de los terremotos de 1868 y 2001 y en ella se puede observar que el área correspondiente a las isosistas VII y VIII (MM) del terremoto de 1868, es al menos dos o tres veces mayor que las del terremoto de 2001, lo cual sugiere que la energía equivalente a la liberada por el terremoto de 1868 no ha sido liberada en su totalidad por el terremoto de 2001.

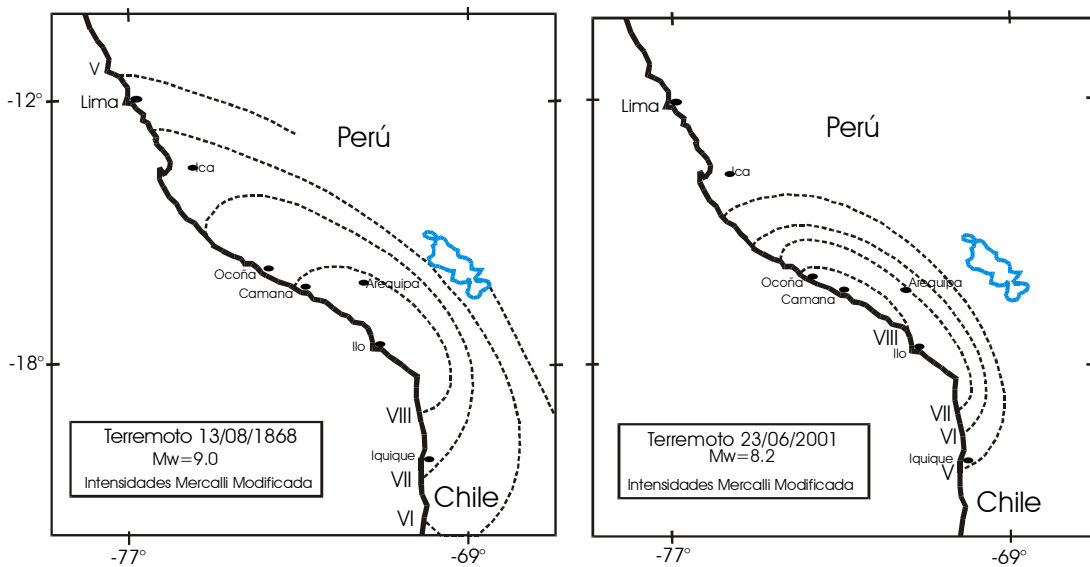


Figura 2. Mapas de isosistas regionales para los terremotos de Agosto de 1868 (Kausel, 1986) y Junio de 2001 (Tavera et al, 2001).

Por otro lado, también es posible evaluar los periodos de retorno de grandes terremotos en el borde Oeste de Perú ($M > 7.0$) y principalmente para la región Sur a

partir de la distribución epicentral y longitudes de ruptura de los terremotos ocurridos en los últimos 500 años, tal como se muestra en la Figura 3.

- *En la región Norte*, el único terremoto para el cual se dispone de información ocurrió en 1619 y después de este, la región Norte no ha vuelto a experimentar la ocurrencia de un nuevo terremoto. En esta situación, se estima que los periodos de retorno para los terremotos de magnitud elevada son mayores a 500 años.
- *En la región Centro*, se identifica dos agrupamientos de sismos que han generado longitudes de ruptura entre 100 y 350 km. El primer grupo considera los sismos ocurridos entre los años 1650 y 1750 haciendo un total de 100 años, posteriormente se observa un periodo de 190 años de calma o silencio sísmico, para luego producirse hasta 6 terremotos en un periodo de 60 años y a partir de 1996, toda esta región permanece en calma.

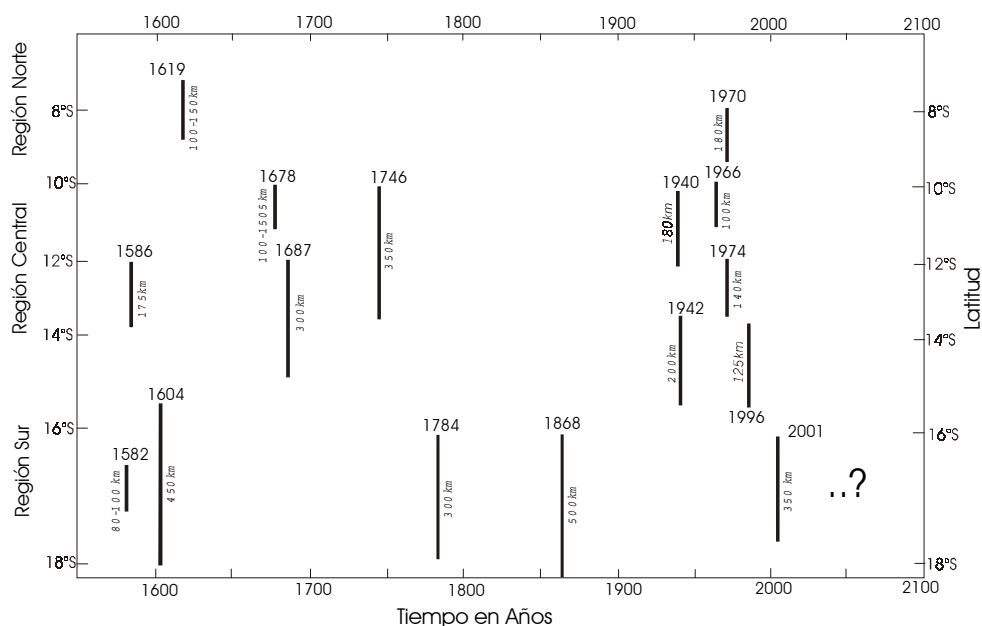


Figura 3. Distribución de los grandes terremotos en el borde Oeste de Perú en función de su ubicación en latitud y fecha de ocurrencia (según Dorbath et al, 1990).

- *En la región Sur*, los terremotos se agrupan definiendo también la presencia de dos agrupamientos. El primer grupo considera los terremotos ocurridos hasta el año 1610 y a partir de esta fecha se observa un periodo de calma de 180 años, para luego ocurrir hasta dos grandes terremotos en un periodo de 84 años. De estos terremotos el mejor documentado y de mayor tamaño es el ocurrido en 1868; mientras que, las

coordenadas epicentrales del terremoto de 1784 son inciertas, aunque se sabe que produjo importantes daños en esta región. Después del terremoto de 1868, le sigue un periodo de calma de 133 años que se interrumpió con la ocurrencia del terremoto del 23 de Junio de 2001. Si se considera que este último terremoto es de tamaño menor al ocurrido en 1868, es posible que este sea el inicio de un nuevo periodo de ocurrencia de grandes terremotos en esta región.

Conclusiones

La zona de silencio sísmico presente en la región Sur de Perú y Norte de Chile fue interrumpida con la ocurrencia, en primer lugar, de dos terremotos con magnitudes M_w de 8.0 y 7.7 y epicentros ubicados exactamente en los extremos Sur y Norte de las áreas de ruptura de los terremotos de 1868 y 1877. Para estos terremotos se ha propuesto un periodo de retorno del orden de 100 años. El terremoto del 23 de Junio de 2001 con epicentro y área de ruptura ubicada sobre el extremo Norte del área de ruptura del terremoto de 1868, sugiere que en esta región se ha iniciado un periodo de recurrencia de grandes terremotos. Por lo tanto, el potencial sísmico de la región se ha incrementado considerablemente.

La situación actual muestra que al menos existe en la región Centro y Sur de Perú, tres zonas potencialmente sísmicas. La primera de 150 km de longitud se ubica entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996, la segunda de 90 km de longitud entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1942/1996 y 2001; mientras que, la tercera considera una zona de aproximadamente 700 km de longitud ubicada entre las áreas de ruptura de los terremotos de 2001 (región Sur de Perú) y de 1995 en la región Norte de Chile.

Bibliografía

- DeMets et al., (1995). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.
Dorbath et al., (1990). *Bull. Soc. Sism. Am.*, 80, 551-576.
Ruegg et al., (2001). *Seism. Res. Lett.* 72, 673-678.
Silgado, (1978). *Boletín Serie C, Ingeomin, Lima-Perú*, 131 pp.
Tavera y Buforn, (2001). *Journal of Seismology*, (in press).

Nombre de archivo: sismo14
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Los Sismos en Perú
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 01:04 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 01:04 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:27 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 2,500 (aprox.)
Número de caracteres: 14,255 (aprox.)

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

Hernán Heras y Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este estudio se analiza las características de la distribución espacial de los sismos con foco superficial ($h \leq 60\text{km}$) ocurridos a lo largo de la costa de Perú entre 1964 y 1999 ($M_s \geq 3.5$) a fin de evaluar la existencia de áreas con valores anómalos de b (asperezas) cerca o próximo donde ocurrió el terremoto del 23 de Junio del 2001. Para tal fin, se realiza una aplicación de la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997) para el cálculo de los valores de b y periodos de retorno de grandes terremotos. Los resultados muestran la presencia de hasta siete (7) asperezas distribuidas, de Norte a Sur, a lo largo de la costa de Perú. De estas asperezas la más importante, debido al tiempo transcurrido (mas de 100 años), se ubica en el borde Oeste de la región Sur de Perú y cuya geometría y ubicación coincide con el epicentro y área de ruptura del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001. Según estos resultados, el terremoto de Arequipa fue predcido por la metodología aplicada en este estudio.

Abstract

This paper analyses the characteristics of the spatial distribution of the seismic events with superficial focus ($h \leq 60\text{km}$) that occurred along the coast of Peru between 1964 and 1999 ($M_s \geq 3.5$) in order to evaluate the existence of areas with anomalous b values (asperities) near or close to the location of the June 23, 2001 earthquake. For that purpose, we apply the methodology proposed by Wiemer y Wyss (1997) to calculate the b values and return periods of large earthquakes. Results show the presence of seven asperities distributed, from north to south, along the coast of Peru. Among these asperities the most important, due to the time elapsed (over 100 years), is the one located on the west border of the southern region of Peru and whose geometry and location coincides with the epicenter and rupture area of the June 23, 2001 Arequipa earthquake. According to these results, the Arequipa earthquake was predicted by the methodology applied in this study.

Introducción

En el borde oeste de Perú, son frecuentes los terremotos de magnitud elevada con origen en el proceso de subducción de la placa oceánica bajo la continental con una velocidad del orden de 8 cm/año (DeMets et al., 1990). Como resultado de la continua fricción entre ambas placas, en los últimos 60 años la zona costera de Perú ha sido testigo de 6 grandes terremotos (1940, 8.1Mw; 1942, 8.2Mw; 1966, 7.7Mw; 1970, 8.0Mw; 1974, 7.9Mw y 1996, 7.7Mw), los mismos que tuvieron longitudes de rupturas entre 75 y 200 km. La distribución espacial de estas rupturas ha permitido identificar áreas que no han experimentado ruptura alguna, siendo estas denominadas como “Zonas de Gap Sísmico”. De estas zonas las más importantes se ubican frente a la línea de costa entre Arequipa y Tacna, y la otra entre las áreas de ruptura de los terremotos de 1974 y 1942/1996. Desde el punto de vista de la complejidad de los procesos de ruptura

asociados a un terremoto, los Gaps Sísmicos presentes en una zona de subducción son explicados mediante el modelo de Asperezas (Kanamori, 1981 y Aki, 1984). Este modelo se sustenta sobre la hipótesis de que los terremotos de magnitud elevada tienden a repetirse en el mismo lugar después de un determinado periodo de tiempo. Por lo tanto, en el desarrollo del presente estudio el término “gap sísmico” será reemplazado por el de “Aspereza”.

Las asperezas pueden ser identificadas a partir de la distribución espacial de los sismos de acuerdo a un determinado rango de magnitud, distribución de las áreas de ruptura de grandes terremotos y estudios estadísticos utilizando catálogos sísmicos. Recientemente, Wiemer y Wyss (1997) han propuesto una nueva metodología para identificar la presencia de Asperezas basados en la distribución frecuencia – magnitud de los sismos ($\log N = a - bM$). Estos autores, señalan que las Asperezas se caracterizan por presentar valores de b menores a 0.6 ($b \leq 0.6$), siendo sus dimensiones proporcionales a las del área de ruptura y a la magnitud del terremoto. Además, la metodología permite conocer los periodos de recurrencia de los sismos asociados a las asperezas.

Recientemente, Heras (2002) realiza una aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss para evaluar la presencia de asperezas en la zona de subducción de Perú utilizando una base de datos previamente calificada que considera sismos ocurridos entre el periodo 1964-1999, todos con magnitud M_s igual o mayor a 3.5. Parte de los resultados obtenidos por Heras (2002), permitió identificar si existió una aspereza o área con valores anómalos de b cerca o próxima de la zona en donde ocurrió el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 ($M_s=7.9$; $M_w=8.2$), los mismos que son resumidos en el presente estudio.

Datos

Para la aplicación de la metodología de Wiemer y Wyss (1997), se utiliza la base de datos del Catálogo Sísmico del Instituto Geofísico del Perú (IGP) para el periodo de 1964 a 1999, debidamente complementado con los catálogos del National Earthquake Information Center (NEIC) y de Endghal (Engdhal et al., 1997). Esta base de datos considera 1,200 sismos con foco superficial ($h < 60$ km) y una magnitud M_s mínima de

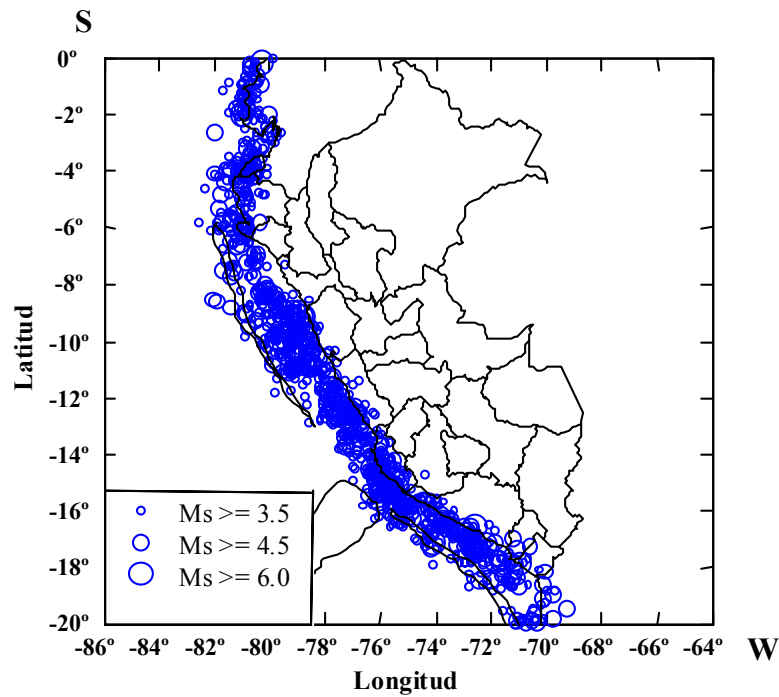
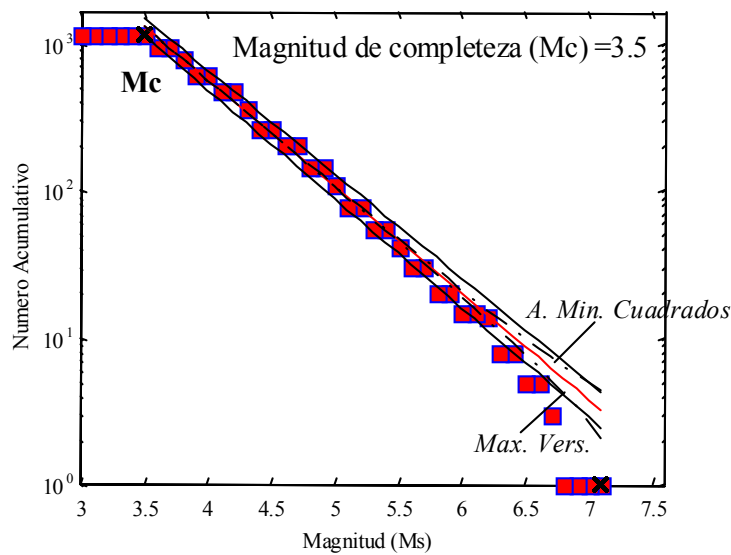


Figura 1. Mapa de sismicidad con foco superficial presente en el borde Oeste de Perú para el periodo 1964-1999 ($M_s \geq 3.5$)



Valor de b (A. Min Cua. $M_c \geq 3.5$): -0.726 ± 0.04 , Valor a = 5.6591

Valor de b (Max Ver. $M_c \geq 3.5$): -0.657 ± 0.017 , Valor a = 5.3672

Figura 2. Completitud de la base de datos en función del número acumulativo de sismos y la magnitud M_s . Los valores de b y a en el extremo inferior de la figura corresponde a los ajustes de mínimos cuadrados (línea discontinua) y máxima verosimilitud (línea negra y roja).

3.5, tal como se muestra en las Figuras 1 y 2. La restricción de los datos en cuanto a su nivel máximo de profundidad, es debido a que se estima que a la profundidad de 60 km se encuentra el límite de contacto entre las superficies de las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso de subducción.

Procedimiento

Para el cálculo de los valores a y b a partir de la relación $\log N = a - bM$, se procedió en primer lugar a crear una malla o grilla sobre el área de estudio, de modo que se pueda determinar la distancia en grados existentes entre los puntos de cada nodo de la celda (espaciado de la grilla). En segundo lugar y conocida la distancia entre los nodos, se estima la longitud del radio de muestreo de cada nodo. Con estos parámetros, la curva acumulativa del número de sismos es calculada para cada volumen esférico de radio con origen en el vértice de cada celda. A partir de esta curva, los valores a y b pueden ser obtenidos con los métodos de máxima verosimilitud ó mínimos cuadrados (Figura 2).

De acuerdo a la distribución espacial de los sismos considerados en este estudio, se ha creído conveniente crear una grilla espaciada en 10 km (0.1°). Asimismo, la historia sísmica muestra que los terremotos de magnitud elevada ocurridos en el borde Oeste de Perú han producido áreas de ruptura con radios mayores a 150 km (radio de muestreo), de ahí que este valor sea considerado como dato de entrada para el cálculo de b . Finalmente, los valores de b son estimados para cada volumen esférico y representados en un rango de colores que va desde el azul para los valores bajos (valores anómalos de b) hasta el rojo para los valores altos.

Para el cálculo de los periodos de recurrencia de los terremotos asociados a las asperezas, se utiliza la siguiente relación (Wiemer y Wyss, 1997):

$$\Pr(M_{max}) = \Delta T / 10^{(a-bM)}$$

donde, ΔT es el periodo de datos que se ha considerado en el estudio, \Pr el periodo de recurrencia y M_{max} la magnitud del sismo para el cual se desea conocer su periodo de recurrencia.

Resultados e Interpretación

En la Figura 3, se muestra los resultados obtenidos para la zona de subducción de Perú. En esta figura se observa que los valores anómalos de b han permitido identificar la presencia de hasta siete (7) asperezas, las mismas que son delimitadas por líneas discontinuas. La ubicación geográfica de estas asperezas coincide con las áreas afectadas en el pasado por la ocurrencia de grandes terremotos; por lo tanto, es posible que estas sean el origen de otros terremotos con las mismas características en cuanto a su ubicación epicentral y tamaño (magnitud).

De estas asperezas, una de las más importantes, debido al periodo de tiempo transcurrido (más de 100 años), es la que se ubica en la región Sur de Perú (norte del departamento Arequipa) entre la línea de fosa y la costa con un área de $350 \times 150 \text{ km}^2$ aproximadamente. Esta aspereza presenta periodos de retorno del orden de 75 años, lo cual indica que la región estaba propensa a ser afectada por un terremoto con magnitud mínima de 7.2 Ms desde el año 1943, debido a que el último gran terremoto ocurrido en la región Sur fue en 1868 (9.0Ms). La existencia de esta aspereza fue confirmada con la ocurrencia del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 (7.9Ms, 8.2Mw) y cuyo epicentro se ubica en el extremo norte de la aspereza (Figura 4). Si se considera que el proceso de ruptura del terremoto se desarrollo de manera unilateral en dirección SE, tal como sugiere Tavera et al., (2001), el área correspondiente a la aspereza es prácticamente la misma que la obtenida para el terremoto del 23 de Junio a partir de la distribución de replicas (Antayhua et al., en este informe); es decir, $370 \times 150 \text{ km}^2$. Estas características sugieren que el terremoto de Arequipa del 23 de Junio fue prácticamente pronosticado por el método propuesto de Wiemer y Wyss (1997).

El mapa de periodos de retorno de la Figura 4 permite corroborar la ubicación y la geometría de otras asperezas presentes en el borde Oeste de Perú con periodos de retorno del orden de 50 años.

Conclusión

La distribución de valores de b , junto con la estimación del periodo de recurrencia local para terremotos de magnitud elevada proporciona una importante información para la identificación de asperezas. En el caso de la zona de subducción de

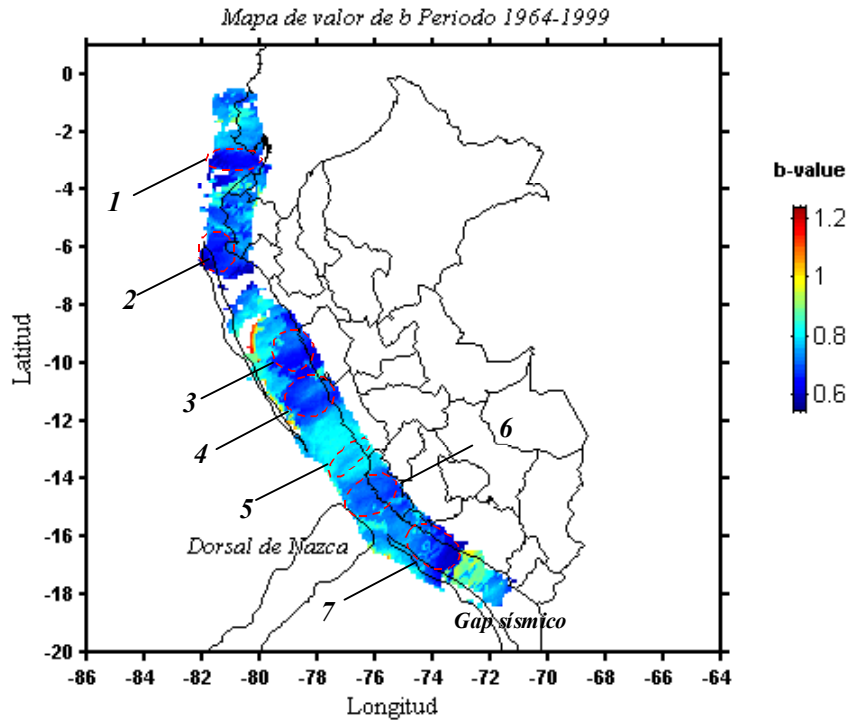


Figura 3. Mapa de distribución de valores de b . Los números indica las áreas identificadas como "gap sísmico". El área 7 corresponde a la aspereza asociada al terremoto del 23 de Junio de 2001.

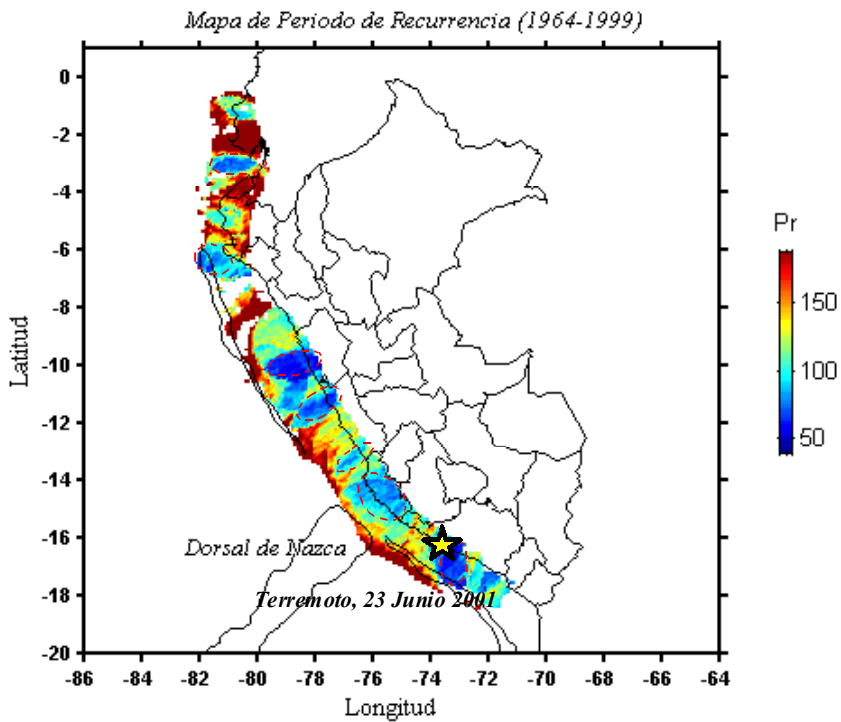


Figura 4. Mapa de periodos de recurrencia para terremotos con $M_s > 7.0$. La estrella indica el epicentro del terremoto del 23 de Junio de 2001 y el círculo con líneas rojas el área total de ruptura.

Perú, se ha identificado un número de siete asperezas siendo la más importante, por el periodo de tiempo transcurrido (más de 100 años), la que se ubica al norte de la región Sur de Perú. La ubicación y las dimensiones de esta aspereza coincidió con la ubicación del epicentro y área de ruptura del terremoto del 23 de Junio de 2001 ($M_s=7.9$). En estas condiciones, la ocurrencia de este terremoto fue puesto en evidencia con la metodología propuesta por Wiemer y Wyss (1997).

Bibliografía

- Aki, (1984). *Jour. Geophys. Res.* 89, 5867-5872.
- DeMets et al., (1990). *Geophys. Jour. Int.*, 101, 425-478.
- Engdahl et al., (1997). *Bull. Seism. Soc. Am.* 88, 722-743
- Gutenberg y Richter, (1944). *Bull. Seism. Soc. Am.* 34, 185-188.
- Heras, (2002). Tesis de grado. UN San Agustín - Arequipa. 130 pp.
- Kanamori, (1981). *Eathquake Prediction. International Review; Maurice Ewing Ser.*, Ed. D.W., Simpsn P.G Richards, 4, 1-19, Washintong. D.G. Am. Gefhys. Union.
- Tavera y Buforn, (1998). *Física de la Tierra*, UCM. 10, 187-219.
- Tavera y Agüero, (2000). *Centro Nacional de Datos Geofisicos – Sismología IGP*, Lima, Perú, 400pags.
- Tavera et al., (2001). *Journal of. Seismology*, (in press).
- Wiemer y Wyss, (1997). *Jour. Geophys. Res.* 102, 15115-15128.

Nombre de archivo: sismo15
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Aplicación de los valores de “b
Asunto:
Autor: Hernan Heras
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 02:29 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 02:29 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 4 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:29 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 1,693 (aprox.)
Número de caracteres:9,652 (aprox.)

Educación y Prevención

*Isabel Bernal
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Introducción

Desastre y tragedia en el sur de Perú.

¡...TERREMOTO...!

*Cuarenta muertos en Arequipa, Moquegua y Tacna
Mas de 300 heridos en emergencia de hospitales
Número de víctimas puede ser mayor por destrucción de poblados enteros
Cuarenta réplicas del sismo mantienen a la población en zozobra
Fueron 90 interminables segundos de terror y pesadilla*

Diario La Razón (Domingo 24 de Junio de 2001)

Noticias como la descrita anteriormente, nos llena de asombro e impotencia al no poder hacer nada ante la ocurrencia de este tipo de desastres. El avance de la ciencia, en términos de predicción, no ha dado los frutos que se esperaba debido principalmente a la complejidad del problema; sin embargo, en la actualidad se conoce mucho más de terremotos que años anteriores. Asimismo, el desarrollo de nuevos métodos y el avance en la sismometría a ayudado a comprender mejor a este tipo de fenómeno, pero aún la información con la que se cuenta es poca y requiere de mayores esfuerzos.

De todos los métodos utilizados en predicción, el que proporciona información confiable se le conoce como “Predicción Tectónica” y aunque no permite conocer la fecha de ocurrencia de un terremoto, si indica el lugar donde ocurrirá y su posible tamaño. Esta información es mas que suficiente para tomar conciencia y desarrollar campañas de prevención y mitigación del peligro en todo el sentido de la palabra. Es importante considerar que cuando ocurre un desastre, las personas que sobreviven al mismo no serán las más inteligentes, ni las más fuertes o las más jóvenes, sino que solo se salvaran aquellas que han sido preparadas para enfrentar a este peligro y a los desastres que ellos ocasionan.

La tragedia que causó el terremoto del 23 de Junio de 2001 en la región Sur de Perú, debe ser punto de partida para una profunda reflexión a fin de desplegar en el ámbito nacional, un apropiado programa que conduzca a la población a prepararse para reducir su vulnerabilidad y la del medio que la rodea ante peligros como los terremotos. Al momento de tratar los temas de educación, prevención y mitigación ante un desastre no se trata de alarmar, sino de ir generando un hábito de previsión, una conducta de defensa ante un fenómeno natural que en emergencia, permita reaccionar racional e inteligentemente para protegerse y salvar vidas. En general, las personas están desprotegidas ante este fenómeno porque no existe una adecuada preparación para las emergencias. Casi siempre, pasado el susto generado por un terremoto, se sigue en la rutina y cuando éste se transforma en desgracia, el lamento y heroísmo van de la mano porque faltó la educación necesaria para poder prevenir y mitigar los efectos del desastre.

Conceptos Básicos

Desde el punto de vista sísmico, el educar a la población involucra responder algunas preguntas frecuentes usando un lenguaje claro y simple.

- *Qué es un terremoto...?*
- *Donde se producen los terremotos...?*
- *Que significa peligro sísmico...?*
- *Que significa prevención...?*

Se debe tener en claro que todo movimiento del suelo generado por ondas elásticas (ondas sísmicas) grande o pequeño se conoce como terremoto y su tamaño esta en función de la cantidad de energía que estos liberan. En el lenguaje popular, el sismo que frecuentemente genera movimientos suaves en las viviendas y susto en la población se llama *temblor*; mientras que, si el movimiento es fuerte y produce destrucción y muerte es conocido como *terremoto*. Sin embargo, es importante señalar que el grado de destrucción que puede generar un sismo en superficie dependerá de la profundidad del foco que emite la energía, de la distancia a la cual se encuentra ubicado el epicentro (lugar donde se genero el sismo o terremoto) y del grado de vulnerabilidad de la ciudad que es afectada por el sismo.

Para cuantificar o estimar el tamaño de un terremoto se utilizan las escalas de magnitud e intensidad. La escala de *Magnitud* cuantifica la cantidad de energía que libera el terremoto y para medirla se utiliza la escala de Richter. Otro parámetro que también proporciona información sobre el tamaño del sismo es la *Intensidad* y en este caso mide el nivel de daño observado en un determinado punto o lugar; es decir, está en función de los daños o efectos causados por el sismo sobre el hombre y las construcciones. La escala frecuentemente utilizada es la de Mercalli Modificada (MM).

En Perú, los terremotos son producidos o tienen su origen en dos fuentes. La más importante considera a la sismicidad asociada a la fricción de las placas de Nazca y Sudamérica dentro del proceso conocido como subducción. Esta sismicidad se distribuye de Norte a Sur, entre la fosa y la línea de costa, siendo responsable de los terremotos más grandes y destructivos que hayan ocurrido en Perú. La segunda fuente considera los sismos que se producen en el interior del continente, estando estos asociados a la presencia de fallas tectónicamente activas. Esta sismicidad es menor en número y frecuencia en relación con los sismos generados por la primera fuente.

El análisis de la distribución espacial de los sismos de diversa magnitud en el Perú, muestra que el peligro sísmico es inminente y más aún si se considera que el Perú se ubica en una de las regiones más sísmicas del mundo, debido a que forma parte del llamado Cinturón de Fuego del Océano Pacífico y en donde se libera el 80-85% de la energía almacenada en el interior de la Tierra en forma de sismos y erupciones volcánicas. Identificado el peligro sísmico, es necesario contrarrestar sus efectos y para tal fin se debe realizar un programa planificado de *prevención y mitigación* que permita proteger a la población y disminuir eficazmente el impacto del desastre.

Peligro sísmico

En general, el *Peligro Sísmico* identifica la fuente del elemento que va a evaluar el grado de vulnerabilidad de una determinada localidad, ciudad o emplazamiento. En general, el término peligro está relacionado con los terremotos y es competencia directa de la sismología; mientras que, la vulnerabilidad debe ser evaluada por el ingeniero a quien le interesa el efecto combinado de la ocurrencia de diferentes sismos y las diversas respuestas de una estructura en particular. Identificado el peligro

sísmico, su relación con un determinado emplazamiento ó región es definida como la probabilidad de que el parámetro que mide el movimiento del suelo, debido a la ocurrencia de un sismo, sobrepase un nivel de umbral dado para un determinado periodo de tiempo. Es decir, se busca conocer algún valor representativo de la intensidad del movimiento del suelo a fin de ser utilizado en la planificación urbanística y en el diseño antisísmico de las construcciones.

En estas condiciones, el peligro sísmico ha permitido cuantificar la importancia de las dos fuentes sismogénicas presentes en el Perú. Se debe tener en cuenta, que los terremotos producen distintos efectos en las personas y en las construcciones, pero al margen del tamaño del sismo, los efectos también tienen relación con el grado de vulnerabilidad de la zona afectada. Los mayores terremotos ocurridos durante los últimos 65 años, no se encuentran entre los más trágicos ya que las construcciones mejoradas disminuyeron la cantidad de muertes. Suelen ser especialmente catastróficos los terremotos que provocan efectos secundarios como deslizamientos de tierra, licuación de suelos o tsunamis. El terremoto de Mayo de 1970, toma relevancia a escala mundial debido al importante deslizamiento de masas de tierra que prácticamente sepultó a toda la localidad de Yungay en el Departamento de Ancash (50,000 muertos, 20,000 desaparecidos y 150,000 heridos).

En general, para que el peligro sísmico, representado por un terremoto, sea destructivo debe tener un determinado tamaño (magnitud), una cierta profundidad (foco superficial, intermedio o profundo) y distancia con relación a la ciudad más próxima que pueda ser afectada, y el grado de vulnerabilidad de dicha ciudad.

Por otro lado, es evidente que el mayor peligro sísmico debe ser atribuido a los terremotos de magnitud elevada ($m_b > 7.0$); por lo tanto, es importante conocer la distribución espacial y la frecuencia de estos terremotos a fin de intentar prevenir la ocurrencia de los mismos o mitigar sus efectos. Es importante comprender que, sí en una determinada región ha ocurrido grandes terremotos en el pasado, estos volverán a ocurrir en el futuro. De ahí que los terremotos que ocurrieron frente a la costa de Perú como los de 1940, 1966, 1970, 1974, 1996 y 2001 deben volver a producirse en los

próximos años; por lo tanto, todas las ciudades y localidades ubicadas a lo largo de la costa y/o próximas a las fallas activas, siempre estarán propensas a ser afectadas por este tipo de peligro.

Prevención

Educación

Para lograr prevenir y disminuir los efectos que pudiera causar en una determinada región la ocurrencia de un sismo, es necesario educar a su población usando un lenguaje claro y simple, con lo cual debe pretenderse crear un hábito de previsión ante un fenómeno de esta naturaleza. Con educación la ciudadanía comprenderá, que mientras se viva en un país como el Perú se tendrá que aprender a convivir con los sismos y reaccionar ante ellos de forma racional e inteligente para protegerse y salvar vidas. Es importante que la educación empiece en las familias a fin de preparar a las futuras generaciones.

A la pregunta *¿... Cómo educar a la población...?*

Lo primero que se debe comprender es que todas las personas que habitan en este mundo, siempre están propensas a soportar y sufrir algún tipo de desastre natural (sismos, inundaciones, sequías, incendios, tornados, huracanes, etc.). El Perú no es ajeno a esta realidad y en el caso de los sismos, en los últimos 65 años muchas de las ciudades han sido afectadas por uno de los 18 sismos ocurridos durante este periodo.

Es evidente que el término educación es primordial al momento de asumir con responsabilidad las medidas preventivas ante la ocurrencia de un sismo. La respuesta a la pregunta anterior considera educar a un individuo por medio de charlas, programas de radio o televisivos y simulacros. La efectividad y el éxito de estas medidas dependerá de la continuidad con la que se realicen y de la metodología utilizada para que sean comprendidas y asimiladas por personas de diferentes grados de instrucción educativa. Asimismo, a nivel escolar (inicial, primaria y secundaria) y universitario es conveniente adicionar un curso curricular que considere los temas de prevención y mitigación de fenómenos naturales. La finalidad es buscar se tome consciencia desde muy jóvenes, del peligro al que están sujetos constantemente por vivir en una zona altamente sísmica.

Vulnerabilidad

Una vez identificado los peligros potenciales, desde el punto de vista de la sismología, es necesario evaluar el grado de vulnerabilidad de las grandes estructuras, localidades y ciudades. Sin embargo, para el Perú son pocos o muy puntuales los trabajos que se han realizado a fin de evaluar o cuantificar aquellos parámetros que de alguna manera permiten tener una idea clara del factor vulnerabilidad. A fin de ayudar a tomar conciencia, de que tan preparados están los individuos en el Perú ante la ocurrencia de un sismo, es necesario considerar las siguientes definiciones y conceptos:

Tipo de suelo

Muchas de las localidades y ciudades en el Perú se han levantado sobre cuencas, riberas de ríos, laderas de montañas y quebradas. Típicamente, estos suelos son sedimentarios o están formados por conglomerados poco o nada consolidados, de ahí que permitan fácilmente la amplificación de las ondas y por ende produzcan mayor daño en superficie. *De acuerdo al tipo de composición de los suelos se deben dictar las normas antisísmicas convenientes para el control en la construcción de las viviendas, principalmente en las nuevas áreas que se han integrado a las ciudades como producto de la expansión urbana.*

Tipo de construcción

Durante la ocurrencia de un sismo, aproximadamente el 60% de las muertes se deben al desplome de viviendas debido a la mala calidad de su construcción. Resultan ser más peligrosas las viviendas de barro y bloquetas, con o sin ninguna estructura de cemento o madera. Asimismo, los grandes edificios, colegios y complejos habitacionales mal diseñados se convierten en trampas mortales. *Mejorar los métodos de construcción y respetar las normas de construcción antisísmicas resulta ser eficaz para reducir la vulnerabilidad de las ciudades.*

Normas de expansión urbana

Se producirá un mayor número de muertes y grandes desastres si la población se encuentra concentrada en viviendas pequeñas y áreas limitadas. La densidad o turgurización de la población en las grandes ciudades como Lima es muy alta y mucho mas en las áreas con construcciones antiguas o en los nuevos asentamientos humanos,

constituyéndose un peligro potencial. *Para solucionar este problema es necesario contar con normas de urbanización y control de la expansión urbana.*

Edad de las construcciones.

Las ciudades más importantes del mundo, como es el caso de Lima, Arequipa y otras, tienen muchos años de fundadas y por lo tanto, cuentan con viviendas y/o edificaciones de siglos anteriores aun en funcionamiento. Este tipo de construcciones, dañadas por el paso del tiempo, no resultan ser recomendables para vivir debido a la alta probabilidad de que sufran colapsos e incendios. *Para contrarrestar esta situación debe realizarse evaluaciones del estado actual de las construcciones y sus respectivas reparaciones cada cierto periodo de tiempo.*

Señalización de seguridad en las viviendas y edificaciones.

Es frecuente observar que durante el desastre prevalece la confusión y el caos a fin de escapar de los edificios o lugares cerrados y muchas veces se toman rutas de mayor peligro causando la muerte de muchas personas. *A fin de evitar este tipo de accidentes toda edificación debe contar con una buena señalización antisísmica.*

Medidas Preventivas

Es frecuente oír a las personas decir ante la posible ocurrencia de un desastre,

¡ debemos estar siempre preparados...!

y para tal efecto poco o nada se hace a fin de pretender que la población este realmente preparada. En tal sentido, a continuación se indica algunas recomendaciones para contrarrestar los efectos que pudieran causar los sismos.

- La Construcción o Reparación de Viviendas deben ampararse en códigos de construcción previamente establecidos o ser realizados por especialistas en la materia.
- Realizar estudios técnicos a fin de evaluar la resistencia de las edificaciones para determinar posibles áreas a reforzar o reconstruir, así como los lugares más seguros o más susceptible de daños

- Planificar y Organizar junto a sus familiares y vecinos la evacuación de las viviendas.
Es necesario extender este plan hacia su lugar de trabajo y la escuela.
- Mantener a mano los teléfonos de emergencia (Defensa Civil, Bomberos, Cruz Roja, Policía, Médicos), una lámpara de mano, extinguidor de incendios, agua embotellada y comida enlatada para unos tres días, destapador de latas y botellas. Asimismo, tener a mano un silbato como sistema de alerta y para pedir ayuda, además de llevar siempre sus documentos de identidad.
- Aprender primeros auxilios
- Identificar los lugares mas seguros dentro de cada vivienda, revisar que las salidas principales y alternas estén libres de obstáculos
- Fijar bien los muebles en la pared o en el piso
- Aleje la cama de lugares peligrosos como roperos y muebles donde se colocan Televisores, Equipos de Sonidos, VHS, Computadoras, etc.
- Coloque los objetos grandes y pesados en lugares bajos o en el suelo.
- Mantenga en un lugar visible y accesible previamente establecido, copia de la llave de su casa u oficina y no la cambie de lugar
- Reúnase con sus vecinos y evalúe los recursos disponibles de la comunidad (médicos, constructores, ingenieros, equipos de comunicación, provisiones etc.)
- Durante un terremoto, tratar de mantener la calma y ponerse a salvo y después del terremoto, prestar auxilio a los que lo necesitan

Conclusiones

El grado de destrucción que cause un sismo, *no depende de su magnitud*, mas bien depende del grado de vulnerabilidad de las personas, ciudades y construcciones ante el peligro que viene a ser el sismo en sí.

La vulnerabilidad de los habitantes de Perú, debe ser evaluada a partir del grado de conocimiento o educación que cada individuo ha recibido y asimilado sobre los desastres a los cuales esta expuesto, su potencial y como se ha preparado para afrontarlos. La ocurrencia del terremoto del 23/06/2001 ha demostrado, que esta tarea esta incompleta.

Es importante realizar campañas de prevención orientadas básicamente a la educación de los individuos, tratando de que este no sea un privilegio. Deben dictarse cursos y charlas sobre prevención de desastres en colegios, universidades, institutos y centros de trabajo. El objetivo es reducir el nivel de vulnerabilidad de los individuos.

Como punto principal se debe crear consciencia de los peligros a los que se está expuesto y valorar su propia existencia para cumplir a cabalidad con estos objetivos.

La experiencia vivida por lo pobladores ante la ocurrencia de sismos, ha permitido considerar de manera general, que los problemas principales que llevan a las personas a ser víctimas fáciles a estos fenómenos son: 1). Los problemas económicos que conlleva a familias enteras a buscar medios infrahumanos para subsistir y 2) la existencia de un total desinterés y apatía de las personas ante la educación preventiva. En estas condiciones es evidente que poco importa los peligros naturales a los cuales se está expuesto y que pueden repetirse en un futuro muy cercano.

Nombre de archivo: sismo16
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Educación y Prevención Sismica
Asunto:
Autor: david
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 02:34 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 02:34 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:31 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 2,578 (aprox.)
Número de caracteres: 14,696 (aprox.)

GEOLOGIA Y GEODINAMICA

Nombre de archivo: SISM
Directorio: C:\WINDOWS\Escritorio
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 08/08/2008 12:35 A.M.
Cambio número: 3
Guardado el: 08/08/2008 01:04 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 11 minutos
Impreso el: 08/08/2008 01:05 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 2
Número de palabras: 9 (aprox.)
Número de caracteres: 56 (aprox.)

Efectos Geológicos Asociados al Sismo del 23 de Junio del 2001 en el Sur del Perú

Juan Carlos Gómez¹, Frank Audemard² y José Quijano¹

¹Instituto Geofísico del Perú, Lima-Perú

²Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS, Venezuela

Resumen

El día sábado 23 de junio del 2001, un terremoto de magnitud 6.9 mb, afectó toda la región Sur de Perú, incluyendo las ciudades de Arica, Iquique en Chile y La Paz en Bolivia. El epicentro del terremoto fue localizado en la región sur y cerca de la línea de costa; esto es, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña, Departamento de Arequipa (Tavera et al., 2001). El Instituto Geofísico del Perú (IGP) dentro de sus actividades de investigación sobre las causas del sismo en mención, comisionó a los autores para la evaluación de los efectos geológicos causados por el movimiento sísmico del 23.06.01 y sus réplicas. El trabajo de campo se llevó a cabo entre el 4 y el 20 de julio del 2001. La evaluación geológica permitió determinar que no hubo evidencias superficiales de reactivación de algún sistema de fallamiento geológico y/o fracturamiento en las proximidades del área epicentral, considerando que el hipocentro estuvo muy cercano al litoral y a poca profundidad.

Los principales efectos geológicos asociados al sismo estuvieron ligados a fenómenos de remoción de masas y licuación de suelos. La atenuación de la propagación de la energía en función de los volúmenes de masas removidas por efectos del sismo del 23.06.01, tiene una tendencia decreciente notoria en dirección SE con relación al epicentro. La vulnerabilidad física de los poblados e infraestructura afectada por el sismo, está ligada a deficiencias constructivas y ocasionalmente a características físicas locales del suelo-subsuelo.

Abstract

On Saturday June 23 on 2001, an earthquake of magnitude 6,9 ML, affection all the South region of Peru, including the cities of Arica and Iquique in Chile and La Paz in Bolivia. The epicenter of the earthquake was located in the South region and near the coastline; this is, to 82 km to the NW of the Ocoña locality, Arequipa Department (Tavera et al., 2001). The Geophysical Institute of Peru (IGP) within its activities of investigation on the causes of the earthquake in mention, sended to the authors for the evaluation of the geologic effects caused by the seismic movement of 23.06.01 and his you talk back. The fieldwork I am carried out between the 4 and the 20 of July of the 2001. The geologic evaluation permitted to determine that there weren't surface evidences of reactivation of any fault geologic system in the proximity of the epicentral area, considering that the hypocenter was very near the coast and little depth. The main associated geologic effects to the earthquake were bound to phenomena's of removal of masses and ground liquefaction. The attenuation of the energy propagation in function of masses volumenenes removed by effect of the earthquake of the 23.06.01 has a well-known decreasing tendency in direction in relation of the epicenter. The physic vulnerability of the towns and infrastructure affected by the earthquake, is bound to constructive deficiencias and occasionally to local physics characteristics of the be accustomed to-subsoil.

Introducción

A raíz de la ocurrencia del sismo del 23.06.01 que afectó severamente el sur del país, el IGP envió a la zona afectada una misión técnica-científica para evaluar las causas y efectos del evento sísmico en mención. El objetivo de la inspección fue identificar los factores geológicos causantes del sismo y sus réplicas, y de aquellos que

influyen en los efectos de sitio, con fines de prevención de desastres. Para tal efecto, se realizaron los siguientes trabajos:

- Inspección en el área epicentral con el objeto de verificar el reactivamiento de fallas y/o efectos superficiales causados por el sismo y sus réplicas.
- Estimación de los volúmenes de masas desprendidas a causa del sismo y su distancia al área epicentral.
- Condiciones geológicas del suelo-subsuelo de las localidades afectadas por el sismo.

Estudios Anteriores

Por la gran extensión de la zona inspeccionada, se cuenta con una amplia bibliografía de trabajos geológicos regionales, que forman parte de la Carta Geológica Nacional, así como estudios especializados de geodinámica de algunas cuencas y estudios locales. También se cuenta con información de reportes de sismos históricos, como ejemplo se puede mencionar el último sismo severo que afectó la región de Nazca en 1996 (Monge, 1997).

Ubicación del área

El área de estudio abarcó parte de los departamentos de Ica, Ayacucho, Huancavelica, Arequipa, Moquegua y Tacna, con una extensión aproximada de 10,000 km², enmarcados en las siguientes coordenadas geográficas (Figura 1):

Latitud Sur	15°30' a 18°30'
Longitud Oeste	70°30' a 75°30'

El acceso al área inspeccionada es por la vía asfaltada conocida como Panamericana Sur, la misma que recorre longitudinalmente, de norte a sur, toda la costa peruana y las vías troncales transversales a ésta, asfaltadas en algunos tramos y en otros afirmados solamente.

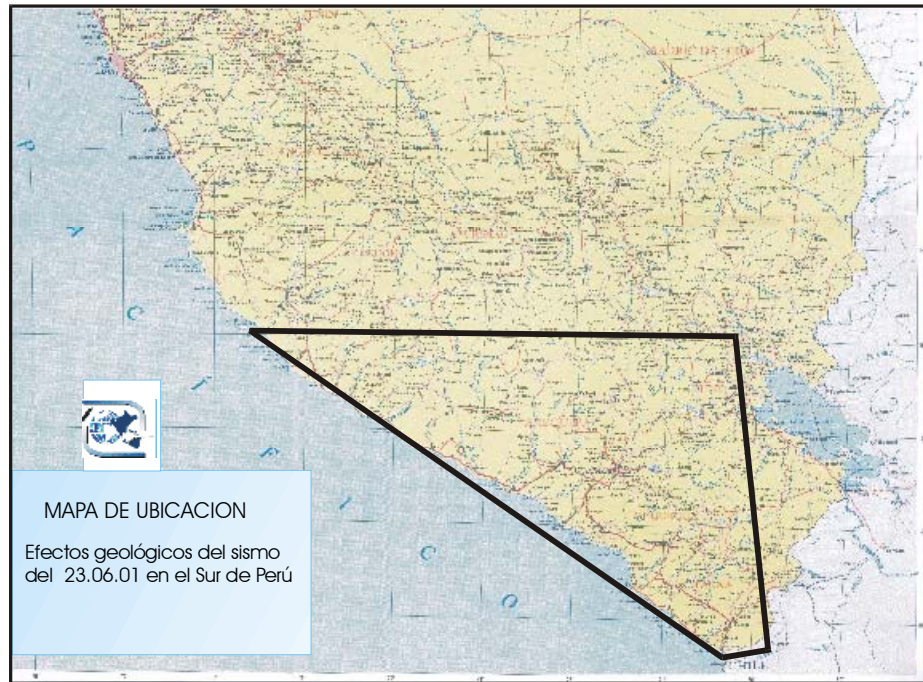


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Efectos Geológicos

Los movimientos sísmicos pueden activar fenómenos de remoción de masas (deslizamientos, derrumbes, caída de rocas, entre otros) y ocasionar un triple efecto: aumento del esfuerzo cortante, disminución de la resistencia por aumento de la presión de poros y deformación asociada a la onda sísmica propiamente. Estos efectos pueden llevar al material afectado a causar una falla al cortante y producir en algunos casos la licuación de suelos granulares saturados.

Los principales efectos geológicos asociados al sismo del 23.06.01 estuvieron ligados a fenómenos de remoción de masas y licuación de suelos. Se inventariaron un total de 246 eventos geológicos, los mismos que son descritos en la Tabla 1. A continuación se describe las características de los fenómenos de remoción de masas inventariadas:

- Remoción de masas

La ocurrencia de fenómenos de remoción de masas relacionados con un sismo depende de la severidad de sacudimiento del suelo y de otros factores, tales como el topográfico, geológico e hidrológico. El efecto de un evento sísmico conduce

frecuentemente a la desestabilización de un talud, cuya incidencia aumenta con la severidad del sismo y el hipocentro si se localiza a poca profundidad.

El sismo del 23.06.01 cuyo epicentro se localizó cercano al borde litoral peruano y relativamente a poca profundidad, ocasionó gran cantidad de fenómenos de remoción de masas, como deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas, principalmente en las inmediaciones de los tramos carreteros y zonas aledañas, decreciendo su número y volumen en dirección sur del área epicentral.

La inspección de campo permitió identificar los siguientes eventos de remoción de masas:

- Deslizamientos

Los deslizamientos pueden subdividirse en dos grupos:

a). Deslizamientos cosísmicos: Estos ocurrieron al momento del sismo y tuvieron lugar mayormente a lo largo de la carretera Panamericana Sur y en algunas vías afirmadas de penetración a las zonas andinas (Figura 2). Se inspeccionaron 32 ocurrencias de este tipo de deslizamiento, presentando volúmenes entre 40 a 8000 m³ de material removido, mayormente de naturaleza arenosa, en los siguientes tramos carreteros:

- . Tramo Atico-Ocoña-Camaná: Sector Cerro de Arena, 20 ocurrencias.
- . Tramo La Curva-Cocachacra: 4 ocurrencias.
- . Tramo Pararca – Pausa: 8 ocurrencias.

b). Deslizamientos reactivados: En la región sur del país existe deslizamientos activos cuya dinámica se acelera al producirse un sismo, este fue el caso de 5 deslizamientos reactivados por el sismo del 23.06.01: Pallata (Moquegua), Llojo (Moquegua), Lari (Arequipa), Madrigal (Arequipa) y Maca (Arequipa), Figura 3.



Figura 2. Tramo Atico-Ocoña (secor cerro de Arena). Desplazamientos de aspersiones eolicas un tramo de la Panamericana Sur.



Figura 3. Deslizamientos en el Cerro Llojo – Carumas

- Derrumbes

Este tipo de remoción de masas fue muy frecuente e identificado en gran parte de la región afectada por el sismo, principalmente en los taludes adenaños a las vías terrestres como la Panamericana Sur y carreteras transversales de penetración a la sierra sur del país. La principal característica de las áreas afectadas por derrumbes cosísmicos fue que se produjeron en taludes con pendientes altas y material inconsolidado o rocoso

fracturado. Durante el trabajo de campo se llegó a inventariar 160 derrumbes con volúmenes entre 5 y 7300 m³ de material removido (Figura 4) y los principales tramos de carreteras afectadas fueron:

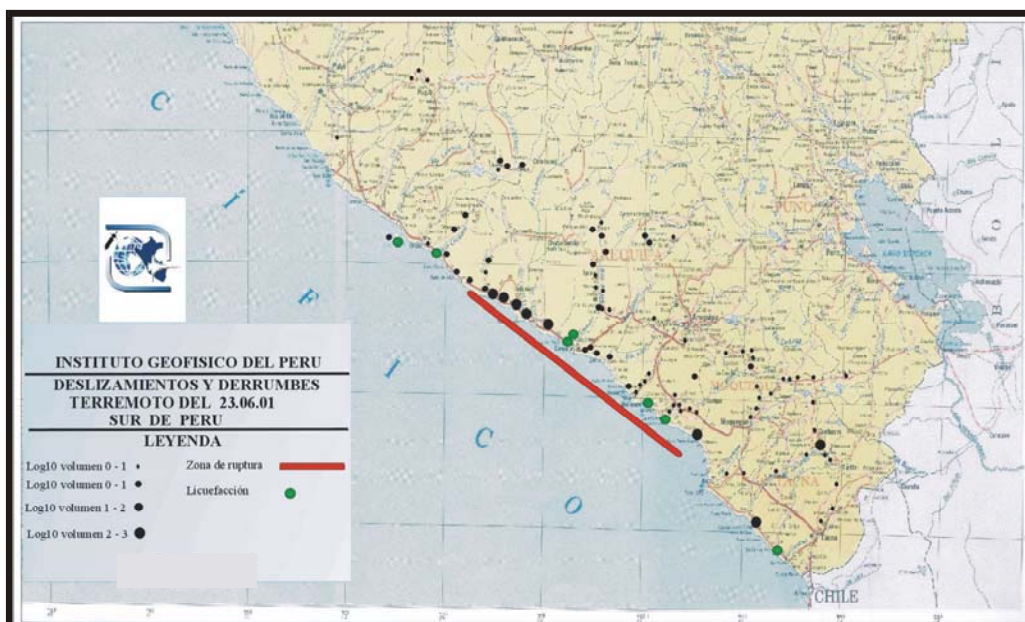


Figura 4. Ubicación de los puntos en donde se han producido deslizamiento y derrumbes debidos al terremoto del 23 de Junio de 2001.

- . Panamericana Sur: Tramo Atico-Camaná, El Fiscal-Moquegua-Desvío Ilo e Ilo-La Yarada.
- . Carretera Corire-Aplao-Chuquibamba-Viraco-Pampacolca.
- . Carretera Arequipa-Puquina-Omate.
- . Carretera Binacional: Tramo Moquegua-Huatire.
- . Carretera Camiara-Toquepala.
- . Carretera Chivay-Pinchollo-Huambo.
- . Carretera Tacna-Tarata-Candarave.
- . Carretera Atico-Caravelí.
- . Carretera Tacna-Miculla-Pachía.

Estas inestabilidades de taludes también están asociadas a modificaciones antrópicas, ligadas a procesos de corte/relleno a lo largo de las vías terrestres mencionadas.

Los resultados muestran que las vías terrestres de la parte sur del país, tanto de primer orden como las de segundo orden son altamente vulnerables a fenómenos de remoción de masas (deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas) ante la ocurrencia de eventos sísmicos, como es el caso del ocurrido el 23 de junio del 2001.

El conocimiento de la situación en la cual se producen los deslizamientos de tierra activados por eventos sísmicos, ha servido de guía un tanto empírica para poder predecir la ocurrencia de deslizamientos. Es lógico pensar que la actividad de un deslizamiento disminuya al aumentar la distancia al epicentro y existe una distancia a partir de la cual estos deslizamientos no ocurrirían de determinado tamaño (Keefer, 1984). En la figura 5, se muestra la relación de los volúmenes desplazados por la acción sísmica versus la distancia al área epicentral, y se puede notar claramente la disminución de los volúmenes cuanto más lejos se produjeron estos fenómenos del epicentro del sismo principal.

- Licuación de suelos

Los fenómenos de licuación consisten en la pérdida rápida de resistencia al esfuerzo cortante, temporal o definitiva. Tal pérdida conduce al colapso o daño severo de cualquier estructura, por ejemplo vial o edificaciones emplazadas sobre material potencialmente licuable. Las dos principales causas a que puede atribuirse esa pérdida de resistencia son: el incremento de los esfuerzos cortantes actuantes, el aumento correspondiente de la presión de poros y el desarrollo rápido de elevadas presiones en el agua intersticial, como consecuencia de un sismo.

Previo al trabajo de campo y teniendo en cuenta la extrema aridez de la región costanera del sur de Perú, la ocurrencia de los fenómenos de licuación de suelos estuvo restringida a aquellas planicies o valles aluviales donde fluyen aguas permanentes; es decir, se consideró los valles de los ríos Yauca, Ocoña, Camaná, Tambo, Osmore, Locumba y Sama, donde efectivamente se comprobó la ocurrencia de este fenómeno en

potentes. Los volcanes de arena tuvieron diámetros de hasta 2.0 m También se midieron fracturas longitudinales a los bancos con eyección de arena (venting fractures) de unos pocos metros de longitud (grietas individuales no mayores de 4 m de longitud), Figura 6.



Figura 6. Imagen del margen izquierdo del río Camana en donde se observa fenómenos de lateral spreading y licuación de suelos arenoso.

Otra área con mayor distribución de evidencias de licuación de suelos, es la llanura deltaica-costera del río Tambo, con eyección de arenas y de lateral spreading, desde las cercanías a Mollendo hasta El Fiscal, y en los tramos: Mollendo - Mejía, Mejía-El Conto, La Curva - El Arenal, y El Arenal - Puente El Fraile.

Los sectores ubicados más al Sur, como las desembocaduras de los ríos Osmore, Locumba y Sama mostraron evidencias de licuación de arenas con volcanes de arena alineados, grietas de ventilación y lateral spreading de pequeñas dimensiones. Los conos de volcanes de arena llegaron a un diámetro máximo de 50 cm y el volumen expulsado también fue mucho menor que en las zonas críticas de Camaná y El Tambo.

Se puede resumir, de manera muy general, que las evidencias de licuación, según su distribución espacial y tamaño, muestran valores máximos en la región de Camaná, para disminuir tanto en frecuencia como en volumen eyectado de arena y agua, hacia el norte y sur de esta localidad.



Figura 7. Volúmenes de arena por efecto de licuación de suelos formados posterior al sismo.

Asimismo, se pudo constatar la ocurrencia de más de una generación de evidencias de licuación, específicamente en el sector de Cerrilos, donde se localizaron conos de arena formados posterior al tsunami ocurrido minutos después del sismo del 23.06.01, esto permite discriminar que estos conos se formaron con alguna de las réplicas, Figura 7.

Agrietamientos de suelo

Los agrietamientos de suelo ocurren como un efecto directo de los esfuerzos inducidos por un sismo en áreas con diversidad de valores de intensidad. Su ocurrencia se observa especialmente, en la corona de taludes de alta pendiente y en los escarpes semi-verticales de terrazas cementadas erosionadas. La magnitud de los agrietamientos depende de la cercanía al epicentro, de las características topográficas y de la estructura geológica de la ladera afectada. Así tenemos, que para el sismo del 23.06.01 se observaron sistemas de agrietamientos de hasta 200 m de longitud con ancho y profundidad variable, presentes a lo largo de los tramos viales inspeccionados. Estos agrietamientos estuvieron asociados a fallas de borde en terraplenes de carretera cuyos trazos se emplazan en laderas empinadas y materiales inconsolidados y/o fracturados. Estos agrietamientos frecuentemente afectaron hasta 1/3 del ancho de la carpeta asfáltica.

La evidencia de inestabilidad del terraplén, que obraron de manera más frecuente en las carreteras, siendo éstas del tipo falla de borde en terraplenes de carretera a falda de relieve. Por otro lado, son muchos los casos donde sólo el borde libre del terraplén de relleno – en sectores donde la carretera corre a flanco de montaña o vertiente – muestra grietas longitudinales de algunas decenas de metros y ocasionalmente alcanzaron el centenar de metros. Los sectores con fallas de borde más pronunciados están entre Atico y Pescadores (km 727-734 de la Panamericana Sur), donde la carretera está construida sobre aspersiones eólicas no consolidadas adosadas a vertientes de unos 30° de pendiente, Figura 8.



Figura 8. Tramo Atico-Pescadores, Panamericana Sur – Sector Cerro de Arena . Agrietamientos en la carpeta asfáltica por falla del borde lateral en zonas de aspersiones eólicas.

Asimismo, otros tipos de agrietamientos fueron producidos por fallas en los terraplenes de relleno y en este caso, de las vías inspeccionadas, no sólo fallaron ambos bordes libres por agrietamiento longitudinal, sino que también la carpeta asfáltica se vió afectada transversalmente, que en algunos casos originaron desniveles importantes que obstaculizaron el tránsito por estas vías. Las vías terrestres afectadas por este tipo de agrietamientos son la carretera Ilo-Panamericana Sur y la carretera costanera Ilo - La Yarada.

En general, se inventarió un total de 27 ocurrencias en los siguientes tramos viales:

- . Tramo Atico – Ocoña: 12 ocurrencias. Dimensiones máximas: 250 m longitud x 10 cm de ancho y 1.5 m de profundidad.
- . Tramo Puente Camaná – Cerrillos: 4 ocurrencias. Dimensiones máximas: 5.0 m largo x 0.10 m ancho x 0.40 m profundidad.
- . Tramo Arequipa- Yura: 2 ocurrencias. Dimensiones máximas: 1.0 m largo x 0.20 m ancho x .60 m profundidad.
- . Tramo Ite – La Yarada: 3 ocurrencias. Dimensiones máximas: 1.50 m largo x 0.20 m ancho x 0.40 m profundidad.
- . Campamento Minero Toquepala: 3 ocurrencias. Dimensiones máximas: 7.0 m largo x 0.20 m ancho x 0.30 m profundidad
- . Represa Quebrada Honda: 2 ocurrencias. Dimensiones máximas: 2.0 m largo x 0.10 m ancho x 0.10 m profundidad.

Otros efectos geológicos

En este ítem se describe, en forma breve, dos efectos geológicos causados indirectamente por el terremoto del 23 de junio del 2001, como fueron el tsunami que afectó la localidad de Camaná y la actividad fumarólica de los volcanes Misti y Sara Sara, puesto que en el presente trabajo no se trato de estudiar específicamente estos fenómenos, que fueron encargados a otras misiones de investigación:

Tsunami de Camaná

A consecuencia del sismo del 23.06.01 se produjo un tsunami que afectó severamente a las poblaciones costeras de Ocoña, Camaná, Quilca y Matarani, ubicadas en el litoral sur del país. En el valle de Camaná, el tsunami penetró más de un kilómetro causando destrucción y muerte, Figura 9. Tanto al norte como al sur de Matarani, la altura del tsunami no sobrepasó el nivel de pleamar. Cabe mencionar, que el tsunami impacto la costa al momento en que la marea alcanzaba su nivel más bajo (Dirección de Hidrografía y Navegación, 2001).



Figura 9. Balneario de La Punta, Camaná. Zona de destrucción por el tsunami del 23 de Junio de 2001.

Actividad volcánica

En la inspección de campo realizada se constató un incremento de la actividad de los volcanes Misti y Sara Sara, siendo esta principalmente de tipo fumarólica. Asimismo, las fuentes termales de origen volcánico, aledañas a estos centros volcánicos y otros activos localizados en las zonas altas de Arequipa, fueron alteradas en sus sistemas de circulación de aguas y la temperatura de las mismas, tal es el caso de las siguientes fuentes termales, Figura 10:

- . Valle del Colca: Sibayo, La Calera y Colca Lodge
- . Sillapaca y Rumitía
- . Sara Sara

Esto conlleva a inferir que se produjeron fracturamientos a causa del sismo que alteraron el caudal y afloramiento de aguas termales en las zonas mencionadas.

Conclusiones

Los principales efectos geológicos asociados al sismo del 23.06.01 estuvieron ligados a fenómenos de remoción de masas y licuación de suelos. Se inventariaron 246 ocurrencias de eventos geológicos.

Se inspeccionaron 32 ocurrencias de deslizamientos cosísmicos y reactivados, con volúmenes entre 40 a 8000 m³ de material removido, mayormente de naturaleza arenosa.



Figura 10. Vista panorámica del poblado de Sibayo, valle del Colca. Parte superior derecha se observa los baños termales El Inca de Callalli que redujo su caudal de agua por efecto del sismo del 23 de Junio de 2001.

En la región sur del país existe deslizamientos activos cuya dinámica fue acelerada al producirse el sismo del 23.06.01, este fue el caso de 5 deslizamientos reactivados: Pallata, Llojo, Lari, Madrigal y Maca.

Las principales característica de las áreas afectadas por derrumbes cosísmicos fueron los que se produjeron en taludes con pendientes altas y material inconsolidado o rocoso fracturado. Se inventariaron 160 derrumbes con volúmenes entre 5 y 7300 m³ de material removido.

Los resultados muestran que las vías terrestres, tanto de primer como de segundo orden, de la parte sur del país, son altamente vulnerables a fenómenos de remoción de masas: deslizamientos y derrumbes, ante la ocurrencia de eventos sísmicos, como es el caso del ocurrido el 23.06.01.

La zona con mayor evidencia de licuación, fue a lo largo del río Camaná y la franja costera entre Mejía y La Punta de Bombón. Otra área con mayor distribución de

evidencias de licuación de suelos corresponde a la llanura deltaica-costera del río Tambo, entre Punta de Bombón y Cocachacra, además se observaron evidencias en las inmediaciones de los ríos Locumba y Sama con menor área de afectación.

Las evidencias de licuación, según su distribución espacial y tamaño, muestran valores máximos en la región de Camaná y disminuyen en frecuencia y en volumen de arena y agua eyectada, tanto hacia el norte como hacia el sur.

Se constató la ocurrencia de más de una generación de evidencias de licuación, específicamente en el sector Cerrillos-Camaná, donde se localizaron conos de arena formados posterior al tsunami; esto permite discriminar que esta generación de conos se formó luego de alguna de las réplicas.

Se inspeccionaron sistemas de agrietamientos de hasta 200 m de longitud con ancho y profundidad variable e identificados a lo largo de los tramos viales inspeccionados. Estos agrietamientos estuvieron asociados a fallas de borde en terraplenes de carretera cuyos trazos se emplazan en laderas empinadas y materiales inconsolidados y/o fracturados. Estos agrietamientos frecuentemente afectaron hasta 1/3 del ancho de la carpeta asfáltica. En total, se inventariaron 27 ocurrencias de agrietamientos en el área estudiada.

Otros efectos geológicos causados indirectamente por el evento sísmico del 23.06.01, fueron el tsunami que afectó principalmente la localidad de Camaná; y la actividad fumarólica de los volcanes Misti y Sara Sara.

Agradecimientos

La Misión del IGP agradece a las autoridades de todos los poblados inspeccionados, por las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, nuestro agradecimiento a los Sres. Oswaldo Velásquez y Paul Vargas por la elaboración de las figuras que se incluyen en el presente trabajo. Al Dr. Leonidas Ocola, Director del IGP, por la supervisión de este trabajo.

Bibliografía

KEEFER, D. K. (1984) Landslides caused by earthquakes. Geological Society of America Bulletin, Vol. 95. USA.

MONGE, F. (1997) Efectos geológicos del sismo de Nazca del 12.11.96. Inf. Interno Instituto Geofísico del Perú. Lima.

TAVERA, et al. (2001) The Arequipa (Peru) Earthquake of June 23, 2001. Journal of seismology (in press).

Nombre de archivo: geologia1
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: EFECTOS GEOLOGICOS ASOCIADOS AL SISMO DEL 23 DE JUNIO DEL 2001 EN EL SUR DEL PERU
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 02:57 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 02:57 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 16 minutos
Impreso el: 08/08/2008 12:53 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 16
Número de palabras: 3,355 (aprox.)
Número de caracteres: 19,124 (aprox.)

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

¹Franck Audemard, ²Juan Carlos Gómez y ²José Quijano

¹*Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS, Venezuela*

²*Procesos Internos de la Tierra, Instituto Geofísico del Perú*

Informe de Misión

A solicitud del Ministerio de Ciencia y Tecnología –MCT- de Venezuela, en colaboración técnica para el Gobierno del Perú, y en particular con el Instituto Geofísico del Perú, un representante de Funvisis, en la persona del Dr. Franck Audemard, realizó una misión al Perú entre los días 02 y 08 de julio del 2001 para evaluar los efectos geológicos inducidos por el sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001 y su secuencia de “réplicas”, que afectó una vasta región del sur del Perú. El presente informe resume las observaciones de campo realizadas entre el 04 y 07 de julio del 2001.

Observaciones Geológicas de Campo

En función de su tipología, las observaciones geológicas de campo van a ser agrupadas en dos grandes entidades: inestabilidades gravitatorias y licuación de suelos; ambos siendo efectos inducidos por la sollicitud dinámica introducida por el sismo de Arequipa del 23 de junio del 2001 y de sus “réplicas” más importantes.

Inestabilidades gravitatorias

En la región inspeccionada por esta comisión, esencialmente a lo largo de la costa pacífica peruana, entre Pisco al norte y La Yarada al sur (cerca de Tacna, en proximidad a la frontera con Chile; Figura 1), los problemas de inestabilidad observados están esencialmente asociados a modificaciones antrópicas; a excepción de caída o desprendimiento de bloques en acantilados costeros de unos 15 a 20 m de alto, en las localidades de Matarani (Puerto mercantil ubicado en Islay, próximo a Mollendo) y acantilados marinos fósiles entre Mollendo y Mejía. En ocasiones, los bloques desprendidos son de varios metros de diámetro y están compuestos de secuencias

aluviales conglomeráticas cuaternarias. El desprendimiento de estos bloques está controlado por grietas subparalelas a la pared del acantilado, ocurriendo repteo.

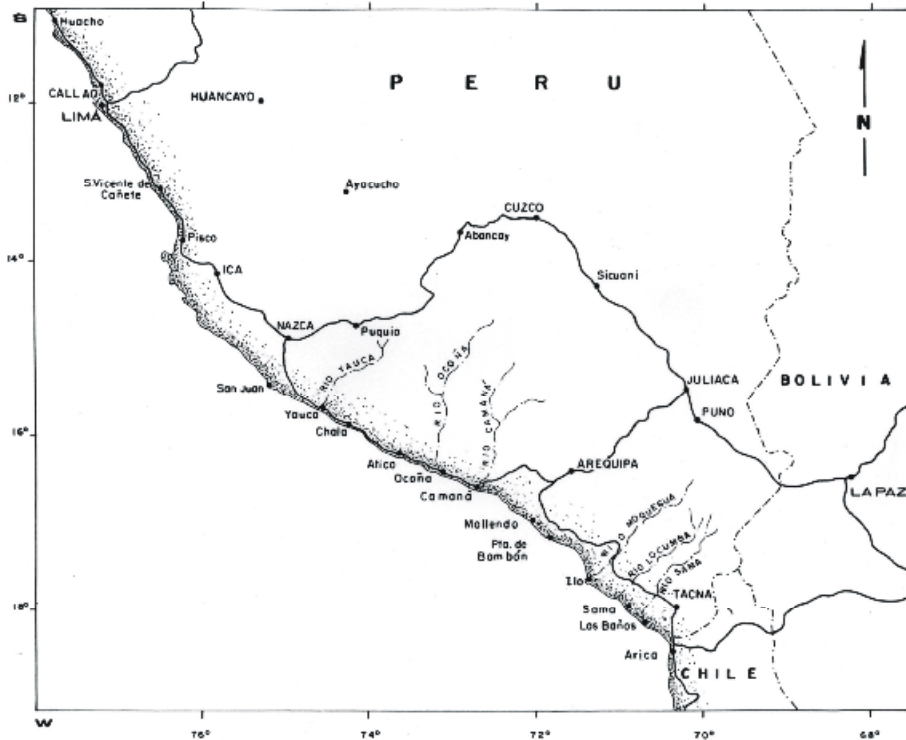


Figura 1.- Mapa simplificado de la región sur peruana, indicando las localidades principales mencionadas en este informe.

Las restantes inestabilidades gravitatorias observadas están todas ligadas a procesos de corte y/o relleno, a lo largo de la vialidad regional, siendo los sectores más afectados los que conectan Atico y Camaná (severamente afectado y con reincidencia de restricción de paso posterior a cada “réplica” importante) y El Fiscal-Montalvo (Moquegua; en tramos en pendiente a nivel del cruce de grandes valles)-bifurcación a Ilo, entre los kilómetros 1109 y 1177 de la Panamericana sur. De las diferentes expresiones de inestabilidad gravitatorias identificadas, sólo el lateral spreading requiere de agua, indicando que los procesos de inestabilidad están claramente condicionados por lo árido del clima costero sur peruano. Hemos agrupado las inestabilidades en cinco grandes grupos:

Falla de borde en terraplenes de carretera a falda de relieve

Es probablemente la evidencia de inestabilidad del terraplén de las vialidades revisadas más frecuentemente observada (ver Tabla 1). Son muchos los casos donde sólo el borde libre del terraplén de relleno –en sectores donde la carretera corre a flanco de montaña o vertiente- muestra grietas longitudinales de algunas decenas de metros y ocasionalmente pueden alcanzar el centenar de metros. La afectación de la carpeta asfáltica es variable, pero nunca supera más de la mitad de la vía. Los sectores con fallas de borde más pronunciados son entre Atico y Pescadores (km 727-734 de Panamericana sur), donde la carretera está construida sobre aspersiones eólicas no consolidadas adosadas a vertientes de unos 30° de pendiente (Foto 1). Los sitios afectados por este sismo y sus “réplicas” coinciden con curvas en entrantes del relieve, donde habían pequeñas obras/muros de contención, construidos para retener las zonas en relleno del terraplén de la Panamericana sur sobre dichos depósitos eólicos (arenas finas bien seleccionadas, no cementadas; Foto 2). En consecuencia, son sitios con historial de problemas de inestabilidad recurrente. Otro sector con problemas similares y afectación hasta de media calzada por tracción o deslizamiento del canal de circulación en relleno, corresponde a los tramos viales con pendiente sobre las vertientes de grandes valles



Foto 1.- Caída de depósitos eólicos en cortes de la carretera Panamericana sur, entre Atico y Ocoña, en fase de remoción después de sismo secundario (05/07/2001). Obsérvese también falla del muro de contención.

encajados (de profunda incisión) entre El Fiscal y Montalvo (km 1109-1130), siendo estas inestabilidades independientes de la sustrato geológico (rocas volcánicas del Grupo Toquepala del Cretáceo-Terciario inferior; Formación Moquegua superior del Terciario superior o depósitos aluviales conglomeráticos cuaternarios).



Foto 2.- Colapso de la calzada por falla del terraplén de relleno de la carretera Panamericana sur, afectando muros de contención, en sectores de arenas eólicas no consolidadas.

Falla de terraplenes de relleno

Es frecuente en ingeniería vial utilizar la construcción de rellenos de cierta potencia entre dos interfluvios para mantener la rasante. En este caso, no sólo fallan ambos bordes libres por agrietamiento longitudinal, sino que también la carpeta asfáltica se ve afectada transversalmente por asentamiento en ocurrencia de sismos de suficiente energía y duración; y ocasionalmente puede ocurrir desniveles importantes que conlleven a la obstrucción del libre tránsito. Aún no hay casos en la vialidad inspeccionada tan avanzados, pero no está ecenta de que ocurra en caso de nuevas “réplicas”. Las lluvias no serán un factor condicionante negativo que acelere el proceso debido a la aridez de la zona costera sur peruana.

Los sectores más afectados por este tipo de inestabilidad corresponden a la carretera que conecta Ilo con la Panamericana sur, entre los km 30 y 34 (medidos a

partir de Ilo) y en la carretera costanera Ilo-Ite-La Yarada (kms 27-32, 46-48, 49-50 y 70-75; medidos igualmente desde Ilo).

Desprendimiento de materiales no consolidados

El desprendimiento de materiales no consolidados, tales como escombros (provenientes de conos coluviales de pie de ladera) o arenas no consolidadas (Foto 1), son poco frecuentes en comparación con las caídas de bloques controlados por planos de discontinuidades (diaclasas, fracturas o fallas; Tabla 1).

Los sectores afectados por la caída de arenas sueltas son raros, pero pueden ser fuertemente molestos por la facilidad con que colapsan y obstruyen la vialidad, aún durante la ocurrencia de “réplicas” (apreciado en ocurrencia de una réplica ocurrida el jueves 05/07/2001 en horas de la mañana; Foto 1). El sector más representativo de este proceso está localizado entre los km 727 y 734, entre Atico y el valle de la quebrada Pescadores. Este proceso coincide espacialmente con el colapso/la falla de los muros de contención del terraplén de la carretera, logrando bloquear totalmente el paso, porque el canal más cercano a la vertiente se vio bloqueado por la caída de las arenas sueltas mientras el externo falló por colapso del material de relleno del terraplén (Fotos 1 y 2). La caída de aspersiones eólicas también se observó, aunque sin afectar la vialidad, entre Tanaca y Chala; siendo esta la evidencia más septentrional de inestabilidad observada.

Entre Atico y quebrada de Pescadores, también ocurrió el colapso ladera abajo de escombros sobre la carpeta asfáltica, provenientes de conos coluviales en laderas de pendientes próximas a 30°, cortados por la vía Panamericana sur, entre los km 712-726. Estos fueron desestabilizados (estables en condiciones estáticas más no en condiciones dinámicas) hasta por las réplicas de mayor magnitud (generalmente superior a m_b 5, según cálculo preliminar de magnitud del IGP). La fracción gruesa de estos depósitos coluviales está compuesta por fragmentos angulosos de hasta algunas decenas de centímetros de largo, cuyo material parental es el Complejo Igneo-metamórfico de la Costa de edad precámbrico-paleozóico inferior.

Aunque mucho menos frecuentes, también se observó caídas de escombros a partir de formaciones aluviales conglomeráticas cuaternarias y de la Formación Moquegua (Terciario superior), entre Montalvo y la bifurcación a Ilo (km 1148-1177),

siendo los materiales desprendidos cantos redondeados en el caso de los conglomerados cuaternarios.

Desprendimiento de bloques (deslizamientos en cuña) en sectores en corte

Este proceso de inestabilidad en los sectores en corte de la carretera Panamericana sur es muy frecuente y generalmente ocurre en materiales muy competentes del Complejo Igneo-metamórfico de la Costa de edad precámbrico-paleozóico inferior; complejo de amplia distribución a lo largo de la costa sur del Perú (Tabla 1). Estos materiales geológicos se desprenden en bloques como consecuencia de una fracturación muy densa según varias orientaciones, que definen cuñas que deslizan o se desprenden. La detección de este proceso fue posible desde los km 692-694, entre Chala y Atico, hasta cerca de la bifurcación hacia Ilo (km 1177), donde abandonamos la carretera Panamericana sur definitivamente.

Falla en terraplenes de carretera en llanuras aluviales activas (lateral spreading)

El traccionamiento perpendicular del terraplén de la vía, asentado sobre planicies aluviales activas, es casi característico y único del valle aluvial del Río Tambo (a lo largo de la vialidad costanera Mollendo-Mejía-La Curva y la carretera La Curva-Cocachacra-El Fiscal), donde pudieron ser observados sistemas de grietas longitudinales de varias decenas –y hasta de algunos centenares- de metros de longitud; siendo el grado de afectación de la carpeta asfáltica variable. Generalmente, este agrietamiento longitudinal no afecta la carpeta asfáltica y corre a lo largo de la interface asfalto-relleno o corta y deprime muy poco la calzada. Es frecuente que afecte no más de un canal de circulación, cuando el proceso de desparramamiento lateral (lateral spreading) es algo más marcado. Sin embargo, los daños más severos ocurren por largos tramos de vialidad, donde un canal de riego, en tierra y en uso, corre paralelo y al lado del terraplén de la carretera (sector El Boquerón, entre La Curva y El Arenal, entre Cocachacra y El Fiscal), debido al efecto de borde libre que imprime el canal sobre el terraplén de la vía. Ocasional y localmente, este agrietamiento puede ser más marcado y viene acompañado por colapsos de la calzada bajo la forma de “grabenos” angostos, pero de hasta más de un centenar de metros de extensión (sector El Boquerón, entre El Conto y La Curva; Foto 3). Es obvio que el movimiento sufrido por estos terraplenes viales es producto de la licuación de arenas ocurrida a poca profundidad, dentro de los depósitos aluviales saturados por el Río Tambo y el sistema de irrigación artificial; lo

cual permite el movimiento lateral, aunque de poca amplitud, o el traccionamiento aplicado perpendicularmente al terraplén. La evidencia más clara de este proceso (lateral spreading) se aprecia en la motobomba (Golden Playa Discoteca; ya finalizada la Reserva Natural de Aves de Mejía), donde el terraplén de una vía en tierra colapsó a nivel de su cruce con un canal de agua relativamente ancho (de más de 2 m).



Foto 3.- Agrietamiento de la calzada por colapso del terraplén de la carretera por lateral spread, inducido por la presencia de un canal de riego en tierra ubicado a la izquierda de la foto (al oeste; al pie de la arboleda). El colapso ocurre bajo la forma de “micro-grabenés” subparalelos al eje vial.

No obstante, también se observó este proceso en el terraplén de tierra de la carretera Panamericana sur al cruzar el valle del Río Osmore, en proximidad a Montalvo, y en la carretera costanera Ilo-La Yarada, al cruzar la llanura aluvial del Río Locumba, puesto que terraplenes en tierra de arrozales desarrollados en dicha planicie están agrietados longitudinalmente. El colapso de los terraplenes para control de inundaciones del Río Camaná en dos localidades también se vieron afectados por la ocurrencia de lateral spreading en asociación con licuación de suelos.

Licuación de suelos

Tal como se previó antes de iniciar la misión de campo, en función de la extrema aridez de la región costanera sur peruana, la ocurrencia de los fenómenos de licuación

de suelos estuvo restringida a aquellas planicies o valles aluviales donde hay agua en permanencia. Es decir, a lo largo de los ríos Yauca, Ocoña (?; no verificado por cruzarlo de noche) Camaná, Tambo, Osmore, Locumba y Sama.

El proceso de licuación de suelos se expresó en muchos sitios, tal como lo discutimos previamente, por el agrietamiento del terreno sobre decenas de metros de longitud, como consecuencia de lateral spreading (aparte B.1.5 del presente informe). Fue muy frecuente el no observar ninguna evidencia de eyección de arena y agua a lo largo de las grietas, pero varios sitios fueron claves para mostrar la asociación de ambos procesos (agrietamiento + eyección de arena bajo la forma de volcanes de arena), tal como: (a)- en la extremidad septentrional de la “Urbanización Arizona”, (b)- en la motobomba (Golden Playa Discoteca, entre Mejía y El Conto, al final de la Reserva Natural de Aves de Mejía) y (c)- en el campo de fútbol de La Curva (salida en dirección a Arenal); todas estas localidades se localizan entre Mollendo y Cocachacra, en los depósitos aluviales y/o deltáico-costeros del Río Tambo. También fue observado en los bancos de arena dentro de los cursos de los distintos ríos con agua permanente.

La primera localidad en nuestro recorrido hacia el sur con evidencias claras de licuación fue el cauce del Río Yauca (km 598 de la Panamericana sur), a ambos lados del estribo SE. Se apreciaron volcanes de diámetro ≤ 1.5 m (Foto 4), de arena fina, siendo la moda del diámetro generalmente inferior a los 40 cm. También se observaron algunos “venting dikes” de menos de 1 m de largo. Algunos volcanes de arena se emplazan sobre grietas abiertas en bancos de arena de menos de unos 50 cm por encima del nivel de agua en el curso del río, estando las grietas orientadas paralelas al borde de los bancos; y por ende al curso del río (NE-SW). El tablero y la baranda del lado sur, al nivel de la primera pila a partir del estribo NW del puente, están hundidos en unas decenas de cm. Esto podría deberse a pérdida de capacidad portante del suelo por licuación, a nivel de la fundación de dicha pila.

No se pudo verificar la ocurrencia de licuación en el río Ocoña por haberlo cruzado después del atardecer, pero el río es ancho y caudaloso, lo cual hace presumir que sus depósitos arenosos saturados pueden haber licuado en ocurrencia del sismo principal.

Foto 4.- Volcanes de arena en la vega del Río Yauca, a nivel del puente sobre el mismo. Las huellas de paso y botella pueden usarse como escala.

Las vegas y cauce del Río Camaná mostraron numerosas evidencias de licuación, logrando inclusive afectar el terraplén de la margen izquierda (para control de inundaciones de la llanura aluvial cultivada) en dos localidades. En el curso del río, las arenas muy finas a intermedias licuaron en aquellos bancos de arena no muy potentes (dominando el agua en no más de 50-60 cm). Los volcanes de arena aislados no fueron mayores a 1,60-2,0 m en diámetro. En ocasiones, los volcanes de arena se organizaban en sucesiones de “bocas” (cráteres), alineados o no a lo largo de grietas (Foto 5). También, se midieron fracturas longitudinales a los bancos con eyección de arena (venting fractures) de unos pocos metros de longitud (grietas individuales no mayores a los 4 m y varias grietas dispuestas en echelon). La localidad con las grietas más grandes, sólo mostró tres grietas individuales (Foto 6). Los dos sitios de colapso del terraplén fueron, uno por efecto de borde libre hacia ambos lados, coincidiendo con bancos de arena en el curso del río; y el segundo por lateral spread, hundiéndose la vía en el tope del terraplén y abombándose el piedraplén de protección del terraplén a nivel de un meandro del Río Camaná (Foto 7). En esta segunda localidad colapsada, se observó un “venting fracture” de más de 1 m de longitud al pie del terraplén, que eyectó mucha arena y el agua aún permanecía empozada el 06 de julio (Foto 8). La arena y agua eyectada fluyó por más de 15 m de longitud a favor de una pendiente muy suave. Más hacia el mar, se observó una grieta de eyección de unos 30 m de largo, paralela y próxima (a no más de 5 m) del pie del terraplén y dentro de las zonas cultivadas (Foto 9;

al límite del área afectada por el tsunami, el cual penetró en el orden de unos 500 m tierra adentro, en las zonas bajas de la llanura deltáica del río Camaná). Es en esta localidad donde se aprecian las evidencias de licuación más grandes y con mayor concentración.



Foto 5.- Volcanes de arena alineados en la vega del Río Camaná, cerca de la desembocadura del río (escala = 1m).

INTENSIDADES MAROSISMICAS

Nombre de archivo: SISM
Directorio: C:\WINDOWS\Escritorio
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 08/08/2008 12:35 A.M.
Cambio número: 8
Guardado el: 08/08/2008 02:28 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 12 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:29 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 1
Número de palabras: 9 (aprox.)
Número de caracteres: 53 (aprox.)

**Intensidades Macrosismicas en las Areas Urbanas de las Ciudades de
Arequipa, Moquegua y Tacna**

**Localidades de Corire, Aplao, Chuquibamba, Mollendo, Punta de Bombon
Departamento de Arequipa**

**Ilo
Departamento de Moquegua**

Ocasionados por el Sismo de Arequipa del 23 de Junio de 2001

*Efrain Fernandez, Consuelo Agüero
Freddy Ccallo, Hernan Heras, Julia Carpio y Abel Julca*

Centro Nacional de Datos Geofísicos

Resumen

En este informe se presenta los resultados obtenidos de la evaluación de las Intensidades Macrosísmicas en la escala MSK, producidas por el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 en las áreas urbanas de las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, además de las localidades de Corire, Chuqibamba, Mollendo, Punta de Bombon (Arequipa) e Ilo en Moquegua. Con la información disponible se ha elaborado mapas de intensidades máximas, antigüedad de viviendas, niveles de daño y diferentes cuadros estadísticos en función del tipo de vivienda evaluada en cada ciudad y localidad. Los resultados indican que la intensidad máxima producida por el terremoto de Arequipa fue de 6 a 7 MSK, la misma que afectó principalmente a viviendas antiguas o construidas con material precario en áreas geológicamente inestables.

Abstract

This report presents the macroseismic intensities, in the MSK scale, produced by the June 23, 2001 Arequipa earthquake in the urban areas of the cities of Arequipa, Moquegua and Tacna, as well as in the provinces of Corire, Chuquibamba, Mollendo and Punta Bombon in Arequipa, and Ilo in Moquegua. We have made maps of maximum intensities, home antiquity, and damage levels, as well as statistical charts based on the type of home evaluated in each city and province. Results indicate that the maximum intensity produced by the Arequipa earthquake was between 6 and 7 MSK and mainly affected old homes or homes built with fragile material in geologically unstable areas.

Introducción

El 23 de Junio de 2001, a horas 20:33 GMT, la región sur del Perú fue afectada por un sismo de magnitud $M_w=8.2$ causando daños en un área que incluye a los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna, Ayacucho y a las ciudades de Arica e Iquique en Chile. Según reportes del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), el terremoto ocasionó la muerte a 74 personas, 64 desaparecidos, 2689 heridos y 217495 damnificados en toda la región sur del país. Asimismo, el número total de viviendas afectadas fue de 35601 y destruidas del orden de 17584. La distribución general por departamento es como sigue:

- Arequipa: 35 muertos, 64 desaparecidos, 1993 heridos y 83721 damnificados.
Viviendas afectadas, 14179 y destruidas 9079.
- Moquegua: 22 muertos, 277 heridos, 57467 damnificados.
Viviendas afectadas, 4062 y destruidas 2738.
- Tacna: 14 muertos, 363 heridos y 74109 damnificados.
Viviendas afectadas, 16090 y destruidas 5396.
- Ayacucho: 3 muertos, 56 heridos y 2198 damnificados.
Viviendas afectadas 1270 y destruidas 371.

Al día siguiente de ocurrido el sismo, el Centro Nacional de Datos Geofísicos (CNDG) del Instituto Geofísico del Perú, preparó un programa de estudios a desarrollarse en la región sur para realizar observaciones y evaluaciones de los daños ocasionados por el sismo, así como determinar el grado del nivel de sacudimiento del suelo basándose en la escala sísmica de intensidades MSK-64, versión adaptada para su uso en el Perú por Ocola (1979). Este programa consideraba a las áreas urbanas de las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, además de algunas localidades como Mollendo, Punta de Bombón, Corire, Aplao y Chuquibamba en el departamento de Arequipa e Ilo en Moquegua.

En todos los casos; es decir, para cada ciudad o localidad, el estudio fue realizado en dos etapas. La primera considera el trabajo netamente de campo y que considera la toma de datos en periodos de tiempo de 2 a 4 días. Previamente, fue necesario disponer de los planos catastrales de cada ciudad o localidad sobre las cuales se dispuso un cuadrillado para determinar el número de muestras válida en cada caso. En general, los formularios utilizados corresponden a los “Formatos de Encuesta de Intensidades” y “Efectos en Construcciones”, las mismas que fueron utilizadas para evaluar las intensidades del terremoto de Nazca de Noviembre de 1996 (Ocola, 1996). En una segunda etapa, se procedió a la interpretación de la información obtenida utilizando la escala MSK. Los resultados se presentan en una serie de Mapas (intensidades macrosísmicas, antigüedad de viviendas y niveles de daño) y cuadros estadísticos para cada ciudad o localidad.

Para la correcta interpretación de los resultados obtenidos en este estudio, inicialmente se realiza una descripción detallada de la metodología seguida para el uso e interpretación de la escala MSK.

Metodología para la Evaluación de Intensidades Macrosísmicas: Escala MSK

La intensidad es una medida subjetiva y cualitativa de los efectos causados por el sismo y tiene como propósito cuantificar el grado del nivel de sacudimiento del suelo por acción del sismo en un lugar determinado de la superficie terrestre, así como evaluar su atenuación con la distancia. La intensidad de un sismo es evaluada a partir de los efectos que este produce en superficie y en las estructuras, así como con el impacto y conducta de las personas durante y después del mismo. También es frecuente considerar el estado de los objetos dentro de las viviendas y algunas veces el comportamiento de los animales.

Entre las escalas más frecuentes para evaluar el grado de intensidad en uno o varios puntos, es la conocida como Escala de Mercalli Modificada. Esta escala está dividida en 12 grados y en cada uno de ellos se realiza una descripción de los daños que pudiera haber causado el sismo. En general, se asume que una intensidad de grado V considera daños y efectos en superficie. Otra escala de uso general en Europa es la conocida como MSK-64, la misma que a diferencia de la Mercalli Modificada, considera una descripción más detallada de los daños causados por el terremoto en superficie y estructuras. En esta escala se clasifican a las viviendas en varios tipos dependiendo del material con el cual fue construida, su antigüedad, además de las dimensiones de las fisuras y otros daños en las estructuras, así como el tipo de suelo.

La información a utilizarse para la evaluación de las intensidades se obtiene en una serie de formularios con preguntas especialmente elaboradas para tener una idea lo más cercana posible de lo ocurrido durante el sismo y de sus efectos en las construcciones y medio ambiente. Para el terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001, se han utilizado una serie de tres formularios que considera las intensidades, los efectos en las construcciones y en los suelos. Los datos fueron interpretados utilizando la escala MSK, versión adaptada para uso en el Perú por Ocola (1979).

Escala de Intensidades MSK

La escala sísmica de intensidades MSK fue propuesta en 1964 por S. V. Medvedev, W. Sponheuer y V. Karnik para su uso en Europa; sin embargo, hoy en día

su uso se ha extendido en todo el mundo. En Perú, la escala MSK fue utilizada por vez primera por investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos para evaluar los efectos causados por el terremoto de Lima del 3 de Octubre de 1974 (7.8 Mw). Posteriormente, a fin de evaluar los daños y efectos del terremoto de Arequipa del 16 de Febrero de 1979 (6.2 mb), Ocola (1979) adapta la escala MSK para su aplicación directa en el Perú considerando los diferentes tipos de construcciones característicos del país. Esta escala considera los diferentes grados de intensidad observada, los daños y efectos en construcciones dependiendo de su tipo y los efectos del mismo en cada tipo de suelo.

Tipos de Construcción

De acuerdo a la nueva versión de la escala MSK (Ocola, 1979), en Perú las construcciones pueden ser clasificadas en tres tipos:

Tipo A. Se considera a las construcciones de adobe, ladrillos secados al sol, tapial, bloques pequeños de piedra, mortero de tierra, barro, cemento pobre, cal y arena. Por lo general, todas estas construcciones tienen techos livianos y se caracterizan por ser de muy débil sismo-resistencia.

Tipo B. Agrupa a las casas ordinarias de ladrillo con mortero de cemento y arena (sin vigas ni columnas de concreto). Además, casas de adobe secado al sol, adobe con columnas de concreto o madera pero sin vigas collarín o amarre mortero de barro. Asimismo, dentro de este tipo se considera a las casonas de ladrillo o sillar con bóvedas, construcciones hechas de grandes bloques y paneles sin vigas o columnas de concreto, construcciones de piedra natural cortada con mortero de cemento y arena (albañilería).

Tipo C. Dentro de este tipo se encuentran las construcciones con muros de cualquier material, con mortero de cemento y arena, reforzada con marcos de concreto armado, todas con techos rígidos y pesados. Asimismo, se considera a las casas de madera bien diseñadas. En general, estas construcciones son casi sismo-resistentes.

Términos de Cantidad

El uso de términos cuantitativos como “*poco*”, “*mucho*” y “*mayoría*” provee un elemento estadístico importante dentro de la escala MSK. Definir estos términos

numéricamente no es fácil, razón por la cual en la escala MSK son definidos en términos de porcentaje:

Algunos, pocos o muy pocos	= 5%
Mucho o muchos	= 50%
La mayor parte o la mayoría	= 75%

Efectos que definen el Grado de Intensidad

La escala de intensidad consiste de una serie de descripciones de los efectos que causa un sismo sobre las construcciones y objetos que se encuentran en un ambiente cotidiano, los mismos que pueden ser considerados como sensores y su respuesta a los efectos ocasionados por los sismos se usa para medir el grado del nivel de sacudimiento del suelo. En el caso de las viviendas, la respuesta al sacudimiento del suelo se traduce en grados de daño, por consiguiente las asume como de buena calidad o sismo-resistentes a las que no son afectadas por el sismo y como de baja calidad a las que resultan parcial o totalmente destruidas. El uso de esta información es de gran ventaja porque no se requiere de instrumentos especiales para medir el nivel de sacudimiento del suelo. En general, los efectos medidos y considerados en la escala MSK son:

- Efectos en las personas y grado de percepción.
- Efectos en las construcciones.
- Efectos sobre el terreno y cambios advertidos en la naturaleza.

Clasificación de los Daños en Construcciones

Por lo general, los efectos en cualquier tipo de construcción se traducen en grados de daño; por lo que, la escala de intensidades MSK considera y define cinco grados o niveles de daño, tal como se ilustra en la Tabla 1. Asimismo, con el propósito de uniformizar criterios y basándose en el grado o nivel de daño en construcciones, Ocola (1979) propuso una tabla de valores que permiten cuantificar los diferentes niveles de daño en función de la longitud y tipo de las grietas producidas por el sismo (Tabla 2a,b). Se considera como “fisura” a la resquebrajadura del revestimiento, estuque o revoque que no atraviesa el muro y “grieta” a la que atraviesa de un lado a otro al muro. Para considerarse daño significativo igual o mayor al grado uno, tanto de grietas

como de fisuras, estas deben tener longitudes mayores de 1 m. En general y según la Tabla 2, las construcciones con niveles de daño igual o mayor a 3⁺ no son reparables.

Grados de Intensidad MSK-64

Grado 1. Imperceptible

- a). La intensidad de la vibración está bajo el límite de perceptibilidad humana; siendo el sismo detectado únicamente con el uso de sismógrafos.
- b). (No daño).
- c). (No efectos).

Grado 2. Apenas perceptible (muy leve)

- a). La vibración es sentida solo por personas en reposo dentro de las casas y especialmente por aquellas que se encuentran en pisos superiores.
- b). (No daño).
- c). (No efectos).

Grado 3. Débil, Observado solo parcialmente

- a). Sentido por pocas personas en el interior de los edificios y en el exterior solo en circunstancias favorables. Las vibraciones son similares al paso de camiones livianos. Observadores atentos, pueden notar pequeñas oscilaciones de los objetos colgados, los cuales son un poco más notorios en pisos superiores.
- b). (no daño).
- c). (no efectos).

Grado 4. Observado por muchos

- a). Sentido por muchas personas en el interior y por pocas en el exterior de los edificios. Algunas personas despiertan, pero casi nadie se asusta. Vibración de puertas, ventanas y vajilla. Crujido de pisos y muros. Los muebles comienzan a sacudirse. Los objetos colgantes oscilan. Los líquidos en envases abiertos se agitan levemente. Vehículos estacionados se mecen.
- b). (no daño)
- c). (no efectos).

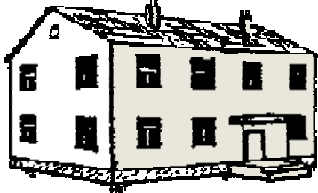





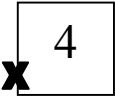
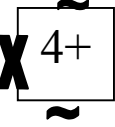
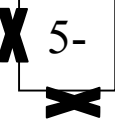

<i>Tabla 1. Clasificación de Daños en las Construcciones</i>	
<p>Grado 1: Daños Leves. Fisuras en los revestimientos y en muy pocos muros. En pocos casos se producen caída de pequeños trozos de revoques y de tejas sueltas de las partes altas de las viviendas.</p>	
<p>Grado 2: Daños moderados. Grietas pequeñas en muchas paredes. Caída de grandes trozos de revoque y de parapetos.</p>	
<p>Grado 3: Daños Severos. Grietas grandes y profundas en la mayoría de las paredes. Rotura de chimeneas por la línea del tejado.</p>	
<p>Grado 4: Destrucción Parcial. Brechas y grietas en las paredes y derrumbamiento parcial de los edificios. Agrietamiento en distintas partes y secciones de construcción, además del desmoronamiento (colapso) de paredes interiores y muros.</p>	
<p>Grado 5: Colapso. Destrucción total de las construcciones o de sus partes vitales.</p>	

Tabla 2. a). Valores Cuantificados para la clasificación de Daños

NIVEL DE DAÑO	ANCHO DE FISURAS O GRIETAS (mm)			LONGITUD PROMEDIO (m)
	-	=	+	
0	-	=	+	
1	0.3	1	2.5	1.5 – 2.0
2	2.5	5	9.0	1.5 – 2.0
3	9.0	14	20	1.5 – 2.0
4	>20	27		1.5 – 2.0
5	a más	50		1.5 – 2.0

Tabla 2. b). Ilustración gráfica de los niveles de daño 4 y 5 de la Tabla 2a. El tamaño de los símbolos indica la ubicación y el daño en la vivienda. X= indica colapso de muros. En los niveles de daño 4- a 5, ~, indica grietas en los muros.

	Grietas con anchos > 20 mm. Pequeña caída de muros.
	Cae parte del muro.
	Cae todo el muro y grietas en otros. Daños en un 25% de la vivienda.
	Caen dos muros. Daños en un 50% de la vivienda
	Caen tres muros. Daños en un 75% de la vivienda

Grado 5. Las personas despiertan

- a). Sentido por todas las personas en el interior y por muchas en el exterior de las viviendas. Algunas personas corren al exterior, los animales se inquietan. Sacudimiento de todo el edificio. Los objetos colgantes oscilan considerablemente. Los cuadros se desvían de su posición original. Raras veces los relojes de péndulo se detienen. Objetos inestables pueden volcarse o desplazarse. Puertas y ventanas sin seguros se abren y luego se cierran. En recipientes abiertos, los líquidos se derraman en pequeñas cantidades. Las vibraciones son similares a las producidas por un objeto pesado que cayera dentro del edificio.
- b). Posibles daños de *nivel 1* en algunos edificios de *Tipo A*.
- c). A veces cambia el flujo de las vertientes.

Grado 6. Las personas se asustan

- a). Sentido por la mayoría de personas, tanto en el interior como en el exterior de las viviendas. Muchas personas se asustan en los edificios y corren al exterior. Algunas personas pierden el equilibrio. Los animales domésticos arrancan de sus establos. En algunos casos puede quebrarse la vajilla y cristalería, caer libros de los estantes. Es posible que los muebles pesados se muevan y pueden sonar campanas pequeñas.
- b). Daños de *nivel 1* en algunos edificios de *Tipo B* y en muchos del *Tipo A*. Algunos edificios del *Tipo A* soportan daños de *nivel 2*.
- c). En algunos casos pueden presentarse grietas de hasta 1 cm de ancho en terrenos húmedos y deslizamientos ocasionales en áreas montañosas. Cambios de flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos.

Grado 7. Daños en los Edificios

- a). La mayoría de las personas se asustan y corren hacia el exterior de las viviendas. Muchas encuentran dificultad en sostenerse de pie. La vibración es sentida por personas manejando vehículos. En algunas iglesias las campanas grandes suenan.
- b). Daños de *nivel 1* en muchos edificios de *Tipo C*, daños de *nivel 2* en edificios de *Tipo B*, daños de *nivel 3* en muchos edificios de *Tipo A* y de *nivel 4* en algunos de *Tipo A*. En algunos casos se producen deslizamientos de tierra en carreteras construidas en topografías de gran pendiente y grietas en las carreteras. Daños en las uniones de las tuberías y grietas en muros de albañilería.

- c). Se forman olas en las superficies del agua y se enturbian debido al lodo del fondo. Cambios en el flujo de las vertientes y en el nivel de agua de los pozos. En algunos casos, las vertientes dejan de correr o nuevas vertientes aparecen. En casos aislados se deslizan partes de riberas constituidas por terrazas de arena o grava.

Grado 8. Daños severos en Edificios

- a). Susto y pánico e incluso los conductores de vehículos se perturban. Se quiebran algunas ramas de los árboles. Se mueven los muebles pesados y algunos se vuelcan. Algunas lámparas colgantes se dañan.
- b). Muchos edificios de *Tipo C* sufren daños de *nivel 2* y algunos de *nivel 3*; muchos edificios de *Tipo B* sufren daños de *nivel 3* y algunos de *nivel 4*; muchos de *Tipo A* soporta daños de *nivel 4* y algunos de *nivel 5*. Roturas de algunas tuberías. Los monumentos y estatuas se mueven y giran. Las lápidas se vuelcan y caen. Muros de piedra se derrumban.
- c). Derrumbes pequeños en zonas con pendientes fuertes en "bajadas y cuestras" de las carreteras, grietas en el terreno de varios centímetros de ancho. Aparecen nuevas lagunas y manantiales. En muchos casos el flujo de las vertientes y los niveles de agua de los pozos cambian. Se ven olas en la superficie del terreno.

Grado 9. Destrucción Parcial de Edificios

- a). Pánico general.
- b). Muchos edificios de *Tipo C* sufren daños de *nivel 3* y algunos de *nivel 4*; muchos edificios del *Tipo B* muestran daños de *nivel 4*, y unos pocos de *nivel 5*; muchos edificios de *Tipo A* sufren daños de *nivel 5*. Pilares y monumentos se voltean. Daños considerables en los reservorios artificiales y algunas tuberías subterráneas se rompen. En casos aislados se doblan o tuercen las líneas ferroviarias y se dañan las carreteras.
- c). Los terrenos planos son inundados de agua y se notan frecuentes depósitos de lodo y arena. Grietas en el terreno hasta de 10 cm y aún mayores en riberas y pendientes, desprendimientos en despeñaderos, numerosos deslizamientos y caída de material rocoso e inconsolidado en pendientes rocosas. Se observan grandes olas sobre el agua.
- d). Los animales corren despavoridos.

Grado 10. Destrucción Total de Edificios

- a). Muchos edificios de *Tipo C* sufren daños de *nivel 4* y algunos de *nivel 5*; muchos edificios de *Tipo B* sufren daños de *nivel 5*. Los diques y represas sufren daños críticos además de daños severos en los puentes. Las líneas ferroviarias se doblan o tuercen. El pavimento de las carreteras se ondula.
- b). Se observan grietas en el terreno de hasta varios decímetros y a veces hasta de 1m de ancho. Se producen grietas anchas a lo largo de las riberas de los cursos de agua. Se pueden producir deslizamientos considerables en riberas y costas abruptas. Se producen cambios en el nivel de agua en los pozos. En áreas costaneras se producen desplazamientos de arena y lodo. El agua de ríos, lagos, canales, etc. se derraman violentamente sobre el terreno vecino.
- c). Aparecen nuevos lagos.

Grado 11. Catástrofe

- a). Daños severos incluso en edificios bien contruidos, puentes, represas y líneas ferroviarias. Las carreteras quedan inservibles, las tuberías subterráneas se destruyen.
- b). Daños considerables en el terreno debido a la presencia de grandes grietas, fisuras y desplazamientos, tanto horizontal como vertical. Numerosos deslizamientos en terrenos montañosos. Es preciso investigar cuidadosamente los efectos del sismo para determinar la intensidad del sacudimiento.

Grado 12. Cambios en el Paisaje

- a). Graves daños y destrucción en todas las estructuras ubicadas sobre o bajo el nivel del suelo.
- b). Cambia radicalmente la superficie del terreno. Se observa la presencia de grietas con grandes desplazamientos verticales y horizontales. Desprendimiento de rocas y deslizamientos en riberas sobre grandes extensiones. Aparecen nuevos lagos y cascadas, los ríos cambian de curso.

Formatos para la Adquisición de Datos

En general, para la adquisición de los datos de campo se requiere contar con el plano catastral de la ciudad o localidad en estudio y sobre el cual se realiza un

cuadrillado para decidir la densidad de muestreo y la respectiva codificación de los puntos de observación. Lo óptimo es considerar un punto de observación por cada Manzana que conforma la ciudad en estudio, pero esto dependerá del número de participantes en la toma de datos, del tiempo y la logística del mismo. Establecida la densidad del muestreo, se realiza la toma de datos con apoyo de tres formatos diseñados especialmente para este tipo de estudios.

Formato de Encuesta de Intensidades. Este formato contiene 137 interrogantes, las mismas que permiten adquirir información relacionada con el comportamiento de las personas y su entorno durante y después del sismo. Para este formato es importante considerar los datos de la persona a la cual se realiza la encuesta.

Efectos en Construcciones. Las interrogantes incluidas en este formato, permite adquirir datos sobre las características de las construcciones y los daños ocasionados sobre estas por el sismo. Además, debe de anotarse las dimensiones de las fisuras, grietas y complementarse con gráficos detallados en planta, cortes y ubicación de las fallas. Es importante orientar la vivienda con el eje perpendicular a la fachada respecto al norte. Asimismo, se debe contar con el auxilio de una wincha y brújula para determinar las dimensiones y orientación de las viviendas, además de la dirección de caída de muros y objetos.

Efectos Sísmicos en los Suelos. Con este tipo de formato se obtiene datos del tipo y características de suelo, así como los efectos ocasionados por el sismo.

En general, las encuestas en cada punto de muestreo se realiza a las personas que estuvieron en sus viviendas en el momento del sismo. Para seleccionar las muestras, es importante considerar viviendas que reflejen el daño característico de la Manzana o celda y que preferentemente sean viviendas de uno o dos pisos.

Interpretación de los Datos

La interpretación de los datos se realiza en función de la descripción de los grados de la escala sísmica de intensidad MSK (Ocola, 1979). Para ello, se agrupa los indicadores del grado de sacudimiento del suelo en función de los efectos que definen

los grados de intensidad descritos anteriormente. De la interpretación y evaluación de cada indicador se obtiene un valor de intensidad y el valor promedio de estos, representa la intensidad o nivel de sacudimiento en ese punto medio del área de observación.

Bibliografía

Medvedev et al., (1964). Zonificación Sísmica de la URSS, Ed. S.V. Medvedev.

Ocola, (1979). Escala MSK – Versión adaptada para el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Ocola, (1996) Efectos macrosísmicos del sismo de Nazca del 12 de Noviembre de 1996. Informe inédito, Instituto Geofísico del Perú.

Nombre de archivo: macro1
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 03:26 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 03:26 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:05 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 14
Número de palabras: 3,457 (aprox.)
Número de caracteres: 19,710 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Ciudad de Arequipa

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) indica que el terremoto del 23 de Junio produjo en el Departamento de Arequipa la muerte de 35 personas, 64 desaparecidas, 1993 heridos y 83721 damnificados, 14179 viviendas afectadas y 9097 viviendas destruidas.

El estudio de las intensidades macrosísmicas en la ciudad de Arequipa se realizó en dos etapas, la primera considera el trabajo de campo para la toma de datos durante un periodo de 4 días. Para tal objetivo, sobre el plano catastral de la ciudad de Arequipa, se ha cuadrillado áreas unitarias de 2 km por lado y en cada cuadrilla se consideró tres puntos de evaluación llegándose a obtener un total de 140 muestras. Los formularios utilizados corresponden a los “Formatos de Encuesta de Intensidades y Efectos en Construcciones”. La segunda etapa considera la interpretación de los datos de campo y la elaboración de diversos mapas sobre las intensidades macrosísmicas, antigüedad de viviendas y niveles de daño, así como la elaboración de diversos cuadros estadísticos.

Distribución de Intensidades

En la Figura 1, se observa que el máximo valor de intensidad obtenido en la ciudad de Arequipa fue de grado 6⁺ MSK presente en las Urbanizaciones Lara, Los Cristales y en el anexo El Pasto, todos en el Distrito de Socabaya. De manera puntual, este valor de intensidad ha sido obtenido también en el PP.JJ. Javier Eraus del Distrito de Alto Selva Alegre, ubicándose este punto en suelo inclinado y posiblemente sea la causa de los efectos ocasionados.

Debido a la poca densidad de puntos observados en el área urbana de la ciudad de Arequipa, no se ha podido zonificar el nivel de sacudimiento del suelo; sin embargo, las intensidades máximas corresponden a suelos compuestos por gravas y arenas de baja densidad (las Urbanizaciones Lara, Los Cristales y Anexo El Pasto). En el caso de la urbanización Los Cristales, el nivel freático se encuentra muy cerca de la superficie (0.50 m) e inclusive se observa afloramientos de agua que dan lugar a la formación de pequeños pantanos. En el Cercado y en los Distritos de Miraflores, Mariano Melgar, Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, Characato, Alto Selva Alegre, Cayma,

Cerro Colorado y en el Cono Norte predomina los valores de intensidad 6⁻ y 6 grados MSK (Figura 1). En estos sectores los suelos están compuestos de gravas, arenas aluviales, limos y ceniza volcánica; mientras que, La Rinconada, Jerusalén y Atalaya en el Distrito de Mariano Melgar se ubican sobre suelo rocoso intrusivo.

En los Distritos de Hunter y Sachaca, se ha observado una intensidad de 5⁺ MSK, al igual que en los sectores de San Martín de Socabaya (Urbanización Santa Catalina), Salaverry (Distrito de José Luis Bustamante y Rivero) y hacia el Cono Norte. En los Distritos de Sachaca y Hunter, los suelos están compuestos principalmente por granitos, monzonitas y dioritas superficialmente fracturados, por esta característica es posible que las viviendas no hayan sufrido daños mayores. En Cerro Colorado el suelo se muestra muy estable. Hacia el Cono Norte, el suelo esta compuesto de gravas y arenas aluviales.

En general, los valores de intensidad obtenidos en cada punto de evaluación de la ciudad de Arequipa varían entre 5⁺ y 6⁺MSK. El valor 5⁺MSK fue obtenido en 22 puntos, 6⁻MSK en 58 puntos, 6MSK en 55 puntos y el valor máximo de 6⁺MSK en 4 puntos.

Evaluación de Daños

Los daños ocasionados por el terremoto en las edificaciones de uno y dos pisos de la ciudad de Arequipa, fueron recopilados en el formato “Efectos en Construcciones” y para tal efecto, ha sido importante considerar la calidad de la construcción debido a que el uso de buenos materiales y técnicas apropiadas de construcción permiten que estas resistan mejor al sacudimiento del suelo, en comparación de aquellas en donde se ha empleado material pobre o de mala calidad. Sobre la base de los criterios establecidos en la escala sísmica MSK y la Tabla 2 (cuantificación de niveles de daño) propuesta por Ocola (1979), se ha interpretado el total de los datos a fin de determinar el nivel de daño.

El total de viviendas evaluadas fue de 139 y de estas, 13 son de *Tipo A*, 55 de *Tipo B* y 71 de *Tipo C*. En la Figura 2 se representa, en términos porcentuales, la calidad de la construcción y el tipo de vivienda evaluada. En esta Figura se observa que en

Ver Figura 1

viviendas de *Tipo A*, el 38% son de mala y regular calidad; mientras que, el 24% son de buena calidad. En las viviendas de *Tipo B*, el 62% son de mala calidad, el 14% de regular calidad y el 24% de buena calidad. Para las viviendas de *Tipo C*, escasamente el 2 % son de mala calidad, el 14% de regular calidad y el 84% de buena calidad.

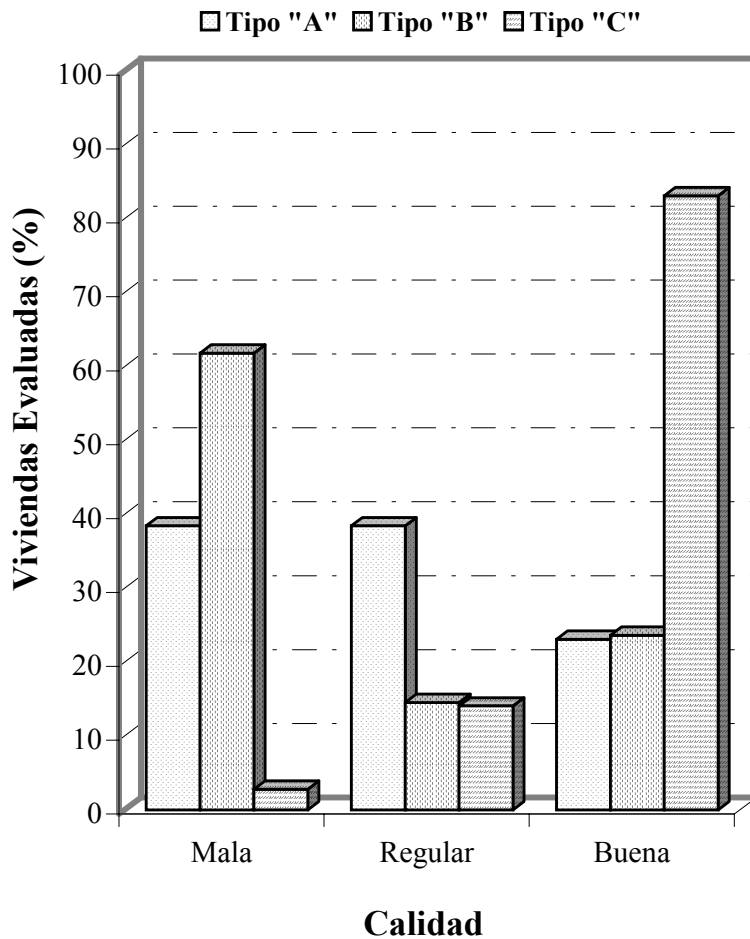


Figura 2.- Porcentaje total de viviendas evaluadas en la ciudad de Arequipa en función del tipo y calidad de la construcción.

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas de la ciudad de Arequipa, según la escala MSK (Ocola, 1979), son como sigue:

- *Viviendas de tipo "A"*. En general, en los alrededores de la ciudad las viviendas son construidas a base de pircados de bloques de sillar o piedra, sin mortero o con mortero de cal-arena o cemento-arena, cimentación muy superficial de piedra con

mortero de barro o cemento-arena sin ningún tipo de refuerzo estructural. Asimismo, muchas viviendas presentan dinteles con trabado de sillar en forma de arcos o rectos y techos con viga de madera sobrepuesta directamente en los muros. Estas viviendas se encuentran en los Distritos de Miraflores, Mariano Melgar, Sachaca, Characato, Paucarpata, Cerro Colorado, Zamacola, Hunter y Alto Selva Alegre.

- *Viviendas de tipo "B"*. Estas viviendas son de sillar con buen mortero de cal-arena o cemento-arena, paredes bien trabadas y con espesores que varían de 40 a 80 cm, inclusive hasta 1 metro. En estas viviendas la unidad de albañilería es homogénea con buena cimentación, pero con muros que no tienen refuerzo de concreto armado, siendo los dinteles de sillar. Los techos característicos son *Tipo Bóveda* apoyados en muros anchos, aunque también se encuentran techos planos de sillar trabados en rieles y techos de losa de concreto armado apoyado sobre muros sin vigas o refuerzo. Este tipo de viviendas se encuentra en el Cercado y en los Distritos de Miraflores, Mariano Melgar, Sachaca, Yanahuara y Cayma. También se considera dentro de este tipo, las construcciones de ladrillo sin reforzar como las existentes en todos los Distritos de la ciudad de Arequipa.

- *Viviendas de tipo "C"*. Este tipo considera viviendas de ladrillo reforzado con elementos de concreto armado, vigas, columnas de amarre con buena cimentación y techos de losa aligerada. Estas viviendas se encuentran en urbanizaciones recientes como Lambramani, Ampliación Paucarpata, Hunter, Bellapampa, Socabaya, Santa Catalina, Guardia Civil y en algunas áreas remodeladas del cercado.

Frecuencia de Daños

Después de haber evaluado la información contenida en los formularios, se confeccionaron listados de resúmenes donde se indica las características de las viviendas muestreadas (tipo, antigüedad, calidad de la construcción y calidad de suelo). Se especifica los daños ocasionados en las mismas (caídas de revoque, fisuras, grietas y derrumbe de paredes cuando existe). Adicionalmente se anota la dirección de las viviendas evaluadas.

En la Figura 3 se muestra, en términos de porcentaje, las viviendas evaluadas en función de los niveles de daño para cada uno de los tres tipos de vivienda. En el caso de las viviendas de *Tipo A*, el 23% no han sufrido daño; así mismo, tres agrupaciones con el 15% cada una presentan, daños moderados (nivel 2), daños severos (nivel 3) y colapso (nivel 5); solo el 23 % de viviendas sufrieron destrucción parcial (nivel de daño 4). En el caso de las viviendas de *Tipo B*, el 31% no ha sufrido daño, el 29% tienen daños leves, el 20% daños moderados y el 18% han alcanzado daños severos. En el caso de las viviendas de *Tipo C*, el 78% no ha sufrido daño; mientras que, el 10% presentaron daños leves y moderados.

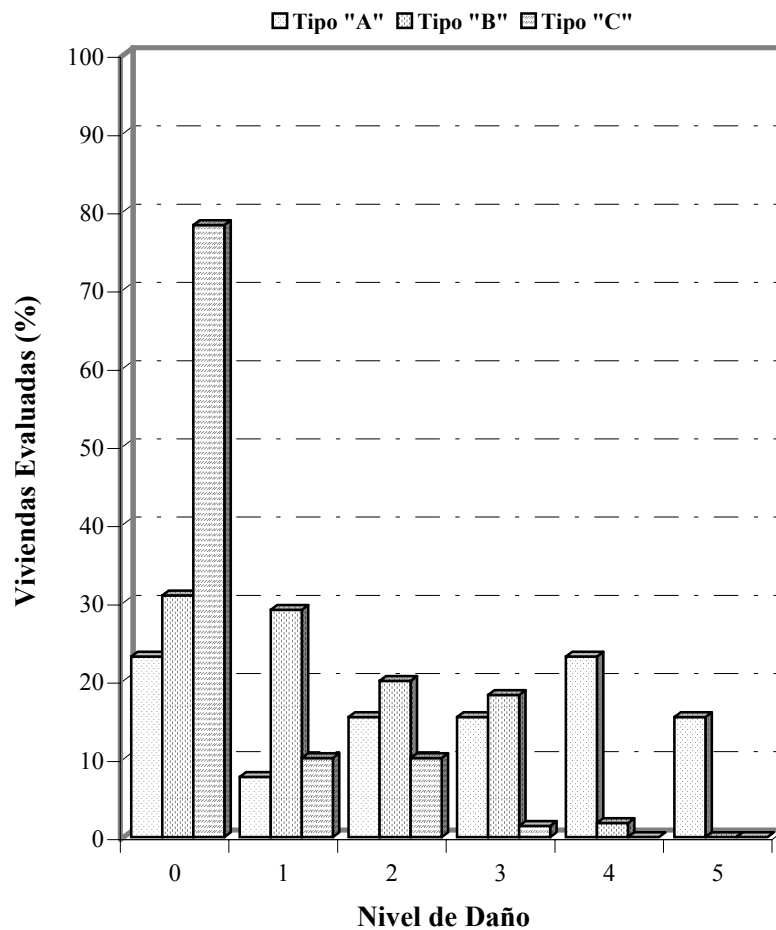


Figura 3. Frecuencia de daños en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Arequipa.

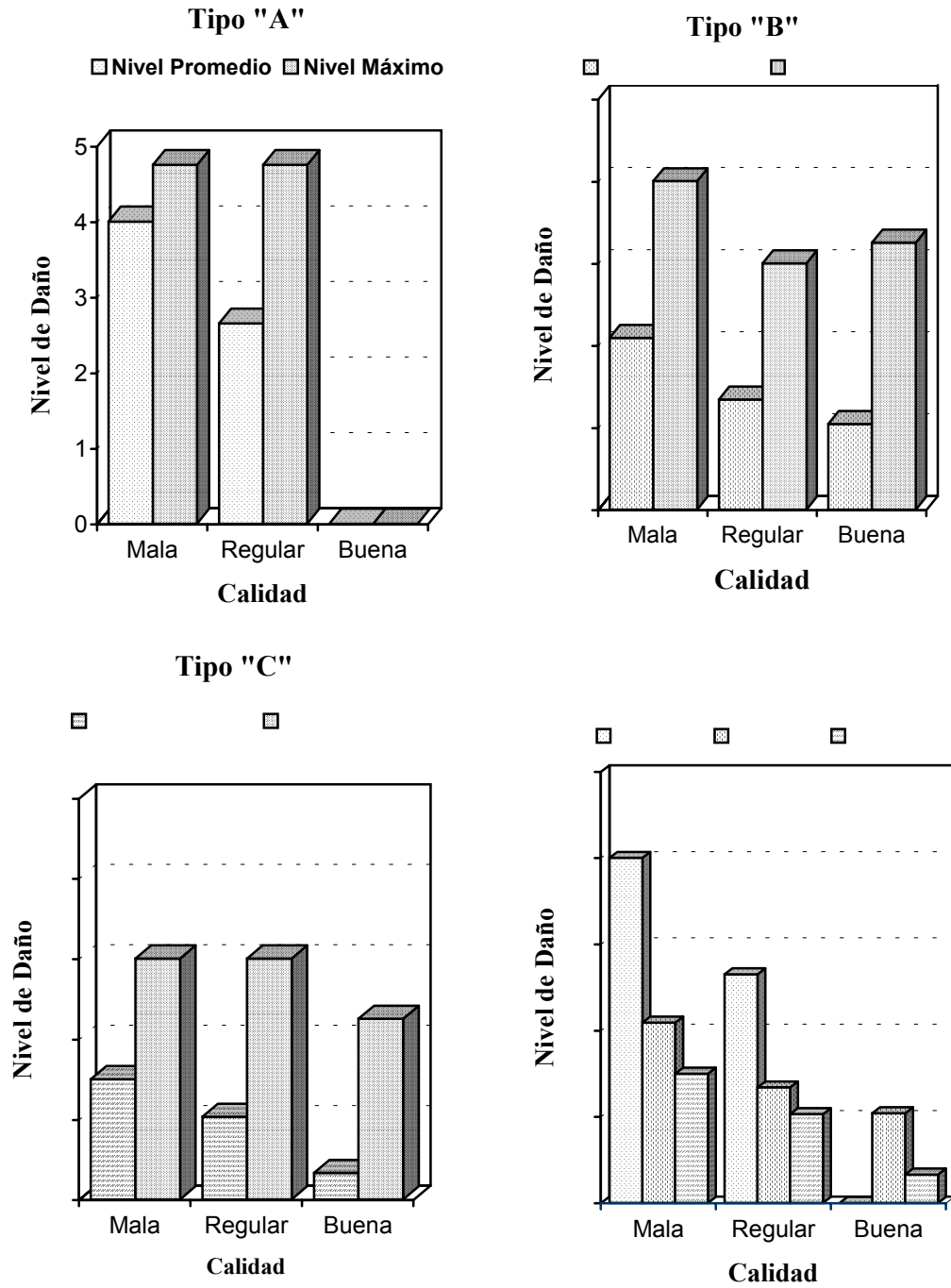


Figura 4.- Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas evaluadas en la ciudad de Arequipa.

En la Figura 4 se presenta el nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad y tipo de vivienda. En las viviendas de *Tipo A*, el nivel de daño máximo es 5⁻ en viviendas de mala y regular calidad; mientras que, el nivel de daño promedio es de 4 en viviendas de mala calidad y 2⁺ en las de regular calidad. En este caso, no se ha evaluado viviendas de buena calidad. En las viviendas de *Tipo B*, el nivel de daño máximo es 4 en las de mala calidad, 3 en las de regular calidad y 3⁺ en las de buena calidad; mientras que, el nivel de daño promedio es de 2 en las de mala calidad, el mismo que decrece en función de la calidad de vivienda de 1⁺ a 1 en las de regular y buena calidad respectivamente. En las viviendas de *Tipo C*, el nivel de daño máximo es 3 en las de mala y regular calidad, 2⁺ en las de buena calidad; mientras que, el nivel de daño promedio es 1⁺ en las de mala calidad y 1 en las de regular calidad. Las viviendas de buena calidad no han sufrido daño.

Influencia de la Antigüedad de las Viviendas

La antigüedad de las viviendas es un factor que también se toma en cuenta durante la evaluación e interpretación de daños. Con el transcurso de los años, las viviendas están expuestas a las inclemencias de los fenómenos meteorológicos (lluvia, viento, intemperismo, humedad, etc.), los mismos que influyen en el deterioro de los materiales de las construcciones.

Tabla 3. Denominación de las viviendas según la antigüedad y número de sismos con intensidad superior a VI grados MM / MSK, que han soportado.

Denominación	Años	Número de Sismos Soportados
Reciente	0 – 25	2
Medianamente Antigua	25 – 50	4
Antigua	50 – 100	7
Muy Antigua	> 100	8

El rango de antigüedad, entre las viviendas de tipo A y B es amplio, habiéndose evaluado viviendas de *Tipo A* hasta con 100 años y de *Tipo B* hasta con 241 años de antigüedad. Este rango no se observa en las viviendas tipo C ya que estas no sobrepasan

los 65 años de edad. A la antigüedad de las construcciones se le otorga hasta cuatro denominaciones, las mismas se describen en la Tabla 3. Según esta clasificación, en la ciudad de Arequipa se ha evaluado viviendas recientes y medianamente antiguas con edades que van de 0 hasta 25 años y de 25 a 50 años respectivamente. Las viviendas antiguas presentan edades entre 50 a 100 años y en su mayoría son de *Tipo A* y *B*; sin embargo, se ha evaluado dos viviendas de *Tipo C*, con edades de 55 y 65 años. En el distrito de Sachaca se ha evaluado una vivienda muy antigua de *Tipo B*, con 241 años.

La distribución del tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Arequipa en función de su antigüedad, se presenta en la Figura 5 y en ella se observa que las viviendas de *Tipo A* se ubican en los PP.JJ. Eduardo de la Pinela y Bustamante y Rivero en el Distrito de Cerro Colorado, en el PP.JJ Javier Eraus del Distrito de Alto Selva Alegre y en las calles Misti y San Antonio del Distrito de Miraflores. Las viviendas de *Tipo B* predominan en el Cercado y en los Distritos de Miraflores, Cayma, Sachaca, Selva Alegre y Cerro Colorado. Las viviendas de *Tipo C*, se encuentran en las urbanizaciones nuevas de los Distritos de José Luis Bustamante y Rivero, Paucarpata, Mariano Melgar, Cayma, Cerro Colorado, Hunter, Sachaca, Tiabaya y Socabaya.

Las edades de las viviendas evaluadas, en términos de porcentaje, se representan en la Figura 6 y en ella se observa que el 61% de las de *Tipo A* son recientes (menor a 25 años), el 23% son medianamente antiguas (25 a 50 años) y el 15% son antiguas (50 a 100 años). No se han evaluado viviendas muy antiguas. En relación con las viviendas de *Tipo B*, el 49% son recientes, el 16% son medianamente antiguas, el 14% son antiguas y el 20 % son muy antiguas (mas de 100 años de edad). En las viviendas de *Tipo C*, el 67% son recientes y el 29% medianamente antiguas.

La antigüedad de las viviendas, sumada a la frecuencia de sismos con intensidad elevada ocasiona superposición de daños en las mismas. Según la historia sísmica, la región Sur de Perú ha sido frecuentemente afectada por terremotos importantes que han generado intensidades del orden de VI grados MM/MSK y la experiencia muestra que las viviendas de *Tipo A* no sobreviven a más de 3 ó 4 sismos de estas características, excepto las cimentadas en suelos compactos.

Ver Figura 5

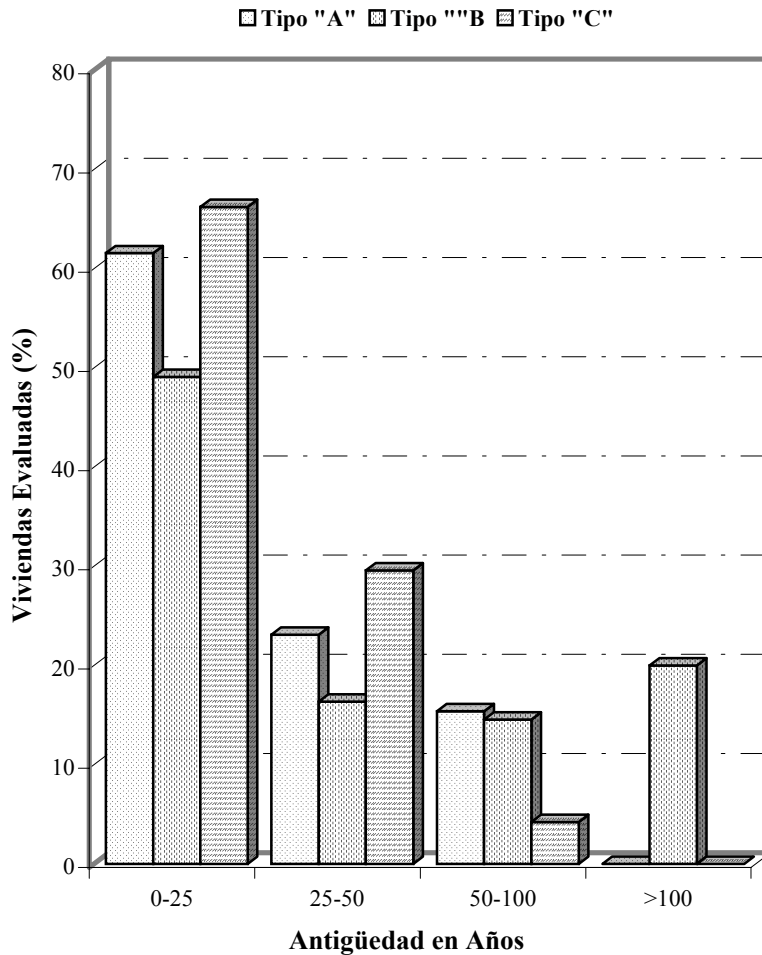


Figura 6. Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la ciudad de Arequipa.

Distribución de Daños

Los valores de los niveles de daño y la calidad de construcción de las viviendas evaluadas en la ciudad de Arequipa, se presenta en el mapa de la Figura 7. Las viviendas de *Tipo A*, presentan niveles de daño 4 en el PP JJ 28 de Julio (Distrito de Characato), nivel de daño 4⁺ en Rafael Belaunde (Distrito de Cayma) y nivel de daño 5⁻ en la Urb. Leoncio Prado (Distrito de Paucarpata), todas estas viviendas eran de mala calidad y se encuentran ubicadas sobre terrenos inclinados. De manera puntual, se

observa un nivel de daño 5⁻ en el Sector F de Socabaya, en donde las construcciones son de calidad regular, además de ubicarse en suelo inclinado.

En las viviendas evaluadas de *Tipo B*, el nivel de daño 3 se presentó en determinados sectores de la ciudad como el Centro Histórico y en las calles Puente Bolognesi, Bolívar, Paucarpata, 28 de Julio y en la Urb. República de Chile. Similar nivel de daño (3⁺) se observó en la calle Misti del Distrito de Miraflores, en donde las viviendas son de mala y regular calidad. Este nivel de daño también se presenta en el Sector de Río Seco, Zona 1 y en la vía de Evitamiento y Pachacutec, ambos en el Distrito de Cerro Colorado, en donde las viviendas son de buena calidad.

Las viviendas de *Tipo C* se caracterizan porque no han sufrido daño alguno, aunque el nivel de daño 3 se presentó en Villa Independencia, del Distrito de Alto Selva Alegre y en Los Cristales del Distrito de Socabaya. En esta última, las viviendas sufrieron asentamientos importantes (viviendas evaluadas de mala y regular calidad). El nivel de daño 2⁺, de manera puntual se presentó en Villa Independencia, Alto Selva Alegre, Urb. Jorge Polar, en el Cercado, en la Av. Kennedy (Paucarpata) y en Los Cristales (Socabaya).

Conclusiones y Recomendaciones

En la ciudad de Arequipa, el valor promedio de intensidad ocasionado por el sismo del 23 de Junio fue de 6 MSK; mientras que, el valor máximo de intensidad de 6⁺ MSK fue evaluado en las Urbanizaciones Lara, Los Cristales y en el anexo El Pasto, del Distrito de Socabaya.

Asimismo, los valores del nivel de daño máximo en viviendas de *Tipo A* alcanza destrucción parcial (nivel 4) en los PP JJ 28 de Julio y Rafael Belaunde de los Distritos de Characato y Cayma. En viviendas de *Tipo B*, los daños son severos (nivel 3) en El Cercado de la ciudad (calles Puente Bolognesi, Bolívar y Paucarpata). Mientras que, en las de *Tipo C* de manera puntual sufrió daños moderados (nivel 3) en Villa Independencia del Distrito Alto Selva Alegre y en Los Cristales del Distrito de Socabaya.

Ver Figura 7

Las viviendas de *Tipo A* y *B*, han sufrido mayores efectos que las de *Tipo C*. En el caso de las viviendas de *Tipo A*, los mayores efectos se debieron a la falta de técnicas de construcción y al uso de materiales de mala calidad. En el caso de las viviendas de *Tipo B*, el factor antigüedad fue importante debido a que ocasionó el deterioro progresivo de las viviendas, además de haber soportado mayor número de sismos.

En la ciudad de Arequipa, el rango de antigüedad de las viviendas de *Tipo A* y *B* es amplio, se ha evaluado viviendas hasta con 100 (*Tipo A*) y 241 (*Tipo B*) años de antigüedad; sin embargo, en esta ciudad se ha observado que buen porcentaje de la población continúa construyendo viviendas de *Tipo A* y *B* de mala y regular calidad, aparentemente sin asesoramiento técnico y usando materiales de mala calidad. Las edades de estas viviendas son menores a 25 años de antigüedad. Las viviendas de *Tipo B* debido a su antigüedad presentan diferentes de técnicas constructivas y por consiguiente los daños también son variados. Este tipo de viviendas se distribuye por toda la ciudad de Arequipa.

En algunos sectores de la ciudad de Arequipa, como Los cristales y Lara, se ha observado mayor cantidad de daños con respecto a otros, debido al fenómeno de subsidencia de suelos producido por la presencia, cerca de la superficie, de la capa freática. Ante estas evidencias se recomienda emplear técnicas geofísicas para determinar las características físicas del suelo con el propósito de identificar y zonificar el tipo de suelo a fin de mejorar las técnicas de construcción.

La historia sísmica de Arequipa confirma que esta se encuentra en una de las zonas sismogénicas más importantes de Perú. Esta característica debe de tenerse en cuenta para la expansión urbana, lo que hace urgente contar con estudios de planificación urbana, dando énfasis a los programas de microzonificación sísmica. En el caso de ausencia de sismos, se debe de contar con programas de prevención y reconstrucción o reparación de las viviendas después de la ocurrencia de sismos. También, se debe de tener en cuenta la elección de futuras áreas de expansión urbana.

Apéndice

Localidad de Corire

Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), en Corire y Anexos tiene 7078 habitantes y 1637 viviendas particulares. De acuerdo con la evaluación efectuada por el Instituto Nacional de Defensa Civil, el número de viviendas afectadas por el terremoto fue de 148 y las que se destruyeron son 141. En la localidad de Corire, se ha evaluado tres puntos equidistantes, siendo el valor de intensidad en cada uno de 5⁺ MSK. Las viviendas evaluadas fueron dos de *Tipo A* de regular calidad y una de *Tipo C* de buena calidad. Existen también viviendas de *Tipo B* pero estas no fueron evaluadas. El nivel daño en una de las viviendas de *Tipo A*, ubicada en la calle Miguel Grau, es moderado (nivel 2); mientras que, en la otra y en la de *Tipo C* no se observaron daños. En relación con la antigüedad de las viviendas las de *Tipo A*, tienen 50 y 80 años y la de *Tipo C* del orden de 25 años.

Localidad de Aplao

El Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) indica que en Aplao y Anexos existe 8,852 habitantes y 2,041 viviendas particulares. De las evaluaciones realizadas por Defensa Civil se conoce que las viviendas afectadas por el terremoto fueron de 359 y las que se destruyeron 125. En la localidad de Aplao, se han evaluado 4 puntos equidistantes, siendo el valor de intensidad en tres de ellos de 5⁺ MSK y en el otro de 6⁻ MSK. Las viviendas evaluadas son una de *Tipo A* (regular calidad) y tres de *Tipo B* (buena calidad); mientras que, las de *Tipo C* no fueron evaluadas. El nivel de daño alcanzado en la vivienda de *Tipo A* es moderado (nivel 2) y en las tres de *Tipo B* es leve (nivel 1). En relación con la antigüedad de las viviendas, la de *Tipo A* tiene 120 años de antigüedad y las de *Tipo B* entre 25 y 50 años.

Distrito de Chuquibamba

Según el censo del año 1993 (INEI), en la localidad de Chuquibamba y Anexos tiene 4005 habitantes y 1234 viviendas particulares. Después de ocurrido el sismo del 23 de junio, Defensa Civil informa que el número de viviendas afectadas fue de 400 y las que se destruyeron del orden de 200. En Chuquibamba, se ha evaluado 3 puntos equidistantes siendo el valor de la intensidad en ellos de 5⁺ MSK. Las viviendas

evaluadas en esta localidad, son dos de *Tipo A* (de regular calidad) con daños moderados (nivel 2) y una de *Tipo B* (buena calidad) con daños leves (nivel 1). De las viviendas de *Tipo A*, una de ellas es muy antigua con mas de 100 años y las otras dos recientes con menos de 25 años.

Nombre de archivo: macro2
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 03:32 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 03:32 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 5 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:08 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 20
Número de palabras: 2,840 (aprox.)
Número de caracteres: 16,189 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Ciudad de Moquegua

El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), indica que el sismo del 23 de Junio ocasionó en el Departamento de Moquegua la muerte de 22 personas, 277 heridos y 57467 damnificados, además de 4062 viviendas afectadas y 2738 destruidas. El estudio de las intensidades macrosísmicas en el área urbana de la ciudad de Moquegua fue realizado en un periodo de tiempo de 3 días. El cuadrillado de la ciudad se realiza sobre su plano catastral considerando áreas unitarias de 400 metros por lado. En cada cuadrilla se consideró entre cuatro a cinco puntos de evaluación llegándose a obtener un total de 130 muestras. Los formularios utilizados en la ciudad de Moquegua corresponden a los “Formatos de Encuesta de Intensidades y Efectos en Construcciones”. Posteriormente, se realiza la interpretación de los datos de campo y la elaboración de diversos mapas sobre intensidades macrosísmicas, antigüedad de viviendas y niveles de daño; así como la elaboración de cuadros estadísticos sobre los efectos del sismo en esta ciudad.

Distribución de Intensidades

En la Figura 8 se observa que el máximo valor de intensidad evaluado en la ciudad de Moquegua es 6⁺ MSK, presente en los PP.JJ. El Siglo y San Francisco, en las Asociaciones de Vivienda José Olaya, Virgen de las Mercedes y Ramiro Priale y en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio. Los valores de intensidad 6 y 6⁻ MSK fueron obtenidos en el Cercado Monumental, en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio, en el Pueblo Joven Mariscal Nieto y en el Distrito de Samegua, Urbanizaciones Fortunata y San Bernabé. De manera puntual, se observa el valor de intensidad 5⁺ MSK en la Urbanización La Primavera, en el PP.JJ. Mariscal Nieto y en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio.

Debido a la poca densidad de puntos evaluados en el área urbana de la ciudad de Moquegua, no ha sido posible zonificar el nivel de sacudimiento del suelo, pero si se correlaciona el tipo de suelo con los valores de intensidad obtenidos, se observa que en los PP.JJ. San Francisco y El Siglo, así como en el Programa Municipal de Vivienda Pampas de San Antonio, el suelo está compuesto por gravas limosas, además de

afloramientos de arena arcillosa y arcilla limosa con el predominio de suelos gravosos. En el Cercado Monumental, el suelo esta compuesto por gravas limosas.

Los valores de intensidad MSK obtenidos para cada punto de evaluación de la ciudad de Moquegua son cinco (Figura 8) y estos se agrupan de la siguiente manera: el valor de intensidad 5+ MSK se obtuvo en 5 puntos, el valor de 6- MSK en 20, el valor 6 MSK en 50 y el valor 6+ MSK en 55, lo cual significa que los valores máximos de intensidad se encuentran distribuidos de manera puntual en toda la ciudad.

Evaluación de Daños

Los datos que describen los efectos del sismo sobre las viviendas de uno y dos pisos, fueron recopilados en el formato denominado “Efectos en Construcciones”. Para la ciudad de Moquegua, el número total de viviendas evaluadas fueron 130, de las cuales 58 son de tipo A, 37 de tipo B y 35 de tipo C. En el histograma de la Figura 9 se presenta, en términos porcentuales, la calidad de construcción y el tipo de vivienda evaluada. En dicha figura se observa que para las viviendas de Tipo A, el 53% corresponde a viviendas de mala calidad, el 28% de regular calidad y el 19 % de buena calidad. En las viviendas de Tipo B, el 32% son de regular calidad y el 68% de buena calidad. Las viviendas de Tipo C en su mayoría son de buena calidad (94%); mientras que, solo el 6% son de mala y regular calidad.

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas de la ciudad de Moquegua, según la escala MSK, son como sigue:

- *Viviendas de tipo “A”*. Por lo general, estas viviendas son construidas con adobe, mortero de barro o cal-arena, cimentación muy superficial de piedra con mortero de barro o cemento-arena sin ningún tipo de refuerzo estructural. Así como, dinteles trabados con madera de forma recta, techos con vigas de madera sobrepuestos directamente sobre la pared en forma de tijeras. Estas viviendas han sido identificadas en el Cercado Monumental, en Pueblos Jóvenes (PP.JJ.), en Asociaciones de Viviendas y en algunas urbanizaciones.

Ver Figura 8

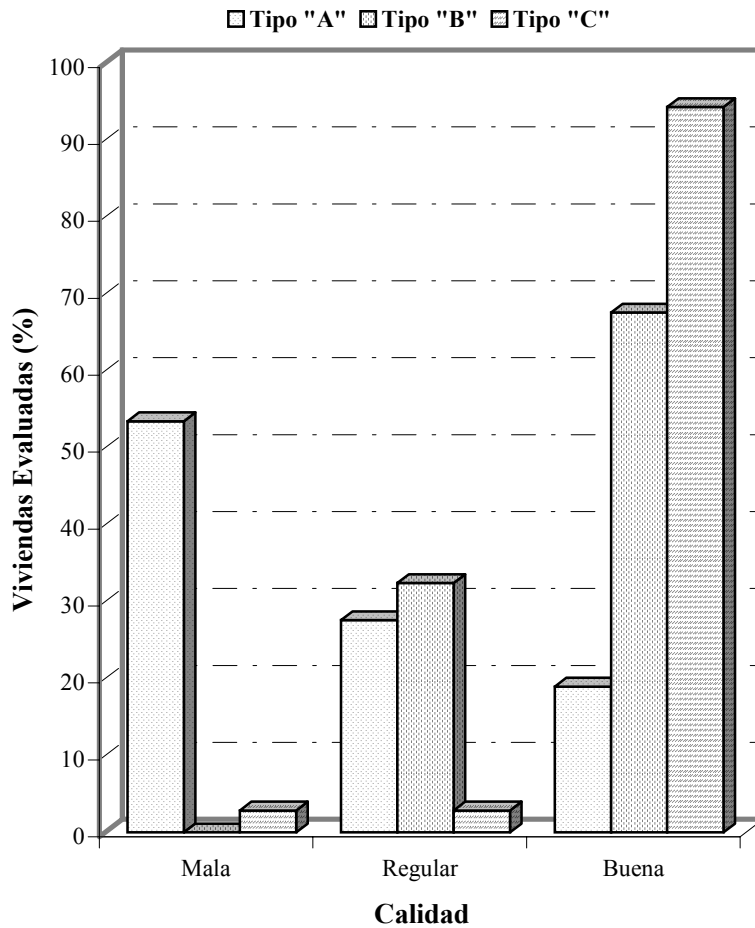


Figura 9. Porcentaje total de viviendas evaluadas en la ciudad de Moquegua, en función del tipo y calidad de la construcción.

- *Viviendas de tipo "B"*. Estas viviendas son construcciones de ladrillo con buen mortero de cemento-arena y paredes bien trabadas. En estas viviendas la unidad de albañilería es homogénea con buena cimentación, pero con paredes que no tienen refuerzo de concreto armado, pero si dinteles con concreto. Los techos característicos son planos apoyados en los muros, otros con losa de concreto armado sin vigas o refuerzo. Del mismo modo, este tipo de viviendas se encuentra en el Cercado Monumental, en PP JJ, en Asociaciones de Viviendas y en algunas urbanizaciones.

- *Viviendas tipo "C"*. Este tipo de construcciones a base de ladrillo, son reforzadas con elementos de concreto armado, vigas y columnas de amarre con buena cimentación, además de techos con losa aligerada. Estas viviendas se encuentran en el Cercado Monumental, en PP JJ, en Asociaciones de Viviendas y en algunas Urbanizaciones.

Frecuencia de Daños

Después de haber evaluado la información contenida en los formularios, se confeccionaron listados de resúmenes donde se indica las características de las viviendas evaluadas (tipo, antigüedad, calidad de la construcción y calidad de suelo) y daños ocasionados en las mismas (caídas de revoque, fisuras, grietas y derrumbe de paredes). Adicionalmente se anota la dirección de las viviendas evaluadas.

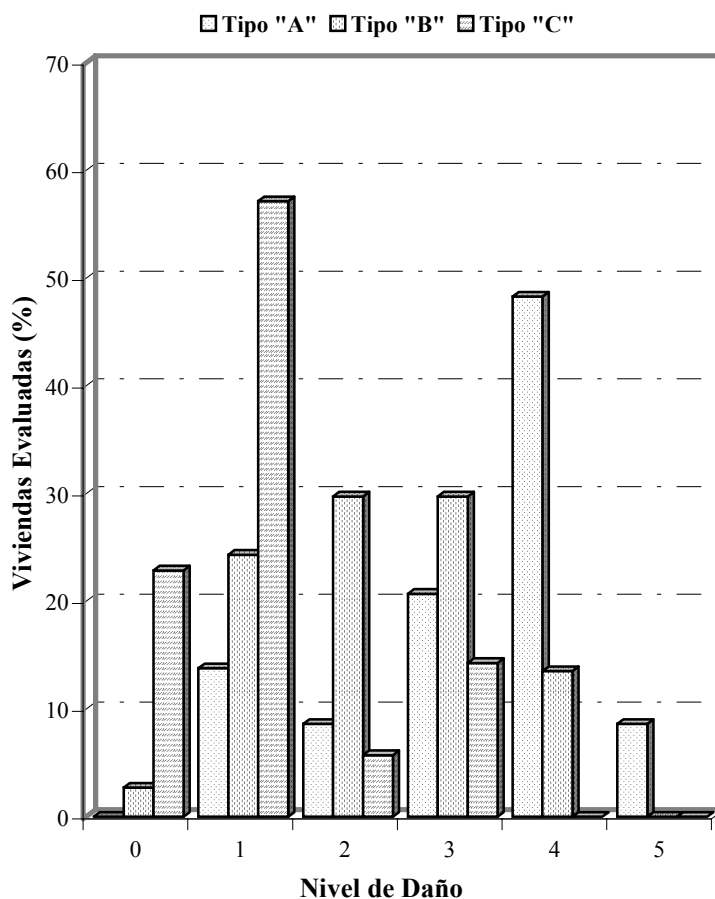


Figura 10. Frecuencia de daños en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Moquegua

En la Figura 10 se muestra en términos de porcentaje las viviendas evaluadas en función de los niveles de daño para los tres tipos de viviendas presentes en la ciudad de Moquegua. En el caso de las viviendas de tipo A, sobresalen los porcentajes de 14% que sufrieron daños leves (nivel 1), 20% para las viviendas con daños severos (nivel 3) y el 48% para las que sufrieron destrucción parcial (nivel 4). En el caso de las viviendas de Tipo B, el 24% presentaron daños leves (nivel 1) y el 30% en cada caso tuvieron daños moderados (nivel 2) y daños severos (nivel 3). En las viviendas de Tipo C, el 23% no han sufrido daño, el 57 % tuvieron daños leves (nivel 1) y el 14 % presentaron daños severos (nivel 3).

Asimismo, se ha determinado el nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad y tipo de vivienda evaluada, los resultados se representan en la Figura 11. Para las viviendas de tipo A de mala calidad, el nivel de daño máximo alcanza el colapso (nivel 5) y el nivel promedio destrucción parcial (nivel 4⁻); en las viviendas de regular calidad, el nivel de daño máximo fue destrucción parcial (nivel 4⁺) y el promedio, alcanzó daños severos (nivel 3⁺); mientras que, en las viviendas buena calidad, el nivel de daño máximo también alcanza destrucción parcial (nivel 4⁺) y en el nivel promedio, los daños fueron leves (nivel 1⁺). En las viviendas de tipo B de regular calidad, el nivel de daño máximo alcanzó destrucción parcial (nivel 4) y en el promedio, los daños fueron moderados (nivel 2⁺); en las de buena calidad, el nivel de daño máximo alcanza destrucción parcial (nivel 4⁻) y en promedio los daños fueron moderados (nivel 2). En las viviendas de tipo C de mala calidad, el nivel de daño máximo y promedio fue similar y los daños severos alcanzaron el nivel 3⁺. En el caso de las viviendas de regular calidad, igualmente el nivel de daño máximo y promedio fue moderado (nivel 2⁺); mientras que, en las de buena calidad, el nivel de daño máximo corresponde a daños severos (nivel 3⁺) y el promedio a daños leves (nivel 1).

Antigüedad de las Viviendas

La antigüedad de las viviendas es un factor que también se toma en cuenta durante la evaluación e interpretación de daños. Con el transcurso del tiempo, las viviendas están expuestas a las inclemencias de los fenómenos meteorológicos (lluvia, el viento, el intemperismo y la humedad) influyendo estos en el deterioro de los materiales de las construcciones.

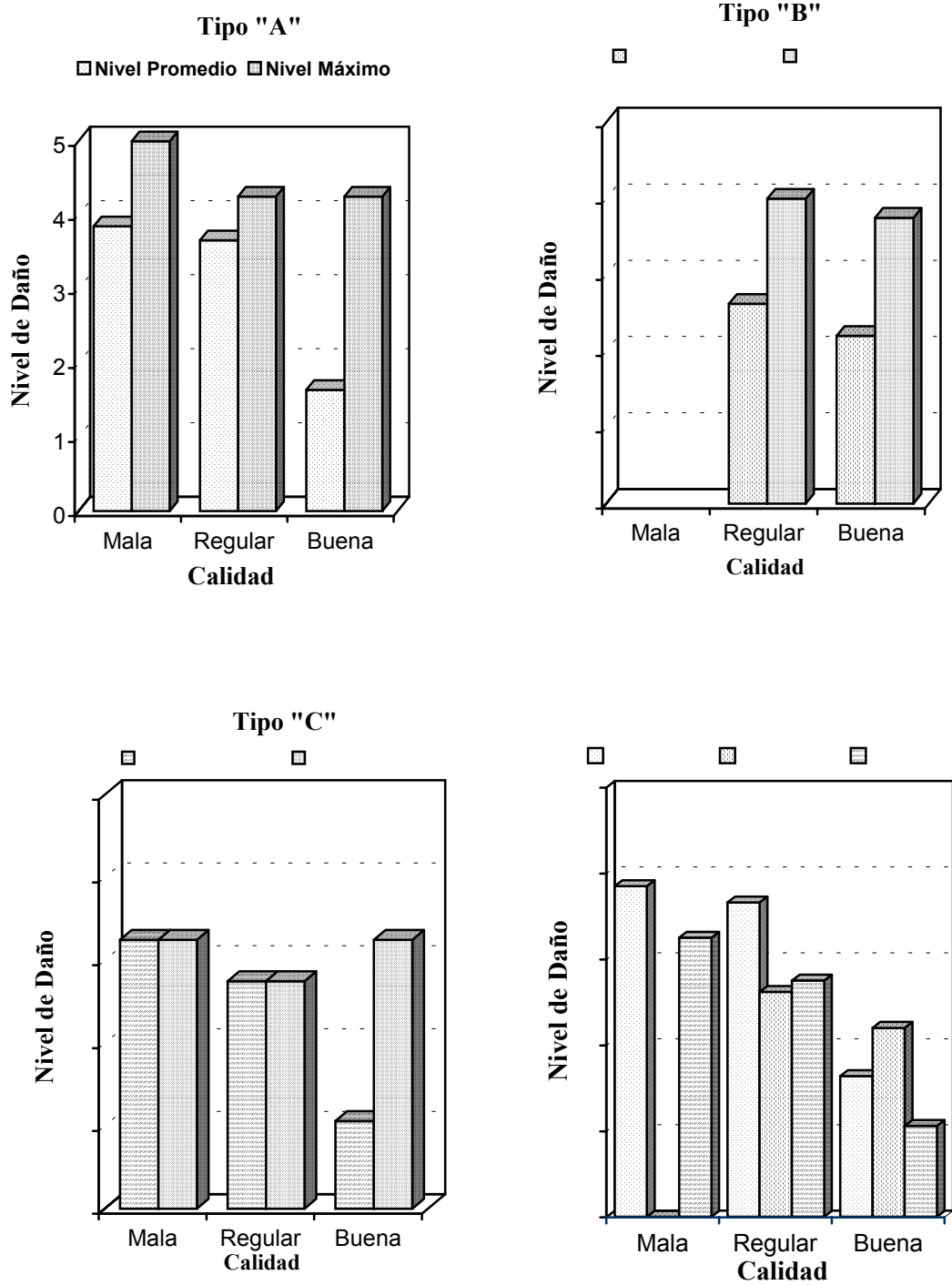


Figura 11. Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas en la ciudad de Moquegua.

Ver Figura 12

El rango de antigüedad entre las viviendas de tipo A es amplio, habiéndose evaluado viviendas mayores de 130 años; sin embargo, este rango de antigüedad no se ha observado en las viviendas de tipos B y C. La vivienda evaluada de tipo B más antigua tiene 25 años y la de tipo C del orden de 30 años. Según las denominaciones de la antigüedad de las viviendas, en Moquegua se han evaluado viviendas recientes (menor a 25 años), medianamente antiguas (25-50 años), antiguas (50 a 100 años) y muy antiguas (mas de 100 años).

En la Figura 12 se presenta la distribución del tipo de vivienda evaluada en Moquegua, según su antigüedad. Así, las viviendas de Tipo A, se encuentran en el extremo oeste de la ciudad, en el Cercado Monumental, en los PP. JJ. San Francisco, El Siglo y Mariscal Nieto. Las viviendas evaluadas de tipo B, en su mayoría se ubican en el Programa Municipal de Vivienda Pampas de San Antonio, en San Francisco, Pueblo Joven Mariscal Nieto y en el Cercado Monumental. Las viviendas evaluadas de tipo C, se distribuyen en el Cercado Monumental, en las Urbanizaciones Primavera, San Bernabé, M. Cabello de Carbonel, en San Francisco, San Antonio y en el distrito de Samegua.

La edad de las viviendas evaluadas en la ciudad de Moquegua, en términos de porcentaje, se representa en la Figura 13. En el caso de las viviendas de tipo A, el 72% son recientes (menor a 25 años), el 14 % son medianamente antiguas (25 a 50 años). En las viviendas de tipo B, el 97% son recientes. Para las viviendas de tipo C, el 91% son recientes y el 9 % medianamente antiguas.

Distribución de Daños

Los valores de niveles de daño y calidad de construcción de las viviendas evaluadas en la ciudad de Moquegua, se presentan en la Figura 14. En esta figura se observa que las viviendas de Tipo A, de mala y regular calidad, presentan niveles de daño 4, 4⁺ y 5 en el Cercado Monumental, en los PP JJ, San Francisco, El Siglo y Mariscal Nieto, así mismo en las Asociaciones Virgen de las Mercedes y Ramiro Priale. Los niveles de daño 3 y 3⁺ también se presentan en viviendas de mala y regular calidad en el Cercado Monumental, en el Programa Municipal de Vivienda Pampas de San Antonio, en los PP JJ, San Francisco, El Siglo y en el Distrito de Samegua.

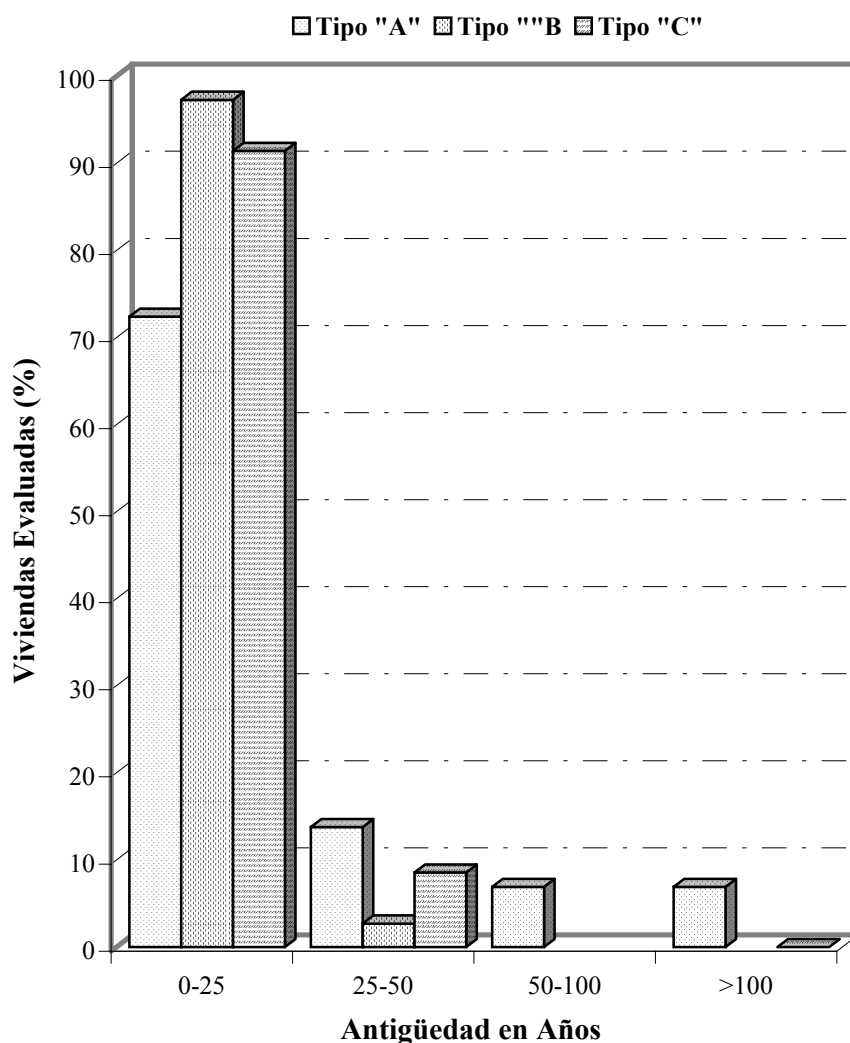


Figura 13. Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas, en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la ciudad de Moquegua.

Las viviendas evaluadas de Tipo B de regular calidad, presentan de manera puntual el valor de nivel de daño 4 en la Urbanización San Antonio y en el Pueblo Joven San Francisco. Niveles de daño 3⁺ y 3 se presentan en viviendas de regular calidad de la Urbanización Villa San Antonio y en el Programa Municipal de Vivienda Pampas de San Antonio.

Ver Figura 14

Las viviendas evaluadas de Tipo C, se caracterizan porque en su mayoría no han sufrido daño, aunque los niveles de daño máximo alcanzan los valores 3 y 3⁺ en viviendas de mala, regular y buena calidad del Cercado Monumental, en el Programa Municipal de Vivienda Pampas de San Antonio y en el Pueblo Joven San Francisco.

Conclusiones

En la ciudad de Moquegua, el valor promedio de intensidad evaluado es de grado 6 MSK. Sin embargo, el valor máximo de intensidad 6⁺ MSK fue evaluado en los PP. JJ. El Siglo y San Francisco, en las Asociaciones de Vivienda José Olaya y Virgen de las Mercedes y en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio.

El valor de nivel de daño máximo en viviendas evaluadas de tipo A, alcanzó el colapso (nivel 5) en los PP. JJ. Mariscal Nieto y San Francisco y en El Cercado Monumental. En las de tipo B, sufrieron destrucción parcial (nivel 4) en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio y en el PP JJ San Francisco. Mientras que, en las de tipo C de manera puntual presentaron daños moderados (nivel 3) en el PP. JJ. San Francisco y en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio.

Los daños ocasionados por el terremoto en las viviendas de tipo A y B, son mayores que en las viviendas de tipo C. En el caso de las viviendas de tipo A, la antigüedad y el número de sismos que estas han soportado contribuyeron al deterioro progresivo de las mismas. Las viviendas de tipo B, han fallado por la falta de técnicas de construcción y por el uso de materiales de mala calidad.

El tipo de suelo es un factor importante que influye en el comportamiento de las viviendas frente a los terremotos. En algunas áreas de la ciudad de Moquegua, como en el Programa Municipal de Vivienda Pampas San Antonio, se ha observado que las viviendas han sufrido mayores daños con respecto a otras, posiblemente debido a fenómenos de amplificación ondas por efecto del tipo de suelos.

La historia sísmica de Moquegua confirma que la ciudad se encuentra en una de las zonas sismogéncias más importantes del Perú; por lo tanto, esta característica debe de tenerse en cuenta para la expansión urbana, lo que hace urgente contar con estudios

de planificación urbana, dando mayor énfasis a los programas de microzonificación sísmica. En el caso de ausencia de sismos, se debe de contar con programas de prevención sísmica y control sobre la elección de futuras áreas de expansión urbana.

Nombre de archivo: macro3
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 03:42 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 03:42 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:10 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 16
Número de palabras: 1,917 (aprox.)
Número de caracteres: 10,927 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Ciudad de Tacna

Los reportes del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), indican que el terremoto del 23 de Junio ocasionó en el Departamento de Tacna la muerte de 14 personas, 363 heridos y 74109 damnificados, además de 16090 viviendas afectadas y 5396 destruidas.

A fin de realizar el estudio de las intensidades sísmicas en el área urbana de Tacna fue necesario realizar un trabajo de campo de 3 días, tiempo durante el cual se procedió, sobre un plano catastral a cuadrillar la ciudad en áreas unitarias de 1 km por lado. En cada área se consideró conveniente realizar encuestas en tres o cuatro puntos, llegándose a obtener un total de 92 muestras. Los formularios utilizados corresponden a los “Formatos de Encuesta de Intensidades y Efectos en Construcciones”. La interpretación de los datos de campo considera la elaboración de mapas sobre intensidades macrosísmicas, antigüedad de viviendas y niveles de daño. Asimismo, como complemento se construye algunos cuadros estadísticos.

Distribución de Intensidades

En la Figura 15, se presenta el mapa de distribución de intensidades evaluadas en la ciudad de Tacna. En esta figura se observa que el máximo valor de intensidad fue de 7⁻ MSK en los Distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva. De manera general los valores de intensidad 6, 6⁻ y 5⁺ MSK se presentan en el Cercado, en el Distrito Pocollay, en el Centro Poblado Menor Augusto B. Leguia y en el Cono sur de la ciudad de Tacna (Distrito Gregorio Albarracín Lanchipa).

La correlación realizada entre el tipo de suelo y los valores de intensidad máxima, ha permitido observar que las áreas en donde predominaron las intensidades de 6⁺ y 7⁻ MSK (Distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza), el suelo está conformado por una importante capa de relleno con arena arcillosa y grava pobremente gradada. También, en estas áreas se encuentra costras salinas impuras de cloruro de sodio, las mismas que actúan como cementante de materiales tufaceos y arenosos dando lugar a la formación de costras o lentes superficiales. En algunos sectores de estos distritos, los suelos han colapsado y/o sufrido un reacomodo violento con la consecuente pérdida de volumen, dando así origen a

asentamientos excesivos y desiguales en viviendas de tipo C. Asimismo, en la Figura 15, se observa que en la zona periférica del Cercado, en el Distrito de Pocollay, en las márgenes del Distrito Gregorio Albarracín Lanchipa y al oeste del Centro Poblado Menor Augusto B. Leguía, las intensidades máximas son de 6 y 6⁻ MSK. En estos sectores los suelos están conformados por uno o varios estratos de relleno que van desde tierra de cultivo hasta arenas, arcillas, limos orgánicos o gravas uniformes.

La intensidad 5⁺ predomina en el Cercado, en el Distrito Gregorio Albarracín Lanchipa y en el Centro Poblado Menor Augusto B. Leguía. Asimismo, en algunas áreas del Cercado los suelos están compuestos de gravas y arenas, y en otros por arcilla limosa compacta con partículas de piedras angulosas y redondeadas de naturaleza ígnea.

El total de valores de intensidad MSK obtenidos en cada punto de evaluación de la ciudad de Tacna, son los siguientes: el valor máximo de grado 7⁻ MSK se obtuvo en 27 muestras, 6⁺ MSK en 4, 6MSK en 18, 6⁻ MSK en 16 y el valor 5⁺ MSK en 27 muestras.

Evaluación de Daños

En la ciudad de Tacna, el número total de viviendas evaluadas fue de 92 y de estas, 39 son de tipo C, 44 de tipo B y 9 de tipo A. En la Figura 16 se representa, en términos de porcentaje, la calidad de la construcción y el tipo de vivienda evaluada. Así, para las viviendas de tipo A, el 67% son de mala calidad y el 33% de regular calidad. En las viviendas de Tipo B, el 70% son de regular calidad y el 25% de buena calidad. En el caso de las viviendas de Tipo C, el 87% son viviendas de buena calidad y las restantes son de mala y regular calidad.

Características de las Viviendas

Las características de las viviendas evaluadas en la ciudad de Tacna, según la escala MSK son las siguientes:

- *Viviendas de Tipo "A"*. Este tipo de vivienda no responde bien ante la ocurrencia de un evento sísmico, debido a la falta de técnicas constructivas y asesoramiento profesional, además por la mala calidad de los materiales utilizados. Estas viviendas

Ver Figura 15

se encuentran en menor porcentaje y se caracterizan por el predominio del adobe, barro muy pobre, sin refuerzo estructural y techos típicos de forma triangular armados con vigas de madera cubiertos por quincha. Este tipo de viviendas se encuentran distribuidas en el cercado de la ciudad de Tacna.

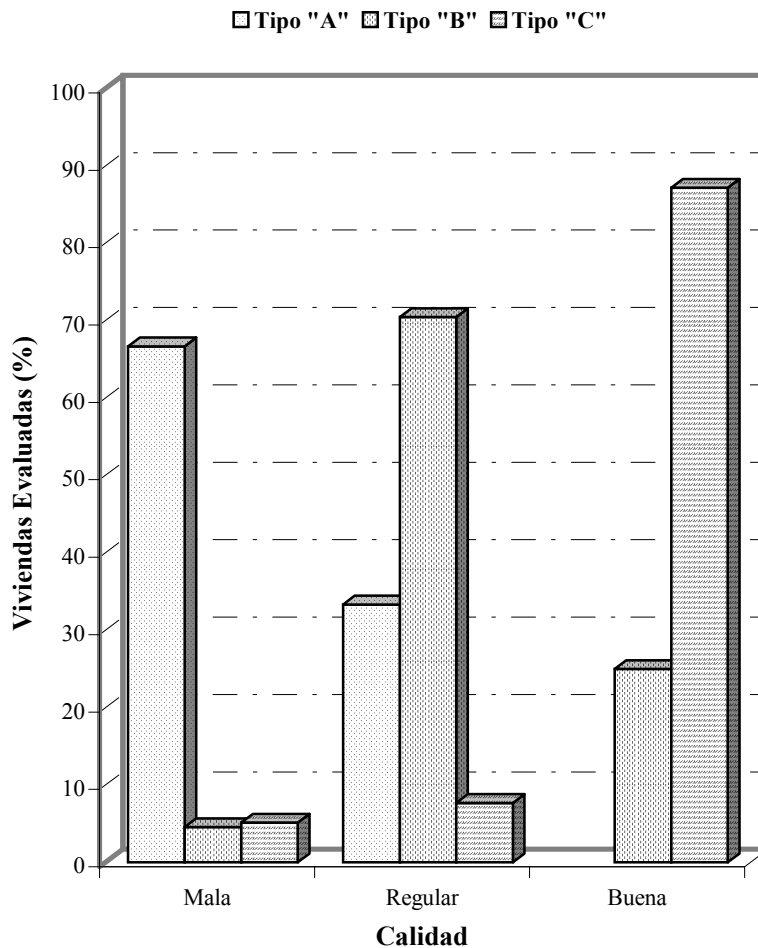


Figura 16. Porcentaje total de viviendas evaluadas en la ciudad de Tacna considerando el tipo y calidad de la construcción.

- *Viviendas de tipo "B"*. Estas viviendas responden mejor ante un sismo que las de tipo A, debido a la calidad del material empleado y por presentar mejor técnica de construcción. Este tipo de vivienda se encuentra en mayor porcentaje y se caracterizan porque están construidas sobre la base de bloquetas de cemento con buen mortero de cemento-arena, además de una albañilería homogénea pero sin refuerzo de concreto armado en los muros. Las viviendas están distribuidas en toda el área urbana de la ciudad de Tacna y en los Distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva.

- *Viviendas de tipo "C"*. Estas viviendas por sus cualidades de refuerzo, soportan bien a las perturbaciones sísmicas y se caracterizan por estar construidas con ladrillo y bloquetas reforzadas con elementos de concreto armado, vigas y columnas de amarre, además de presentar buena cimentación con mortero de cemento-arena. Las viviendas de este tipo se encuentran distribuidas en toda la zona urbana de la ciudad de Tacna y en los Distritos de Gregorio Albarracín Lanchipa, Pocollay, Ciudad Nueva y Alto de la Alianza.

Frecuencia de Daños

Con la información recopilada se ha elaborado cuadros estadísticos relacionados con las características de las viviendas evaluadas, antigüedad, calidad de la construcción y con los daños producidos en las mismas.

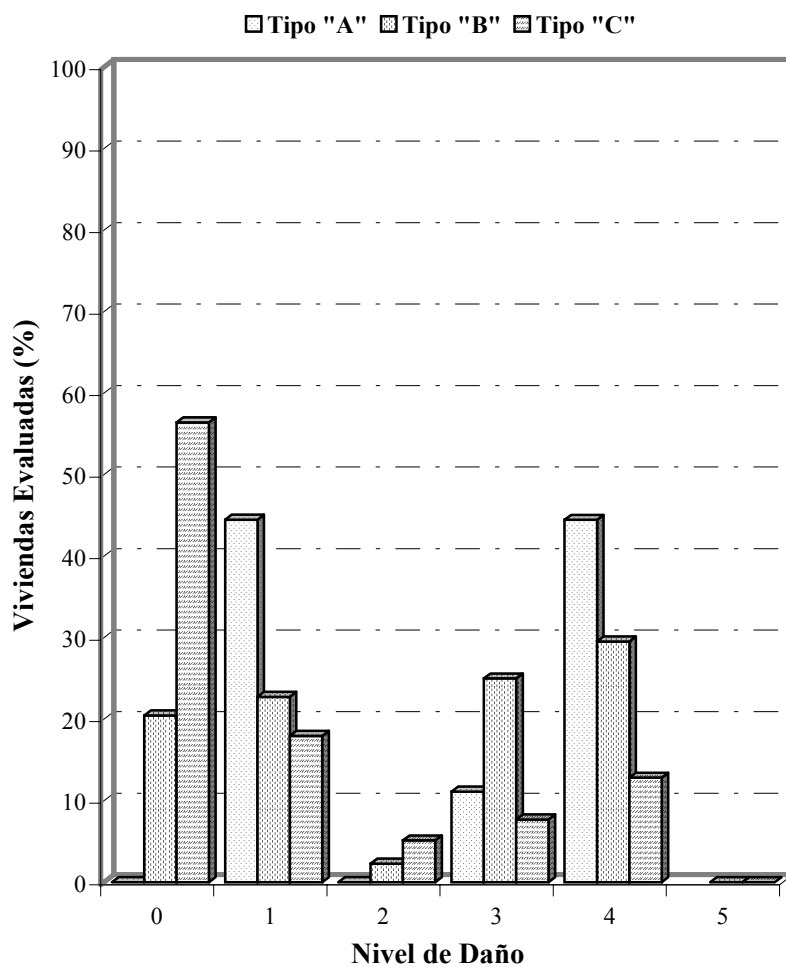


Figura 17. Frecuencia de daños en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la ciudad de Tacna.

En la Figura 17 se presenta en términos de porcentaje, las viviendas evaluadas y los niveles de daño para cada uno de los tres tipos de viviendas. En el caso de las viviendas de tipo A, existen dos niveles con un porcentaje del 45% (daños leves, nivel 1 y destrucción parcial, nivel 4) y otro del 10% para las que tienen daños severos (nivel 3). En el caso de las viviendas de Tipo B, el 20% no presentan daño, el 22% tienen daños leves (nivel 1), el 25% daños severos (nivel 3) y el 29% destrucción parcial (nivel 4). Para las viviendas de Tipo C, el 56% no han sufrido daño, el 18 % tienen daños leves, el 8% daños severos y el 13% han sufrido destrucción parcial.

Asimismo, se ha determinado el nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de los tres tipos de viviendas evaluadas (Figura 18). En las viviendas de tipo A, el nivel de daño máximo es 4 (viviendas de mala y regular calidad) y el nivel de daño promedio 3^- en viviendas de mala calidad y 2 en las de regular calidad. En las viviendas de tipo B, el nivel de daño máximo es 4^+ para los tres tipos de vivienda y el nivel de daño promedio 4^+ en viviendas de mala calidad, 2^+ en las de regular calidad y 1^+ en las de buena calidad. Para las viviendas de tipo C, el nivel de daño máximo es 4^+ en viviendas de mala calidad, 4^- en las de regular calidad y 3 en las de buena calidad; mientras que, el nivel de daño promedio es 4 en viviendas de mala calidad, 2^+ en las de regular calidad y 1^- en las de buena calidad.

Influencia de la Antigüedad de las Viviendas

En la ciudad de Tacna, el rango de antigüedad de las viviendas evaluadas de tipo A es amplio, llegándose a considerar viviendas hasta con 100 años de antigüedad. Las viviendas de tipo B, tienen de 2 a 40 años de antigüedad y las de tipo C menos de 60 años. En resumen, en la ciudad de Tacna predominan las viviendas recientes (menores a 25 años) tanto para las de tipo A, como para las de los tipos B y C.

La distribución de los tipos de viviendas evaluadas, en función de su antigüedad, se presenta en la Figura 19. En esta figura se observa que las viviendas de Tipo A se ubican en su mayoría por el Cercado de la Ciudad, de manera puntual en el Distrito de Pocollay y en el Centro Poblado Menor Augusto B. Leguía con edades que van desde 10 hasta 100 años. Las viviendas de tipo B, se ubican en toda la ciudad de Tacna y en mayor número en el Cercado, en los Distritos de Gregorio Albarracín Lanchipa,

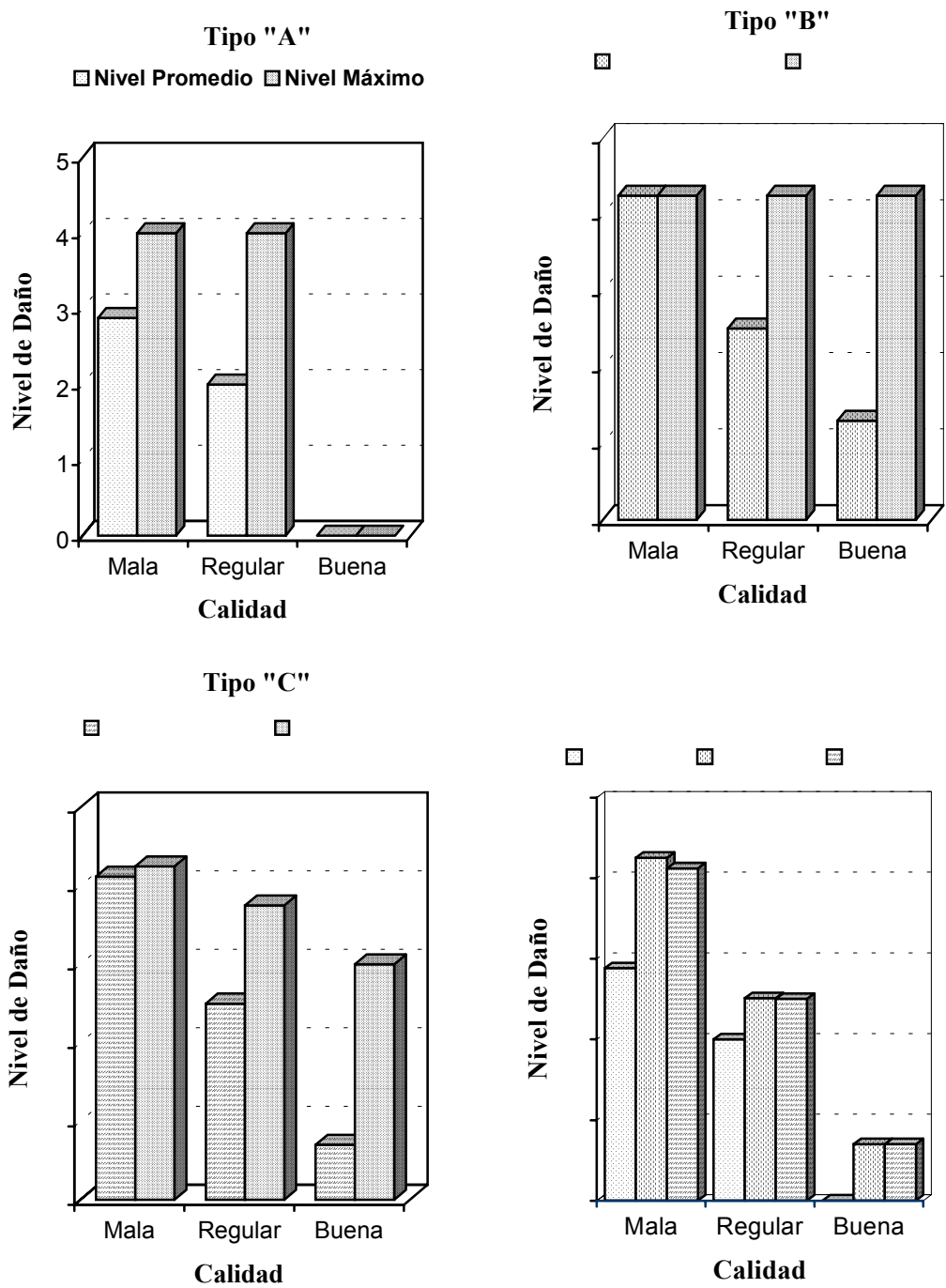


Figura 18. Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas evaluadas en la ciudad de Tacna.

Ver Figura 19

Pocollay, Ciudad Nueva, Alto Nueva Alianza y en el Centro Poblado Menor Augusto B. Leguía, siendo las edades de 2 a 40 años. Las viviendas de tipo C predominan en las Urbanizaciones nuevas y casi en toda la ciudad de Tacna con edades de 1 a 60 años de antigüedad.

La edad de las viviendas evaluadas en la ciudad de Tacna, en términos de porcentaje, se presentan en la Figura 20 y según esta, las viviendas de tipo A con edades menores a 25 años (viviendas recientes) y entre 25-50 años (viviendas medianamente antiguas) se encuentran en un 34%; mientras que, las antiguas en un 22% (50 a 100 años) y las muy antiguas en un 10% (mayores de 100 años). Las viviendas de tipo B

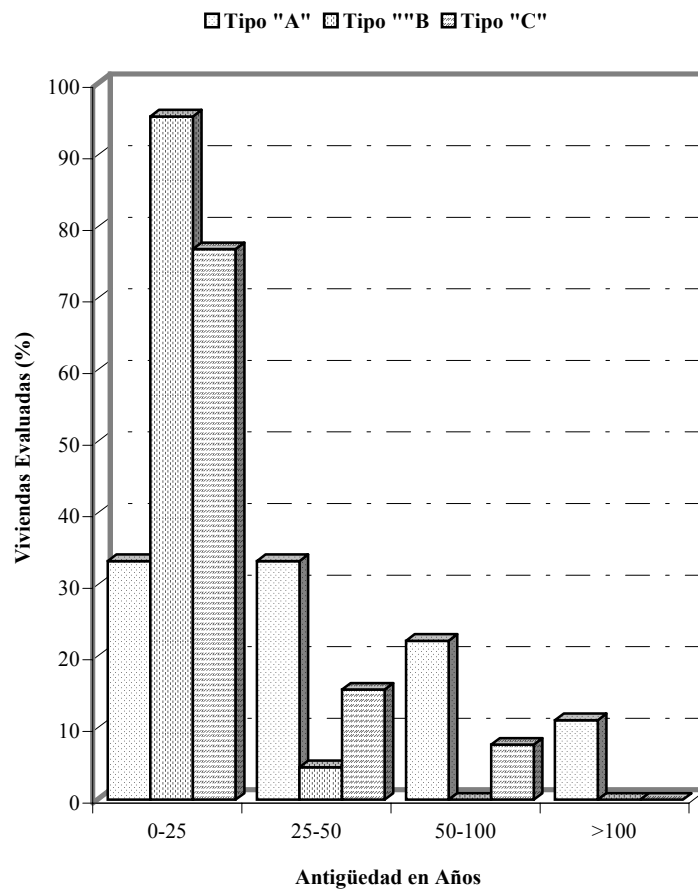


Figura 20. Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la ciudad de Tacna.

forman dos grupos, el primero con un 94% agrupa a las viviendas recientes (edad menor a 25 años) y el segundo, con un 6% a las viviendas medianamente antiguas (25 a 50 años). No se ha evaluado viviendas antiguas ni muy antiguas. En relación con las viviendas de tipo C, el 77% son viviendas recientes y el 15% tienen edades entre 25 y 50 años.

Distribución de Daños

Los valores de nivel de daño y calidad de las viviendas evaluadas en la ciudad de Tacna se presenta en la Figura 21 y en ella se observa que las viviendas de tipo A predominan en el Cercado y han sufrido en mayor número destrucción parcial (nivel 4), otras presentan daños leves (nivel 1) y severos (nivel 3). Las viviendas de Tipo B, han sufrido destrucción parcial (nivel 4⁺ y 4) en los Distritos de Alto de la Alianza, Ciudad Nueva y en la Asociación Vista Alegre, del Distrito de Pocollay (viviendas de mala, regular y buena calidad); viviendas con daños severos (nivel 3⁺) han sido evaluadas en los Distritos de Ciudad Nueva, Alto de la Alianza y en el Centro Poblado Menor Augusto B. Leguía. Las viviendas de Tipo C, también han sufrido destrucción parcial y de manera puntual han colapsado (nivel de daño 4 y 4⁺) en los Distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza (viviendas de buena y mala calidad). En la ciudad de Tacna, el 57 % de viviendas evaluadas de tipo C no han sufrido daño.

Conclusiones

En la ciudad de Tacna, se ha evaluado 92 viviendas, siendo el valor de intensidad promedio del orden de 6⁻ MSK, aunque valores de 7⁻ MSK han sido evaluados en los de Distritos de Alto de la Alianza y Ciudad Nueva. El tipo de suelo en estos distritos esta conformado por una capa de relleno de arena arcillosa y grava pobremente gradada.

El nivel de daño máximo en las viviendas de tipo A corresponde a destrucción parcial (nivel 4), siendo estas viviendas antiguas y de mala calidad, presentes principalmente en el cercado. En las viviendas de tipo B, los daños máximos alcanzaron destrucción parcial en viviendas recientes y de mala calidad distribuidas en los Distritos de Alto de la Alianza, Ciudad Nueva y en la Asociación Vista Alegre. En las viviendas de tipo C, el nivel de daño máximo también fue destrucción parcial en viviendas

Ver Figura 21

recientes de regular y buena calidad presentes en los Distritos de Alto de La Alianza y Ciudad Nueva.

En la ciudad de Tacna, el rango de antigüedad de las viviendas de tipo A es amplio, llegándose a evaluar viviendas hasta con 100 años de antigüedad; sin embargo, los mayores porcentajes de viviendas evaluadas corresponden a recientes y medianamente antiguas. Las viviendas de tipo B, en mayor porcentaje (96%) son recientes (edad menor a 25 años) y escasamente el 6% son medianamente antiguas (25 a 50 años). En el caso de las viviendas de tipo C, en su mayoría (77%) son recientes, el 15% son medianamente antiguas y las restantes son antiguas. De acuerdo a estos resultados se confirma que buen porcentaje de los pobladores de la ciudad de Tacna, continúan construyendo edificaciones de tipo B de mala y regular calidad, siendo notoria la falta de asesoramiento técnico y el uso de materiales de mala calidad.

Las viviendas de tipo A se distribuyen en su mayoría en el Cercado, las de tipo B en el Cercado y en los distritos de Albarracín Lanchipa, Pocollay, Ciudad Nueva, Alto de la Alianza y en el Centro Poblado menor Augusto B. Leguía. Las viviendas de tipo C predominan en las Urbanizaciones nuevas, en los Distritos de Ciudad Nueva, Alto de la Alianza y en algunas áreas del Cercado.

En algunas áreas de los Distritos de Ciudad Nueva y Alto de la Alianza, se ha observado mayor cantidad de daños con respecto a otras debido al fenómeno de amplificación de las ondas producidas por el tipo de suelos.

La historia sísmica de Tacna confirma que la ciudad se encuentra en una de las zonas sismogénicas más importantes de Perú; por lo tanto, esta característica debe de tenerse en cuenta para normar la expansión urbana. Ante estas evidencias, deben realizarse con urgencia estudios de planificación urbana dando énfasis a los programas de microzonificación sísmica. Durante el periodo de ausencia de sismos, se debe coordinar la realización de programas de prevención sísmica y mitigación de los efectos causados por los sismos. También se debe tener en cuenta la elección de futuras áreas de expansión urbana.

Nombre de archivo: macro4
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:12 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:12 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 14 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:11 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 16
Número de palabras: 1,957 (aprox.)
Número de caracteres: 11,157 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Localidad de Mollendo (Arequipa)

La evaluación de las intensidades macrosísmicas en la localidad de Mollendo se realizó durante 2 días de trabajo de campo, para tal fin sobre el plano catastral, la localidad ha sido cuadrillada con áreas de 1.4 km por lado, llegándose a considerar un total de 40 muestras.

Distribución de Intensidades

La severidad de sacudimiento del suelo evaluado en la ciudad de Mollendo, expresado en valores de intensidades macrosísmicas se muestra en la Figura 22. En esta figura se observa que el valor máximo de intensidad fue 6⁻ MSK presente en sectores ubicados en zonas de pendiente como María Parado de Bellido, Alto Inclán e Inca Atahualpa de Alto Las Cruces, así como en las calles Blondel, Comercio, Córdova, Iquitos, Carlos Baca Flor, Jr. Teófilo Núñez (cuadra 1) y en Prolongación Iquitos (cuadra 13) del Cercado de la ciudad. De manera puntual se ha obtenido el valor de intensidad 6⁻MSK en las Urbanizaciones Estibadores (Mz D), Magisterial (Mz B) y en la Asociación 7 de Junio (Mz C). El valor de intensidad 5⁺ MSK ha sido evaluado en las calles Carlos Baca Flor y Aurelio de la Fuente del Cercado, en las AVIS Los Pinos y César Vallejo, en la Asociación Obreros Municipales y en las Urbanizaciones Pacifico, Inclán (Av. Callao) y Las Cruces (Tumbes y Alipio Ponce).

En general, el tipo de suelo predominante en la ciudad de Mollendo esta conformado por una capa de 6 a 10 m de material aluvial y por debajo subyace roca metamórfica de naturaleza gnéssica.

Evaluación de Daños

El número total de viviendas evaluadas en la ciudad de Mollendo fue 40 y de estas, 2 corresponden al tipo A, 25 al tipo B y 13 al tipo "C". Según la Figura 23, el 100% de las viviendas de tipo A, son de mala calidad; mientras que, en las de tipo B predominan las de buena calidad (84%) sobre las de regular calidad (16%). En relación con las viviendas de tipo C, el 92% son de buena calidad y escasamente el 8% son de regular calidad.

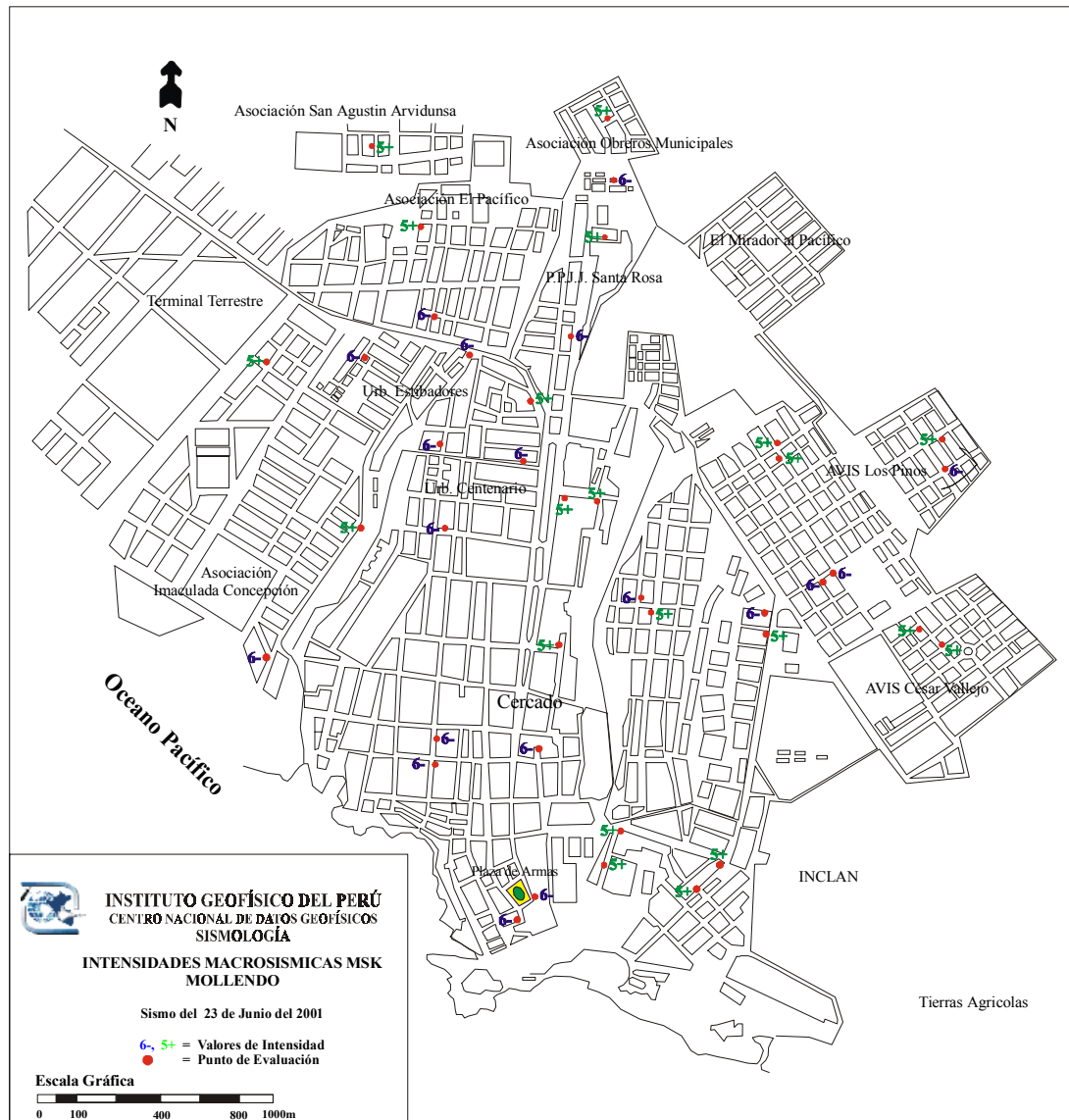


Figura 22. Mapa de Intensidad Macrosísmica MSK en la localidad de Mollendo (Arequipa) debidas al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001

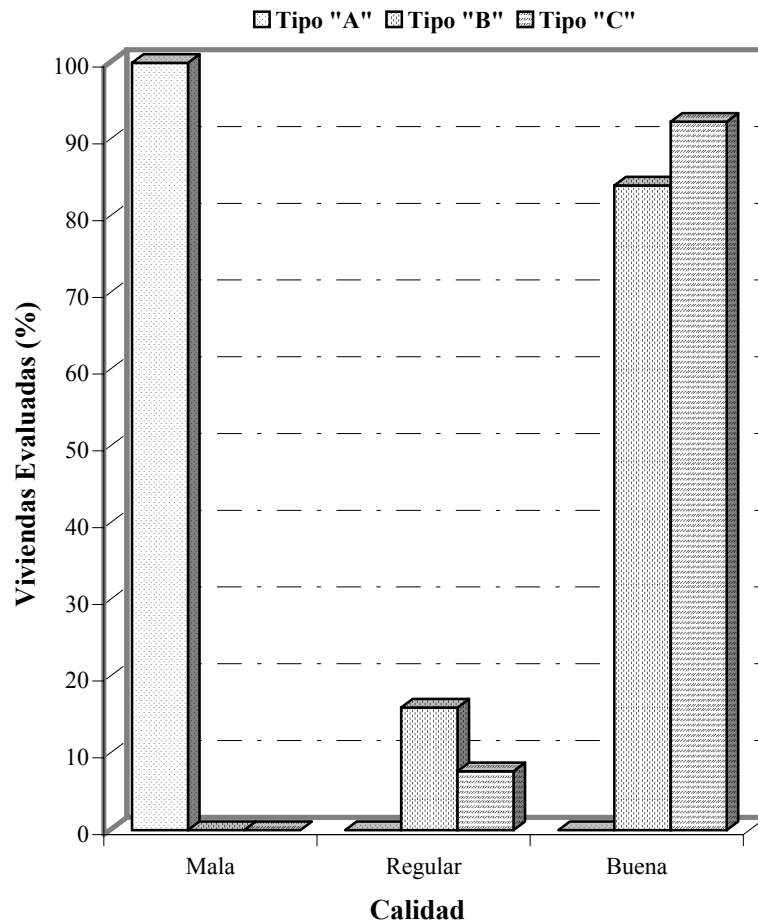


Figura 23. Porcentaje total de viviendas evaluadas en la ciudad de Mollendo considerando el tipo y la calidad de la construcción.

Características de las Viviendas

Las viviendas evaluadas en la ciudad de Mollendo, según la escala presentan las siguientes características:

- *Viviendas de tipo "A"*. Son viviendas construidas a partir de bloques de piedra, adobes, bloquetas de cemento y barro como mortero, además de techos de eternit y/o de madera. Dentro de este tipo se puede considerar las casas de madera muy deterioradas. Estas viviendas se encuentran en el Cercado de la ciudad y en la A.V.I.S. Los Pinos.

- *Viviendas de tipo "B"*. Estas viviendas fueron construidas con ladrillo y con buen mortero de cal-arena o cemento-arena, paredes bien trabadas con espesores que varían de 40 a 80 cm. En estas viviendas la unidad de albañilería es homogénea con buena cimentación, pero con paredes que no tienen refuerzo de concreto armado. Estas viviendas se encuentran distribuidas por toda la ciudad y en las A.V.I.S. Nuevo Perú, Asociación 7 de Junio y César Vallejo.
- *Viviendas tipo "C"*. Son construcciones de ladrillo reforzado con elementos de concreto armado, vigas y columnas de amarre con buena cimentación, además de techos de losa aligerada. Este tipo de viviendas pueden ser encontradas en las Urbanizaciones Miramar, Las Cruces, Estibadores, Los Pinos, Inclán

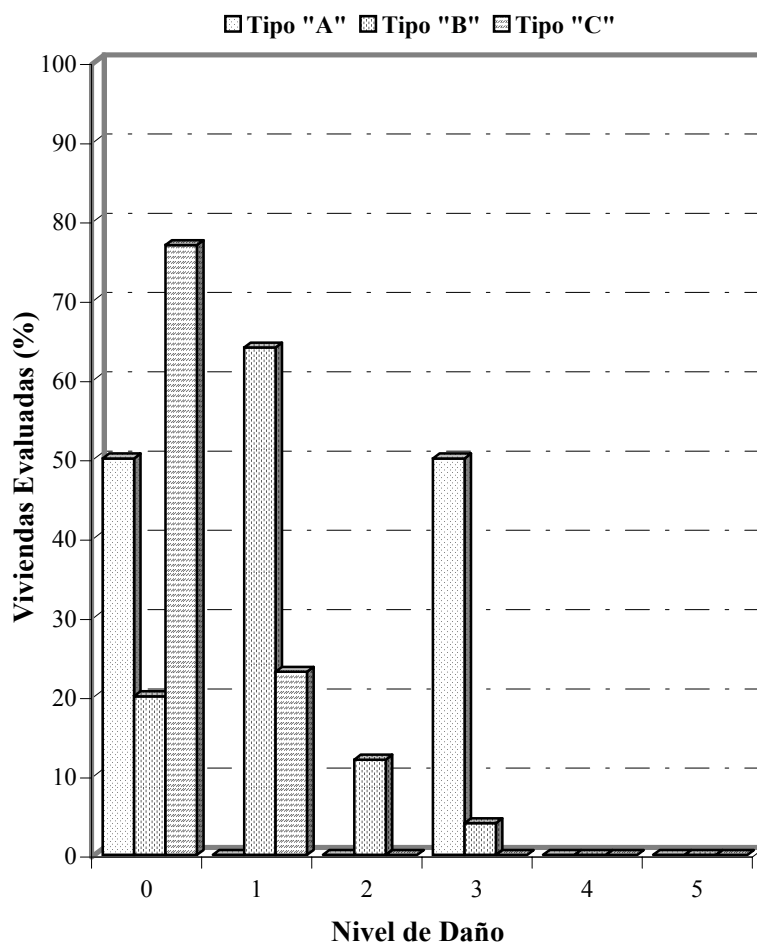


Figura 24. Frecuencia de daños en función del porcentaje de cada tipo de viviendas evaluada en la ciudad de Mollendo.

Frecuencia de Daños

En la Figura 24 se presenta en términos de porcentaje el número de viviendas evaluadas en la ciudad de Mollendo, en función del nivel de daño en los tres tipos de vivienda. Las viviendas de tipo A, presentan dos niveles con el mismo porcentaje (50%) para viviendas que no han sufrido daño y otro con daños severos (nivel 3). Para viviendas de tipo B, el 20% no han sufrido daño, el 64% tienen daños leves (nivel 1) y el 12% presentan daños moderados (clase 2). En el caso de viviendas las de Tipo C, el 77% no han sufrido daño y el 23% tienen daños leves (nivel 1) caracterizado por fisuras en el revestimiento de los muros.

El nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de cada tipo de vivienda se representa en la Figura 25. En las viviendas de tipo A, de mala calidad, el nivel de daño máximo fue 3 (daños severos) y el promedio de 1⁺ (daños leves). Las viviendas de tipo B, de regular calidad, también alcanzaron el nivel 3 (daños severos) y nivel 1 (daños leves); mientras que, en las viviendas de buena calidad el nivel de daño máximo fue leve (nivel 1⁻) y en este caso, no se llegó a evaluar viviendas de mala calidad. Las viviendas de tipo C de buena calidad presentaron daño máximo de nivel 1 (daños leves) y en general, no se ha evaluado viviendas de mala y regular calidad.

Antigüedad de las Viviendas

En la ciudad de Mollendo se ha evaluado únicamente dos viviendas de tipo A con edades de 5 años (reciente) y 120 años (muy antigua). Las viviendas evaluadas de tipo B y C presentan edades recientes (4 años) y antiguas (65 a 80 años). En la Figura 26, en términos de porcentaje, se representa el número de viviendas evaluadas en función de su antigüedad y tipo. Las viviendas de tipo A, presentan dos porcentajes con el 50 % cada una, para las recientes y muy antiguas. Las viviendas de tipo B, el 64 % son recientes y el 28 % son medianamente antiguas. En el caso de las viviendas de tipo C, el 54 % son recientes y el 31 % son medianamente antiguas.

La distribución de los tipos de viviendas y su antigüedad, se representa en la Figura 27 y en ella se observa que las de Tipo A se ubican en el Cercado y en la A.V.I.S Los Pinos. Las de tipo B están distribuidas por toda la ciudad con ligero incremento en

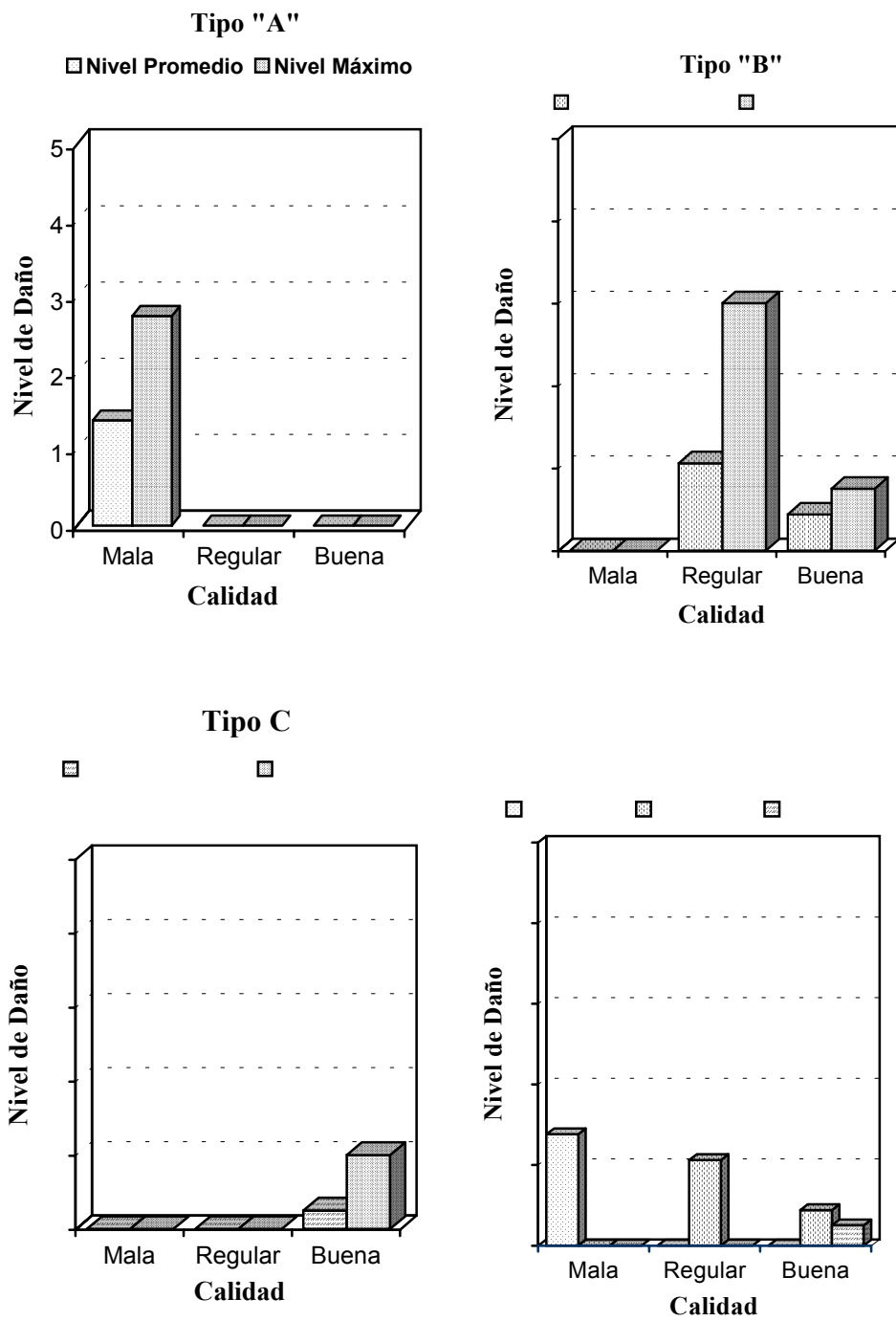


Figura 25. Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas evaluadas en la ciudad de Mollendo.

el Cercado (Aurelio de la Fuente), en las Asociaciones Obreros Municipales 7 de Junio y en Prolongación Iquitos. Las viviendas de tipo C, se encuentran en las urbanizaciones Estibadores, César Vallejo, Las Cruces y Alto Inclán.

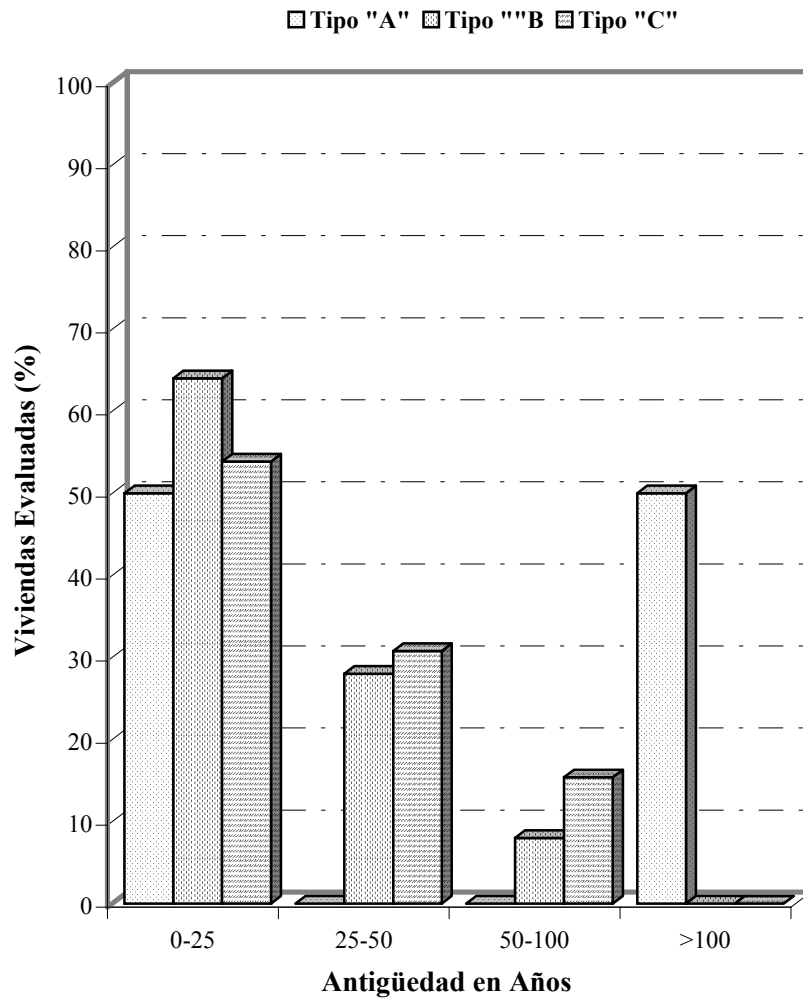


Figura 26. Histograma del porcentaje de viviendas evaluadas en función de su antigüedad y tipo, en la ciudad de Mollendo.

Distribución de Daños

Los valores de nivel de daño y la calidad de las viviendas de la ciudad de Mollendo se presenta en la Figura 28. En la figura se observa que los daños de nivel 2 y 3 se encuentran en viviendas ubicadas en el Cercado, en la Urbanización Estibadores y en la Asociación Obreros Municipales. Viviendas con niveles de daño 1 pueden ser ubicadas en el Cercado y en la Urbanización Estibadores. En general, las viviendas de tipo A han sufrido daños severos, las de tipo B daños leves a moderados y las de tipo C solamente daños leves.

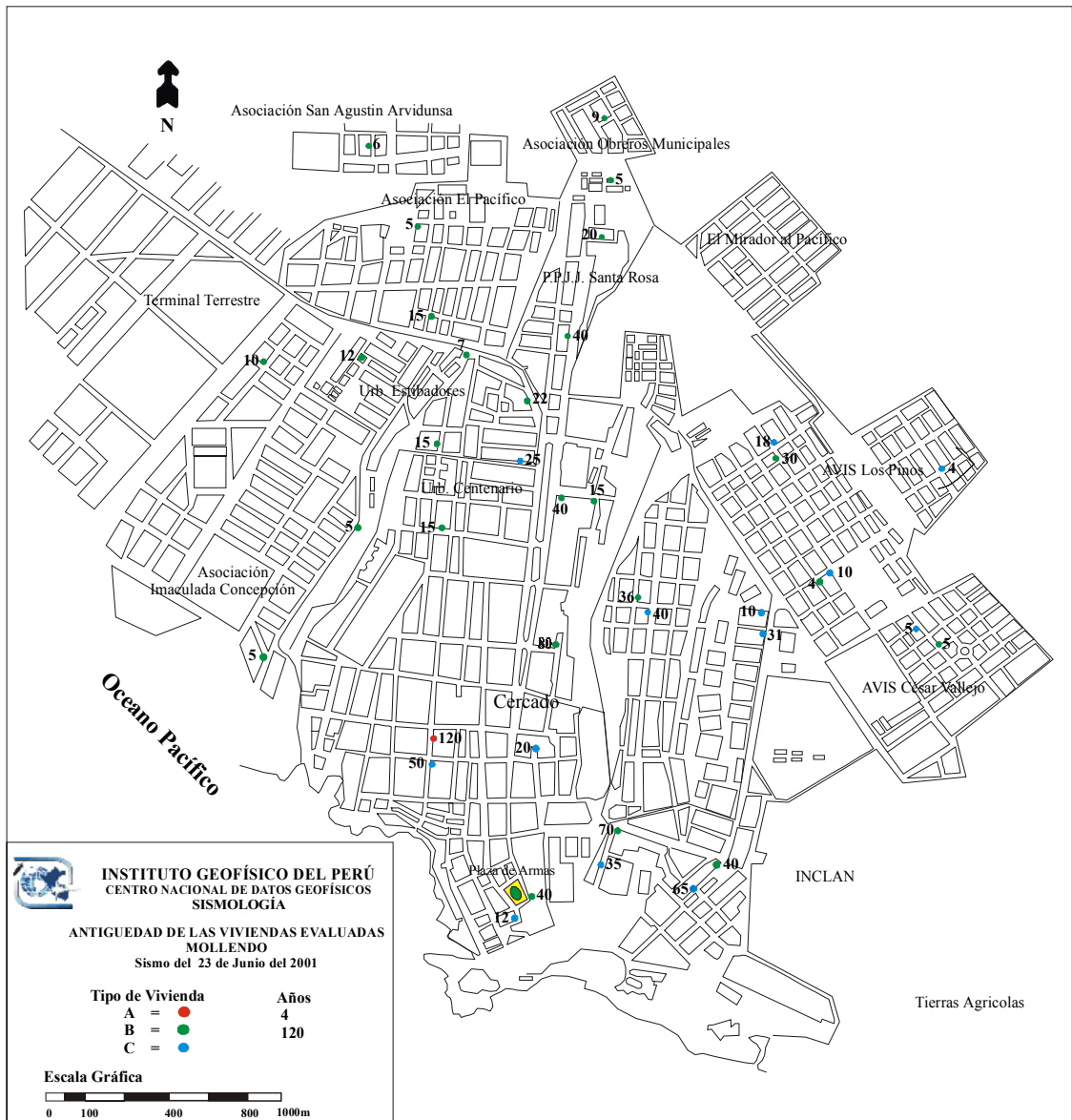


Figura 27. Mapa de tipo de vivienda en función de su antigüedad en la localidad de Mollendo

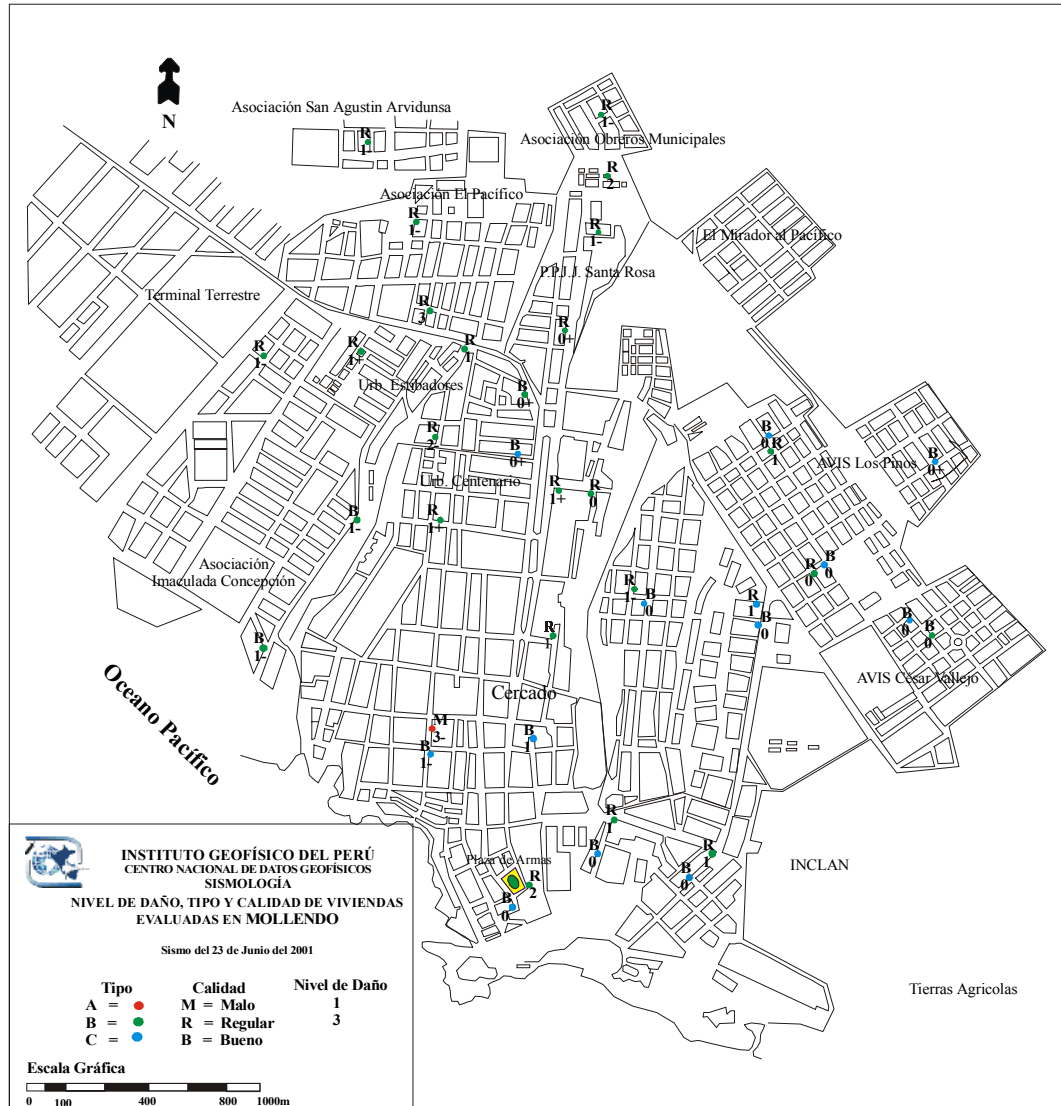


Figura 28. Mapa de nivel de daño, tipo y calidad de las viviendas evaluadas en la localidad de Mollendo

Conclusiones

El valor promedio de intensidad ocasionado por el terremoto del 23 de Junio en la ciudad de Mollendo fue de 5⁺ MSK, aunque su valor máximo de 6 MSK se evaluó en viviendas ubicadas en el Cercado y en las Urbanizaciones Centenario y Estibadores. En Mollendo, el 20% de las viviendas de tipo B no ha sufrido daño y el 64% presentan daños leves. En las viviendas de tipo C, el 77% no ha sufrido daño y el 23% tienen daños leves.

La historia sísmica de la ciudad de Mollendo esta ligada a la del Departamento de Arequipa y ambas son parte de la zona sismogénica más importante del Perú; por lo tanto, es necesario que esta característica se tenga en cuenta al momento de proyectar la expansión urbana de la ciudad.

Nombre de archivo: macro5
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:16 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:16 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:14 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 1,035 (aprox.)
Número de caracteres:5,902 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Localidad de Punta de Bombón (Arequipa)

La evaluación de las intensidades macrosísmicas en la localidad de Punta de Bombón se realizó durante 1 día de trabajo de campo y para tal fin, la ciudad fue cuadrillada sobre su plano catastral con áreas de 140x240 m llegando a obtenerse 43 muestras.

Distribución de Intensidades

En la ciudad de Punta de Bombón, según la Figura 29, los valores máximos de intensidad fue de 6⁺ MSK evaluados en el sector de El Crucero y en los alrededores de la Plaza de Armas. Los valores de 6⁻ y 6 MSK fueron evaluados en las avenidas La Punta, Ernesto de Olazábal, Colon y hacia el norte de la Plaza de Armas. Estos valores altos de intensidad pueden estar asociados al tipo de suelo característico del lugar conformado por suelos arenosos poco consolidados acompañado de terrazas de arena consolidada. Además, en los alrededores de la ciudad el suelo es arenoso en proceso de consolidación perteneciente a depósitos fluviales y aluviales. Asimismo, es importante considerar que el nivel freático promedio en la ciudad y alrededores se encuentra a una profundidad del orden de 3 metros.

Evaluación de Daños

El número total de viviendas evaluadas en la ciudad de Punta de Bombón fue 43 y de estas, 24 corresponden al tipo A, 11 al tipo B y 8 al tipo C. En la Figura 30, se presenta en términos de porcentaje, la relación existente entre la calidad y el tipo de vivienda evaluada. Así, el 46% de las viviendas de tipo A, son de mala calidad y el 54% de regular calidad. Para las viviendas de tipo B, el 73% son de regular calidad y el 27% de buena calidad; mientras que, en las viviendas de tipo C el 25% son de regular calidad y el 75% de buena calidad. En el caso de las viviendas de tipo B y C, no se ha evaluado viviendas de mala calidad.

Características de las Viviendas

Las viviendas evaluadas en la ciudad de Punta de Bombón, según la escala MSK-64 presentan las siguientes características:

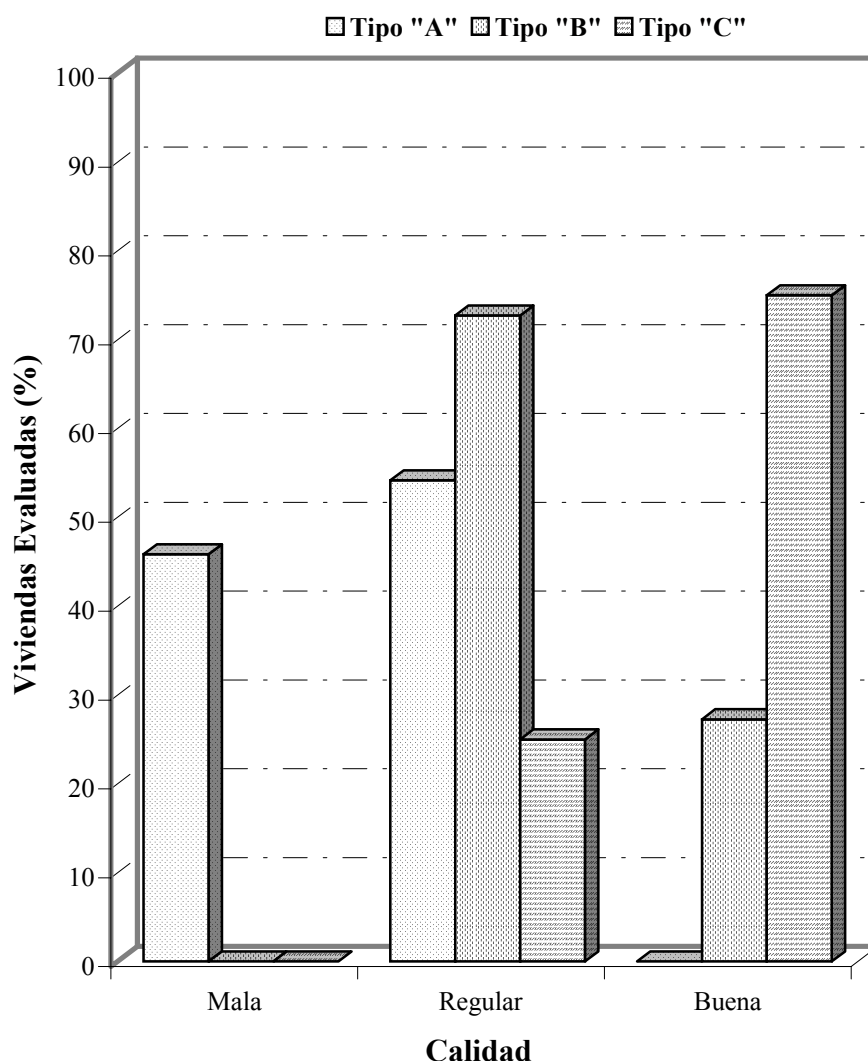


Figura 30. Porcentaje total de viviendas evaluadas en el distrito de Punta de Bombón considerando el tipo y la calidad de construcción.

- *Viviendas de tipo "A"*. Por lo general, en toda la localidad de Punta de Bombón, las viviendas fueron construidas a partir de adobe, sin ningún tipo de refuerzo y los muros tienen espesores de 30 a 80 cm; otros muros están conformados de carrizo y barro (quincha) en menor proporción. Asimismo, las viviendas presentan dinteles de madera sobrepuestos directamente en los muros de adobe. Actualmente, estas viviendas se encuentran deterioradas debido a su precaria construcción.
- *Viviendas de tipo "B"*. Estas viviendas fueron construidas a base de bloquetas, cuyos muros tienen 18 cm de espesor, además del uso de buen mortero de cemento-arena.

En estas viviendas la unidad de albañilería es homogénea con buena cimentación, pero con paredes que no tienen refuerzo de concreto armado. Los techos característicos son planos con losa de concreto armado apoyado sobre paredes sin viga o refuerzo. Este tipo de vivienda se encuentra esporádicamente en la localidad de Punta de Bombón. También pueden ser considerados dentro de este tipo, las construcciones de ladrillo sin reforzar aunque estas se encuentren en menor número.

- *Viviendas de tipo "C"*. Este tipo de viviendas son las resistentes a la ocurrencia de un sismo. Para su construcción se ha utilizado ladrillo reforzado con elementos de concreto armado, vigas, columnas de amarre con buena cimentación y techos de losa aligerada. Estas viviendas pueden encontrarse de forma esporádica en el Distrito de Punta de Bombón.

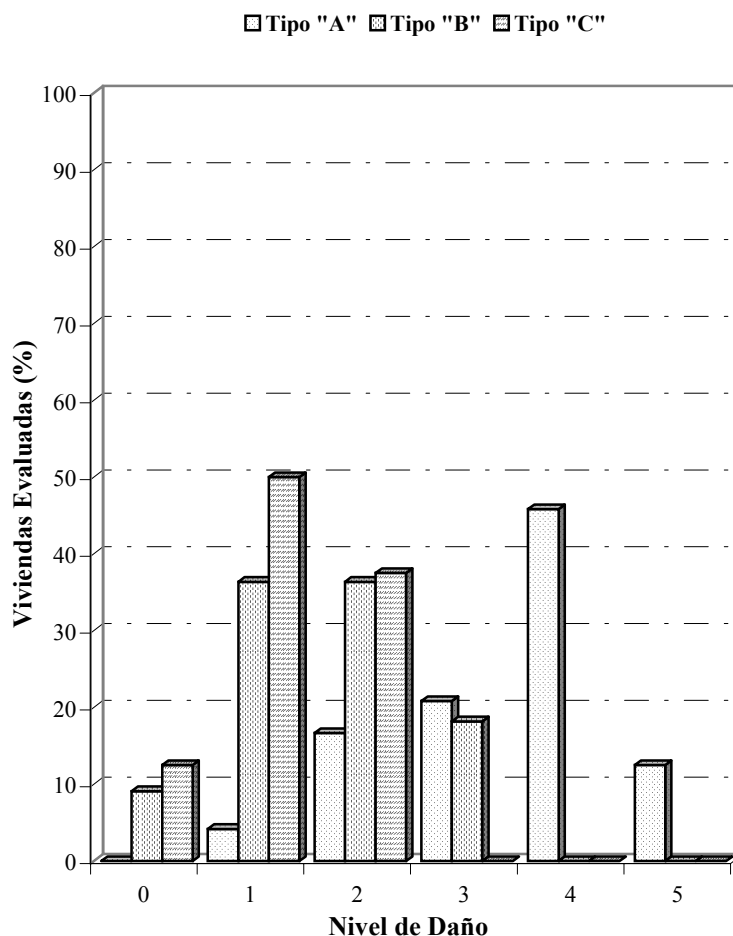


Figura 31. Frecuencia de daños en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la localidad de Punta de Bombón.

Frecuencia de Daños

En la Figura 31 se presenta, en términos de porcentaje, la relación existente entre las viviendas evaluadas y los niveles de daño en los tres tipos de viviendas existentes en Punta de Bombón. En esta figura se observa que el 17% de las viviendas de tipo A presentan daños moderados (nivel 2), el 21% daños severos (nivel 3), el 46% sufrieron destrucción parcial (nivel 4) y el 12% colapsaron (nivel 5). En el caso de las viviendas de tipo B, dos agrupaciones con el 37% cada uno, representan a las viviendas que sufrieron daños moderados (nivel 2) y daños leves (nivel 1), además de un 18% que presentaron daños severos (nivel 3). En relación con las viviendas de tipo C, el 12 % no sufrieron daños, el 50 % presentaron daños leves (nivel 1) y el 38% daños moderados (nivel 2). En general, los daños mayores se presentaron en las viviendas de tipo A.

El nivel de daño promedio y máximo en función del tipo y calidad de vivienda se muestra en la Figura 32. Así, en las viviendas de tipo A de mala y regular calidad, el nivel de daño máximo fue colapso (nivel 5); mientras que, el valor promedio en las de mala calidad fue destrucción parcial (nivel 4) y en las de regular calidad, daños severos (nivel 3). En las viviendas de tipo B de regular calidad, el nivel de daño máximo fue daños severos (nivel 3) y en las de buena calidad, los daños son moderados (nivel 2); mientras que, el nivel de daño promedio en las de regular calidad alcanzo a daños moderados (nivel 2⁻) y en las de buena calidad los daños son leves (1⁺). En general, estos valores decrecen en función de la calidad de la vivienda. En el caso de las viviendas de tipo C, el nivel de daño máximo en las de regular y buena calidad fue moderado (nivel 2⁻ y 2⁺ respectivamente); mientras que, el nivel de daño promedio en ambas fue leve (nivel 1⁺ y 1 respectivamente).

Antigüedad de las Viviendas

En la ciudad de Punta de Bombón, el rango de antigüedad de las viviendas de tipo A es amplio, habiéndose evaluado algunas con más de 100 años de antigüedad. En las viviendas de tipo B, las edades van de 2 a 40 años, aunque en este estudio se ha evaluado una con 80 años. Estos rangos de antigüedad no se observan en las viviendas de tipo C, en este caso la vivienda más antigua tiene 31 años. La distribución de los tipos de viviendas evaluadas en la localidad de Punta de Bombón y su antigüedad se representa en la Figura 33, en ella se observa que las viviendas de tipo A prácticamente

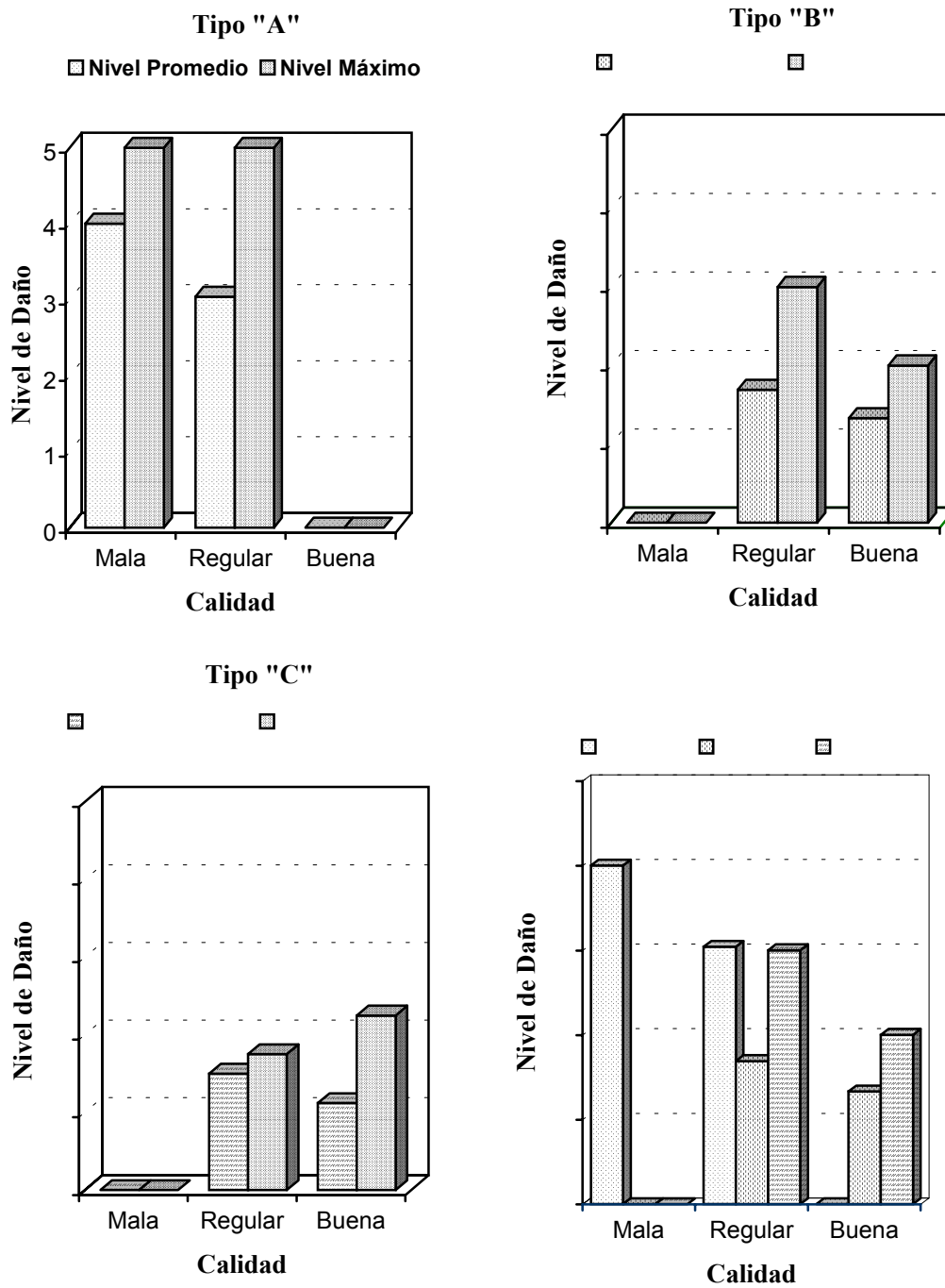


Figura 32. Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas evaluadas en el distrito de punta de Bombón.



Figura 33. Mapa de antigüedad de las viviendas evaluadas en la localidad de Punta de Bombón (Arequipa)

se distribuyen sobre toda la localidad, viviendas de los tipos B y C se encuentran hacia la zona de El Crucero, Av. Colon y por las proximidades de la Plaza de Armas. Asimismo, las edades de las viviendas en términos de porcentaje, se presenta en la Figura 34 y en ella se observa que el 41% de las viviendas de tipo A son recientes (menor a 25 años), el 21% son medianamente antiguas (25 a 50 años) y el 17% son muy antiguas (mayor a 100 años). Para las viviendas evaluadas de tipo B, el 91% son recientes (entre 0 a 25 años) y el 9% son antiguas (entre 51 a 100 años), no llegándose a evaluar viviendas medianamente antiguas. Las viviendas de tipo C en su mayoría son recientes, de tal manera que el 88% tienen edades menores a 25 años; mientras que, solo el 12% son medianamente antiguas (25 a 50 años).

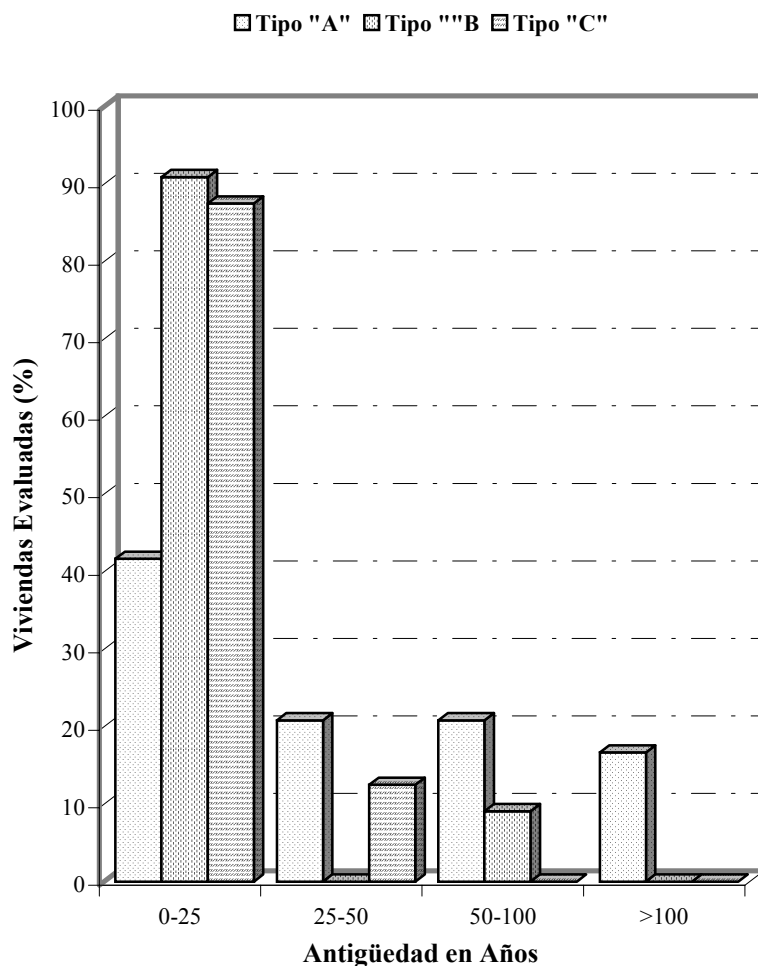


Figura 34. Porcentaje de viviendas evaluadas en función de la antigüedad y tipo de vivienda en la localidad de Punta de Bombón.

Distribución de Daños

Los valores del nivel de daño, tipo y calidad de las viviendas evaluadas en la localidad de Punta de Bombón se muestran en la Figura 35. Por ejemplo, las viviendas de tipo A son generalmente de mala y regular calidad y estas alcanzaron niveles de daño 4 y 5 en el sector El Crucero y en los alrededores de la localidad de Punta de Bombón. Niveles de daño 2 y 3 se encuentran en toda la localidad. Las viviendas de tipo B de regular calidad, presentan de manera puntual nivel de daño 3 en la calle Eguiluz y en la Av. La Punta y valores de daño 2⁻ en el sector El Crucero y en el extremo Oeste de Plaza de Armas. Las viviendas de tipo C, de buena calidad, se caracterizan porque presentan daños menores en relación con las de los tipos A y B con niveles máximos de 2⁻ y 2⁺ en las Avenidas Colón y Ernesto de Olazábal.

Conclusiones

En la localidad de Punta de Bombón, el valor promedio de intensidad ocasionado por el terremoto del 23 de Junio fue de 6⁻ MSK, aunque valores máximos de 6⁺ MSK han sido evaluados en los extremos Este y Oeste de la localidad de Punta de Bombón.

Los valores de nivel de daño máximo en viviendas de tipo A de mala y regular calidad alcanzaron el nivel 5 (colapso), siendo equivalentes al 12% del total evaluado y se encuentran en el sector de El Crucero, hacia el NE de la Plaza de Armas y por la calle Sucre. Las viviendas de tipo B, de regular calidad, sufrieron daños severos (nivel 3) en un 18% en la calle Eguiluz y en la Av. La Punta. Las viviendas de tipo C, de regular y buena calidad, sufrieron daños moderados (nivel 2) en las Avenidas Ernesto de Olazábal y Colón. En general, todas las viviendas evaluadas en Punta de Bombón son recientes (menores de 25 años).

Nombre de archivo: macro6
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:20 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:20 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:15 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 1,238 (aprox.)
Número de caracteres:7,060 (aprox.)

Intensidades Macrosísmicas en el Area Urbana de la Localidad de Ilo (Moquegua)

Para la evaluación de las intensidades macrosísmicas en la localidad de Ilo, fue necesario considerar 2 días de trabajo de campo, tiempo durante el cual se realizó el cuadrillado de la ciudad sobre su plano catastral con áreas de 420 m por lado llegándose a obtener 98 muestras.

Distribución de Intensidades

En la Figura 36, se observa que el máximo valor de intensidad obtenido en la ciudad de Ilo fue de grado 7 MSK, aunque mayoritariamente se presenta el valor de 6⁺ MSK. Ambos valores han sido evaluados en los sectores de Las Brisas III, Los Ángeles, Las Brisas V y Villa Progreso. Los valores de intensidad 6⁻ y 6 MSK predominan en los sectores de Bello Horizonte, Nueva Esperanza, Urbanización Huascar, Villa Hermosa y en el Centro Urbano de la ciudad; mientras que, valores de 5⁺ MSK han sido evaluados en la Pampa Inalámbrica, Las Gardenias, 24 de Octubre, Nuevo Ilo y en el Puerto de Ilo.

Es importante remarcar que en los sectores de Las Brisas III, Los Ángeles, Las Brisas V y Villa Progreso, el suelo está conformado por una capa de concreción calcárea (caliche), otra de conchuela y a continuación arena suelta. En estos sectores, el sismo produjo grietas y fisuras sobre la superficie del suelo, siendo el rumbo predominante de las grietas N40°E. En los alrededores del puerto de Ilo, el tipo de suelo está compuesto por depósitos marinos que dan lugar a la formación de dos terrazas, encontrándose la más alta a 165 m sobre el nivel del mar y viene a constituir Pampa Inalámbrica, superficie semiplana ligeramente inclinada hacia el Oeste. Esta terraza está conformada por una capa delgada de arena eólica de 0.20 a 0.30 m de espesor y a continuación una capa de fragmentos de roca intemperizada que alcanza hasta un metro de profundidad. En algunos sectores existen concreciones calcáreas (caliche) y vetillas de yeso con abundante restos de conchas. Por debajo de la capa intemperizada se puede encontrar roca andesítica.

Evaluación de Daños

En la ciudad de Ilo, el número total de viviendas evaluadas fue de 98 y de estas, 44 fueron de tipo “C”, 52 de tipo “B” y 2 de tipo “A”. En la Figura 37 se representa, en

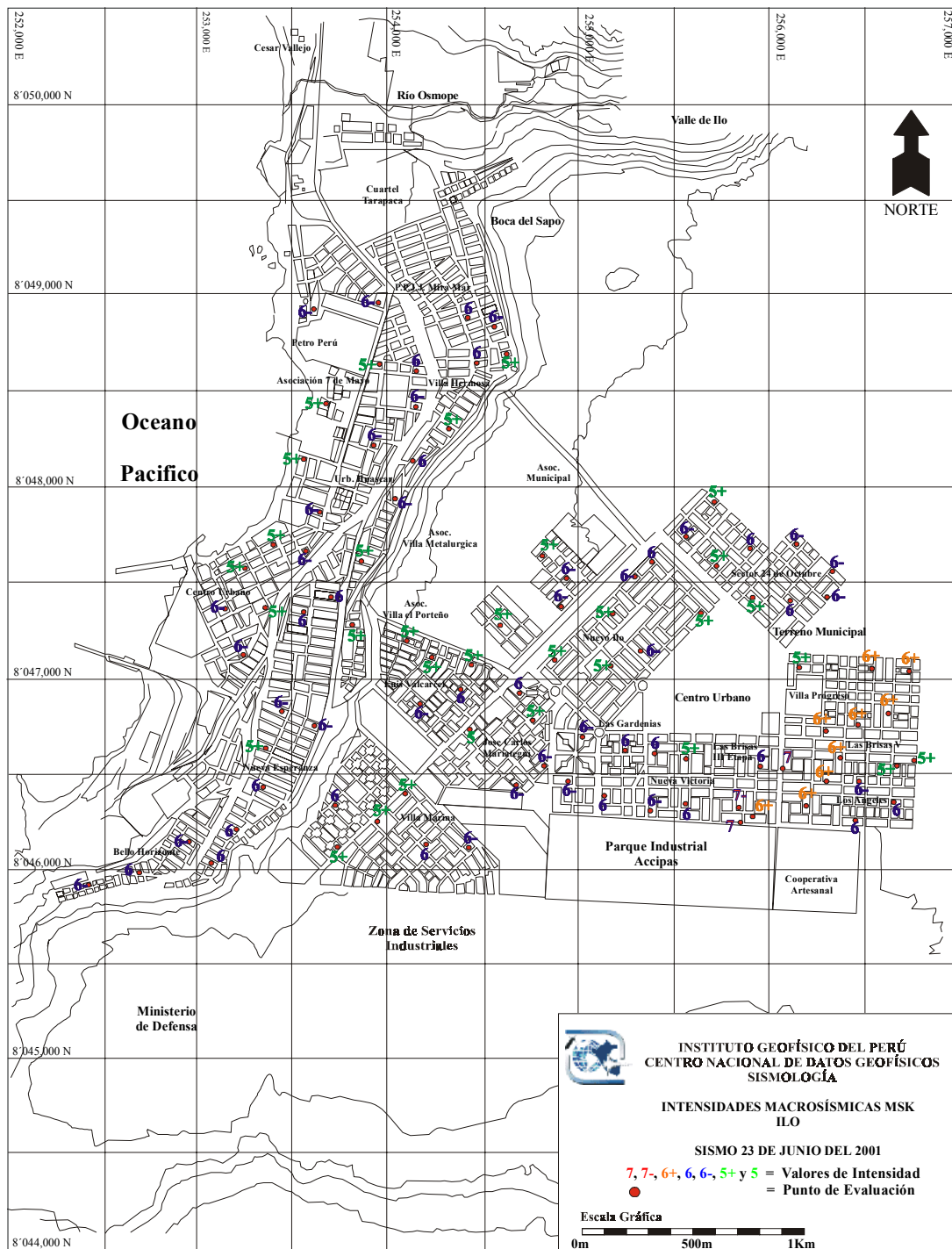


Figura 36. Mapa de Intensidades Macrosísmicas MSK evaluadas en la localidad de Ilo (Moquegua) debidas al terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.

términos de porcentaje, la calidad de la construcción y el tipo de vivienda evaluada. En esta figura se observa que el 100% de las viviendas de Tipo A son de mala calidad. En el caso de las viviendas de tipo B, el 29% corresponde a viviendas de regular calidad y el 71% de buena calidad. Asimismo, es notorio que el 100% de las viviendas de tipo C son de buena calidad.

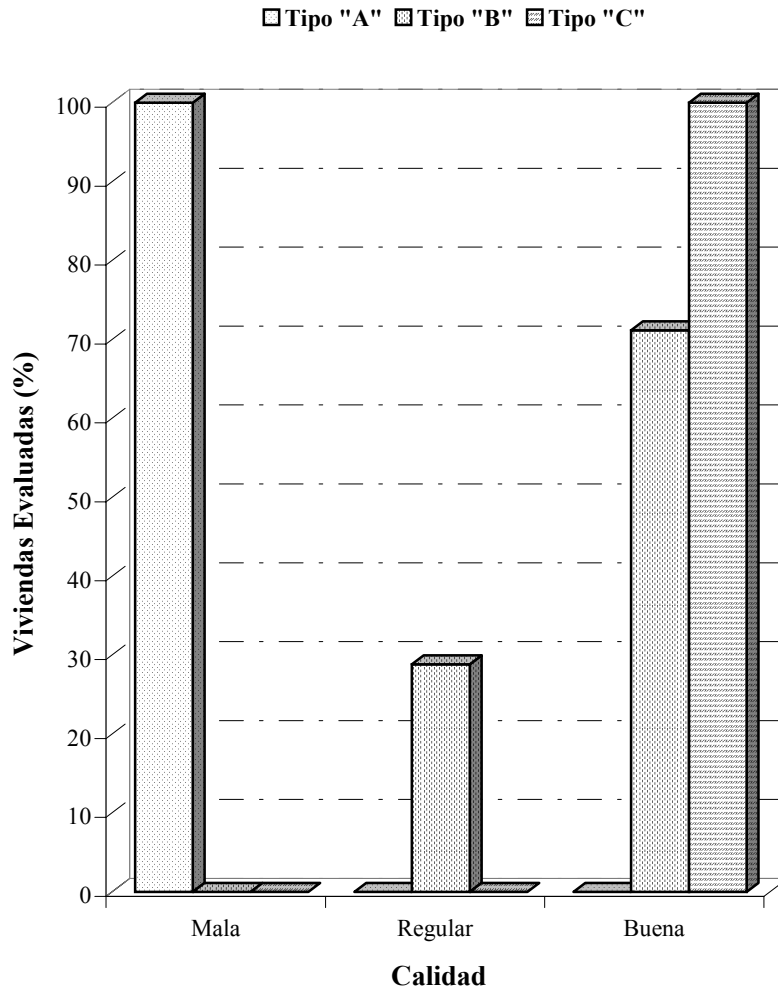


Figura 37. Representación del porcentaje total de viviendas evaluadas en la localidad de Ilo considerando el tipo y calidad de la construcción.

Características de las Viviendas

Las viviendas de la ciudad de Ilo, según la escala MSK presentan las siguientes características:

- *Viviendas de tipo "A"*. Por lo general, estas viviendas son construidas a base de pircados de bloquetas de cemento o piedra sin mortero o con mortero de cal-arena o cemento-arena, además de una cimentación muy superficial de piedra con mortero de barro o cemento-arena sin ningún tipo de refuerzo estructural. Estas edificaciones se encuentran en determinados sectores de Pampa Inalámbrica.

- *Viviendas de tipo "B"*. Este tipo de vivienda ha sido construido utilizando bloquetas de cemento con buen mortero de cal-arena ó cemento-arena y paredes bien trabadas con espesores de 25 a 60 cm. En estas viviendas la unidad de albañilería es homogénea con buena cimentación, pero con paredes que no tienen refuerzo de concreto armado. Los techos característicos son planos con losa de concreto armado y apoyados sobre los muros sin vigas o refuerzos. Estas viviendas se encuentran en el Centro Urbano y en Pampa Inalámbrica. Dentro de este tipo de vivienda se puede considerar las de ladrillo sin reforzar que se encuentran distribuidas en el sector de la Pampa Inalámbrica.

- *Viviendas tipo "C"*. Este tipo de vivienda considera a las de ladrillo reforzado con elementos de concreto armado, vigas y columnas de amarre con buena cimentación, y techos de losa aligerada. Estas viviendas se encuentran en el Centro Urbano y en la Pampa Inalámbrica.

Frecuencia de Daños

En la Figura 38 se presenta en términos de porcentaje, a los tres tipos de viviendas evaluadas y el nivel de daño causado por el sismo. Así, el 100% de las viviendas de tipo A, presentan daños severos (nivel 3). En el caso de las viviendas de Tipo B, el 60% presentan daños leves (nivel 1), el 19% no ha sufrido daño y el 17% tienen daños moderados (nivel 2). En cuanto a las viviendas de Tipo C, el 25% no sufrieron daño y el 66% tienen daños leves (nivel 1).

El nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de las viviendas evaluadas es mostrado en la Figura 39. Las dos viviendas evaluadas de tipo A, son de mala calidad y en ellas el nivel de daño máximo y promedio es 3. En las viviendas de tipo B, de calidad regular, el nivel de daño máximo es 2⁺ y el promedio 1⁻; mientras que, en las viviendas de buena calidad, el nivel de daño máximo es 3 y el nivel promedio 1.

Finalmente, en las viviendas de tipo C de buena calidad, el nivel de daño máximo es 3 y el promedio 1.

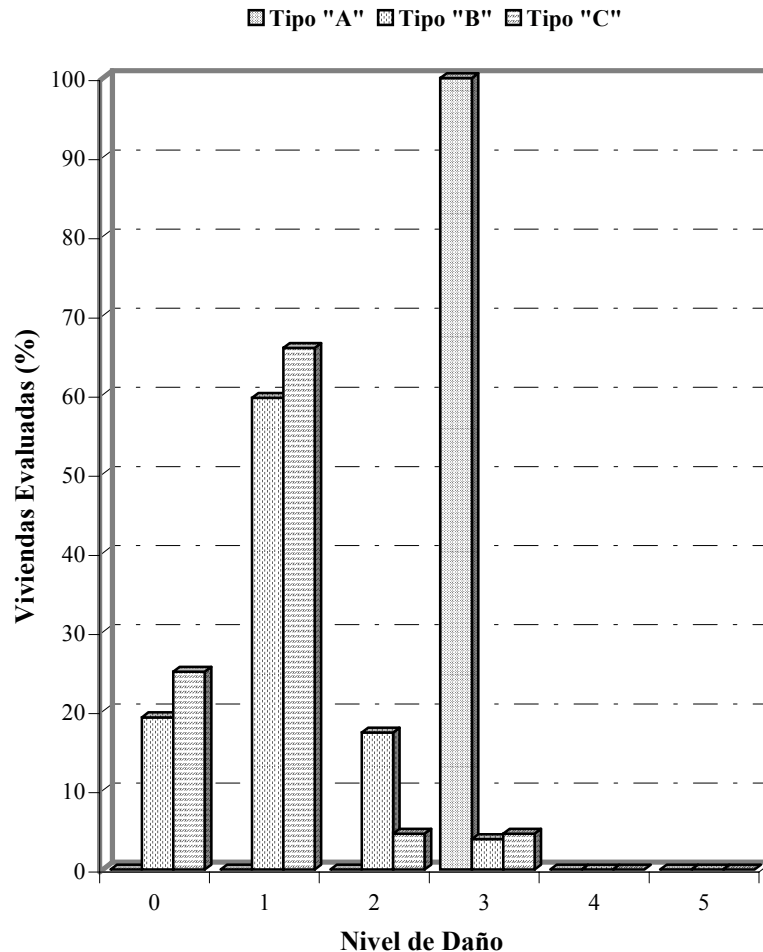


Figura 38. Frecuencia de daño, en función del porcentaje de cada tipo de vivienda evaluada en la localidad de Ilo.

Antigüedad de las Viviendas

En la ciudad de Ilo, las edades de las viviendas evaluadas de tipo A, alcanzan hasta 95 años de antigüedad. En el caso de las viviendas de tipo B, el rango de antigüedad es menor a 50 años, similar al observado en el caso de las viviendas de tipo C (vivienda evaluada con mayor antigüedad, 43 años).

Al factor antigüedad, en el caso de las viviendas se les otorga hasta cuatro denominaciones y de acuerdo a esta, en la ciudad de Ilo se ha evaluado viviendas recientes (menor a 25 años) y medianamente antiguas (25 a 50 años), siendo estas en su

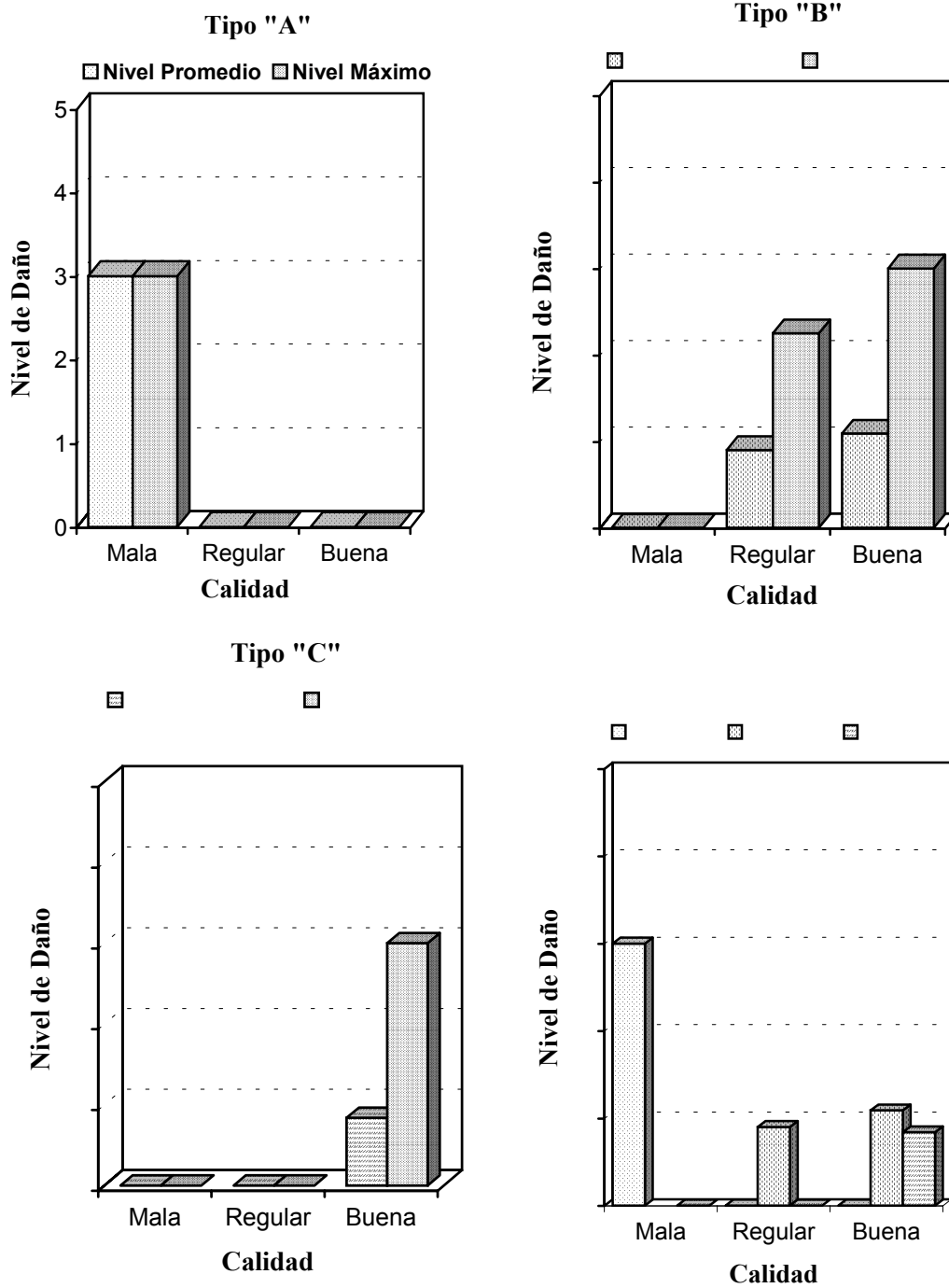


Figura 39. Representación del nivel de daño promedio y máximo en función de la calidad de viviendas evaluadas en la ciudad de Ilo.

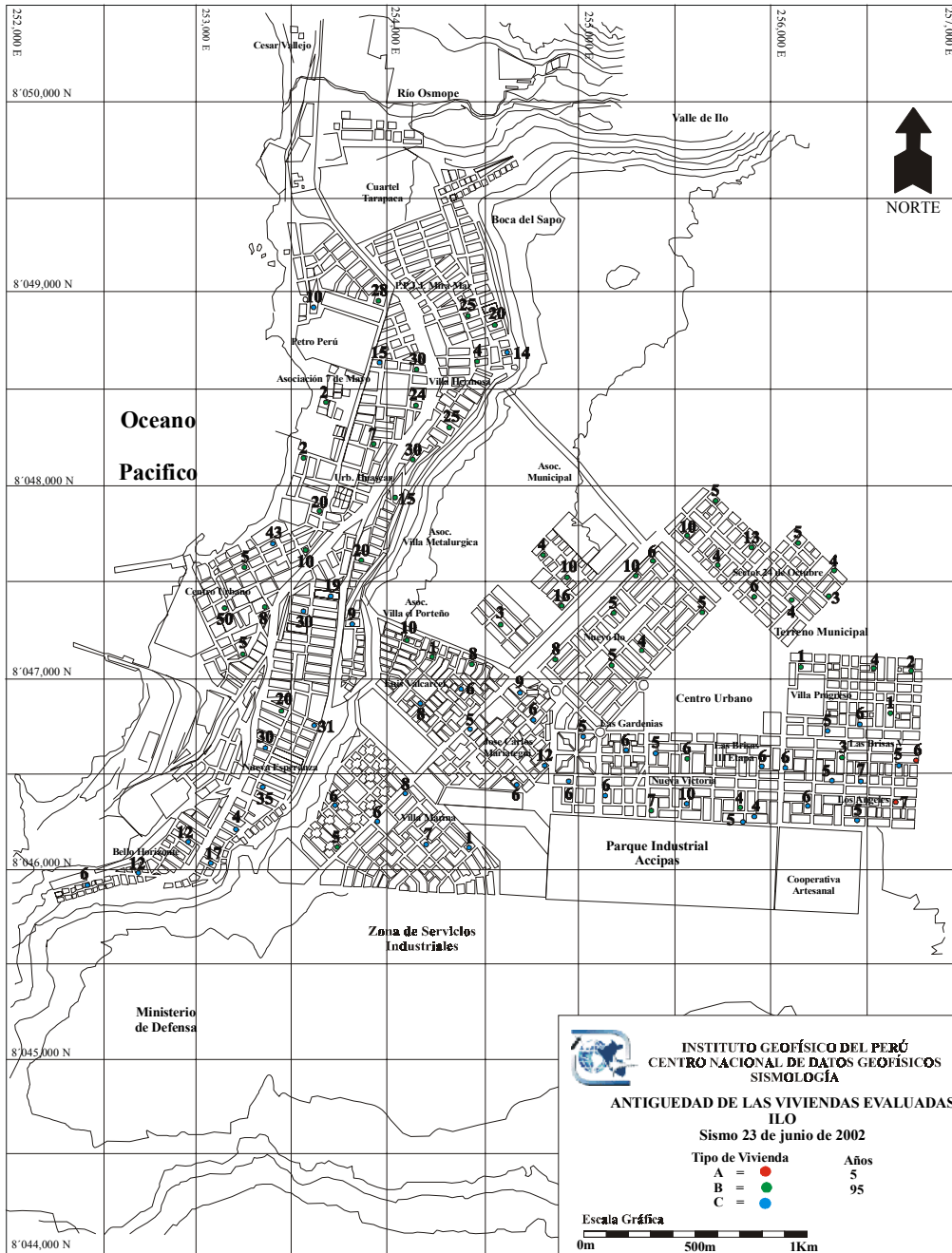


Figura 40. Nivel de antigüedad de las viviendas evaluadas en la localidad de Ilo (Moquegua).

totalidad de tipo B y C; también se ha evaluado viviendas recientes (0 a 25 años) y antiguas (50 a 100 años) del tipo A. La distribución de los tipos de vivienda y su antigüedad se representa en la Figura 40. En la figura se observa que las viviendas de Tipo A con edades entre 6 y 95 años se ubican en el sector de Los Angeles. Las viviendas de tipo B, predominan en la zona norte de la Pampa Inalámbrica y en el Centro Urbano del Puerto de Ilo; mientras que, las de tipo C se ubican en el Centro Urbano y en la Pampa Inalámbrica.

La edad de las viviendas evaluadas en términos de porcentaje, se representa en la Figura 41. En el caso de las de tipo A, se observa que el 50 % presenta edades menores a 25 años y las restantes 50 % tienen entre 50 y 100 años (antiguas). Las edades de las viviendas de tipo B, el 88% son recientes (menor a 25 años) y el 12% son medianamente antiguas (25 a 50 años) y para las de tipo C, el 84% son recientes y el 16% medianamente antiguas.

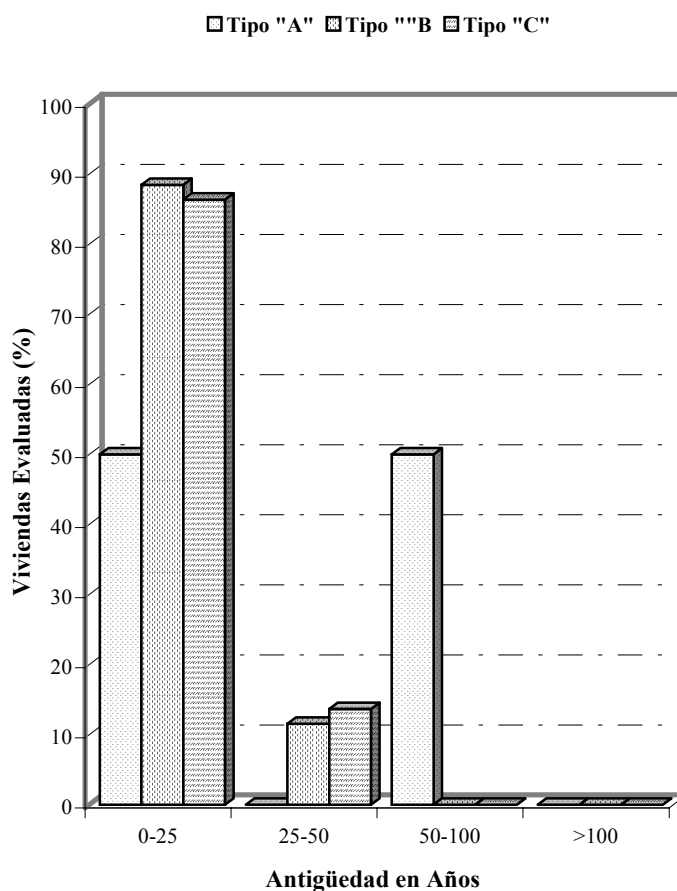


Figura 41. Porcentaje de viviendas evaluadas en función de su antigüedad y tipo en la localidad de Ilo.

Distribución de Daños

Los valores del nivel de daño y calidad de las viviendas en la ciudad de Ilo se presenta en la Figura 42. De acuerdo a los resultados obtenidos, las viviendas de tipo A de mala calidad se ubican en el sector de Los Ángeles (nivel de daño 3). Las viviendas de Tipo B de buena y regular calidad, presentan niveles de daño de 1 a 3 grados; los niveles de daño 1 y 1⁺ predomina en Pampa Inalámbrica y en las márgenes del Puerto de Ilo y el nivel de daño 3 se ubica en el sector de Los Ángeles, siendo estas viviendas de buena calidad. Las viviendas de Tipo C, en su mayoría no han sufrido daño ó tienen nivel de daño 1 ó menor que 1; sin embargo, en los sectores de Los Ángeles y Las Brisas III Etapa las viviendas presentan niveles de daño 2 y 3, siendo estas de buena calidad.

Localidad El Algarrobal

Una de las pocas localidades anexas al municipio de Ilo para el cual se obtuvo muestras, es el distrito de El Algarrobal. Según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), este distrito tiene 188 habitantes y 96 viviendas particulares. De acuerdo con la evaluación efectuada por el Instituto Nacional de Defensa Civil, el número de viviendas afectadas por el terremoto fue de 86 y las que se destruyeron 56.

En el Distrito El Algarrobal se ha evaluado tres puntos ubicados en las inmediaciones del Museo Municipal, siendo su valor de intensidad para cada punto de 6 MSK, 6⁺ MSK y 7- MSK. Las viviendas evaluadas son de tipo C de buena calidad y el nivel de daño en dos de ellas es moderado (nivel 2); mientras que, la edificación del Museo Municipal ha sufrido destrucción parcial (nivel 4). En general, las viviendas en El Algarrobal son recientes y tienen edades menores a 7 años.

Conclusiones

En la ciudad de Ilo, el valor promedio de intensidad ocasionado por el sismo del 23 de Junio fue 6⁻ MSK, aunque en algunos puntos del sector de Las Brisas, el valor máximo fue de 7 MSK. El valor de intensidad 6⁺ MSK se presentó por los sectores de Las Brisas III Etapa, Los Ángeles, Las Brisas V y Villa Progreso.

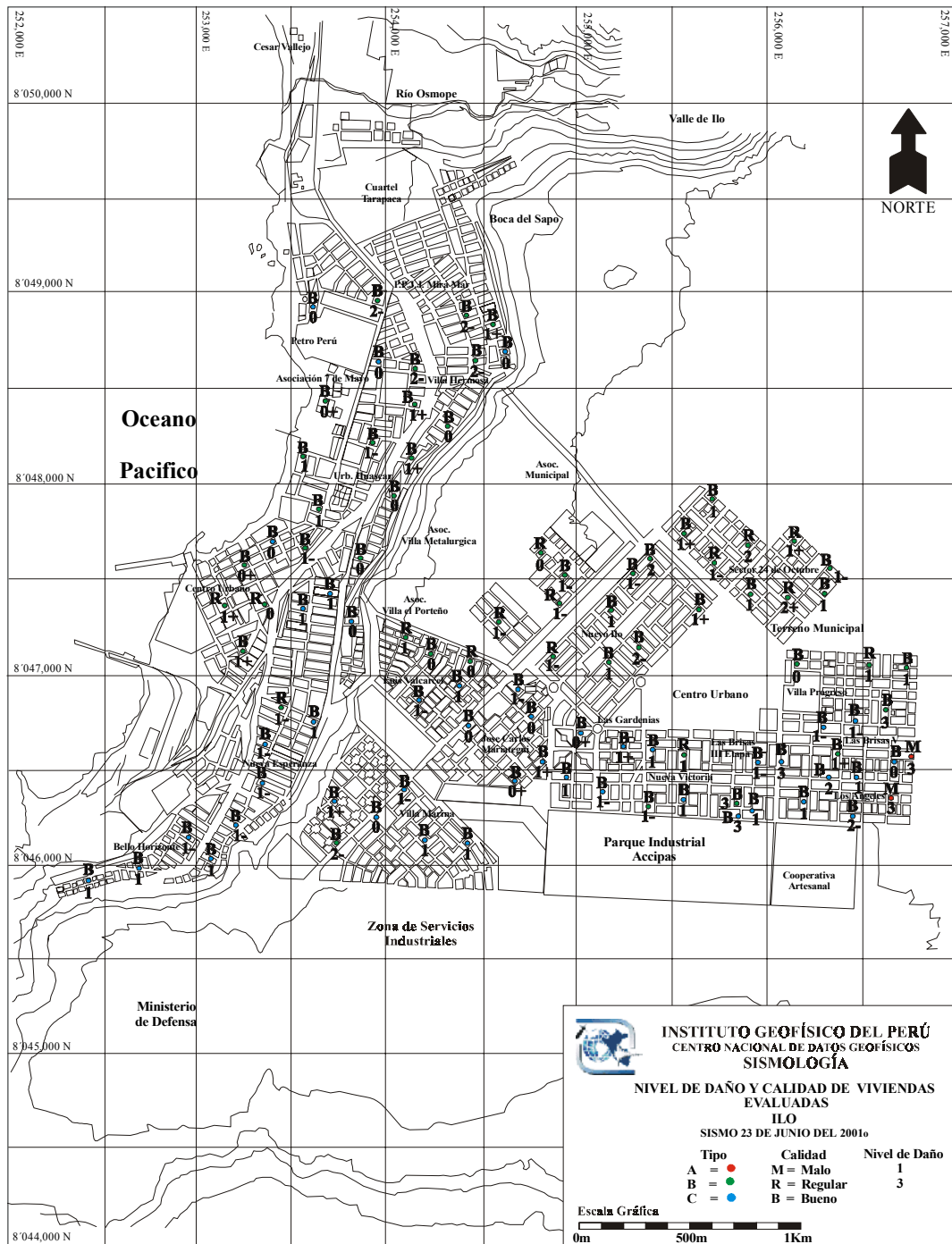


Figura 42. Mapa de distribución del nivel de daño, tipo y calidad de las viviendas evaluadas en la localidad de Ilo (Moquegua).

El nivel de daño en las dos viviendas de tipo A son severos (nivel 3) y estas se ubican en el sector de Los Ángeles. Las viviendas de tipo B y C tienen nivel de daño 3 (daños severos) y estas se presentan en los sectores de Nueva Victoria, Los Ángeles y Las Brisas III Etapa.

En los sectores de Las Brisas III Etapa, Los Ángeles y Las Brisas V en la Pampa Inalámbrica de la ciudad de Ilo, se ha observado mayor cantidad de daños con respecto a otras. Asimismo, en estos sectores se ha observado agrietamientos con rumbo predominante N40°E.

En el valle El Algarrobal, se ha evaluado tres construcciones de tipo C de buena calidad. El nivel de daño en una de ellas (Museo Municipal) fue de destrucción parcial (nivel 4), parte de los muros colapsaron y el suelo sufrió agrietamiento. Esta vivienda se ubica en la margen izquierda del río Ilo, en la parte baja del cerro Canicora.

Nombre de archivo: macro7
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: CLASIFICACION DE DAÑOS
Asunto:
Autor: efrain
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:24 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:24 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:18 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 12
Número de palabras: 1,398 (aprox.)
Número de caracteres:7,972 (aprox.)

Evaluación de Intensidades Macrosísmicas en las Provincias de Caravelí y Camaná (Arequipa) debidas al terremoto del 23 de Junio de 2001

*Yolanda Zamudio e Igor Valdivia
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

Resumen

En este trabajo se presenta los valores de intensidad máxima observada en algunas localidades de las provincias de Caravelí y Camaná (Departamento de Arequipa) debidas al terremoto ocurrido en la región sur de Perú el 23 de Junio de 2001 ($M_w=8.2$). La información utilizada corresponde a la recopilada in situ utilizando tres tipos de Formatos de Encuesta. Para la interpretación de la información se utiliza la Escala de Intensidades MSK. Los resultados indican que la máxima intensidad observada en las localidades de Caravelí y Camaná oscila entre 6 y 7 MSK, siendo estas las más cercanas al epicentro del terremoto del 23 de Junio.

Abstract

This paper presents the maximum intensity values observed in the provinces of Caravelí and Camana (department of Arequipa) as a result of the June 23, 2001 southern Peru earthquake ($M_w=8.2$). The information used corresponds to that compiled in situ using three types of survey format. We use the MSK intensity scale to interpret the results. These indicate that the maximum intensity observed in the provinces of Caravelí and Camana is between 6 and 7 MSK, these intensities being most similar to those observed at the epicenter of the June 23 earthquake.

Introducción

El terremoto ocurrido en Arequipa el día 23 de Junio de 2001 (15h 33 m, hora local), causó daños importantes en un área que considera a los Departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y a las ciudades de Arica e Iquique en Chile. El Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) indica que el terremoto produjo la muerte de 74 personas, además de 64 desaparecidos, 2689 heridos y 217495 damnificados en toda la región afectada por el terremoto. Las personas desaparecidas fueron debido a los efectos causados por el tsunami que acompañó al terremoto y que provocó la destrucción de aproximadamente 2000 viviendas en las playas de la localidad de Camaná.

El presente estudio considera la información recopilada en las localidades de Bella Unión, Chala, Tocota, Caravelí y Atico de la provincia de Caravelí, y en las localidades de Ocoña y Camaná de la provincia de Camaná. El número total de muestras tomadas en la provincia de Caravelí fue de 68 y en Camaná de 56; sin

embargo, debido a problemas de logística el mayor número de muestras corresponde a las localidades de Caravelí y Camaná. La metodología seguida en este estudio para la interpretación de los datos es similar a la de Huaco y Zamudio (1993) y Ocola et al., (1996). La escala utilizada en la interpretación de la información es la MSK, en su versión modificada por Ocola (1979) para su uso en el Instituto Geofísico del Perú.

Distribución de Intensidades

La distribución de los valores de intensidad macrosísmica evaluada en las provincias de Caravelí y Camaná se presenta en la Figura 1 y en ella se observa que la máxima intensidad fue de grado 6⁺ MSK en la localidad de Caravelí y de grado 6 en Camaná, Atico Pueblo y Ocoña. La intensidad de grado 5⁺ fue evaluada en las localidades de Chala y Tocota, y de grado 5 en Atiquipa y Bella Unión.



Figura 1. Intensidades Macrosísmicas en las provincias de Caravelí y Camaná

Evaluación de Daños

La evaluación de los daños ocasionados por el terremoto del 23 de Junio ha sido realizada considerando el tipo de material de construcción y el estado de conservación de las viviendas. Así, las intensidades evaluadas en la ciudad de Caravelí están en el orden de 7⁻ a 6⁺ MSK y en la ciudad de Camaná, entre 6⁺ a 6 MSK.

Ciudad de Camaná

En la ciudad de Camaná se realizó la evaluación de un total de 42 viviendas distribuidas entre el centro de la ciudad y el distrito de San Gregorio. Según el tipo de vivienda, estas fueron clasificadas en:

- *Viviendas de Tipo A*: Se considera a las viviendas construidas con adobe (bloques de barro) y quincha (barro con caña).
- *Viviendas de Tipo B*: Considera a viviendas construidas con ladrillo sin reforzar.
- *Viviendas de Tipo C*: Reagrupa a todas las viviendas construidas con estructuras de concreto armado.

En la Figura 2 se observa que el 35% de viviendas evaluadas es de *Tipo A*, el 33% de *Tipo B* y el 32% de *Tipo C*.

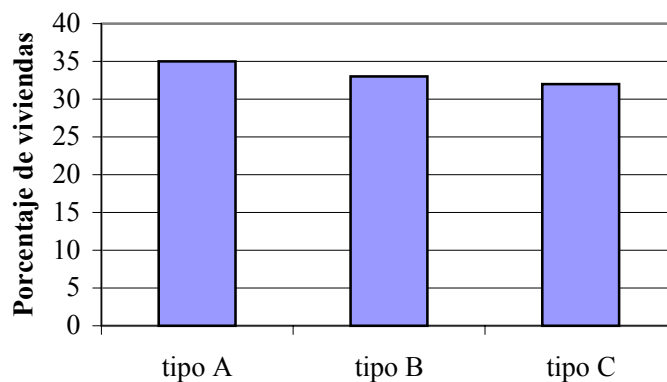


Figura 2. Porcentaje de viviendas evaluadas en la ciudad de Camaná en función del tipo de vivienda.

En la Figura 3 se observa que en la ciudad de Camaná las viviendas de *Tipo A* soportaron intensidades de 6⁺ MSK y las de *Tipo B* y *C*, intensidades de 6 MSK,

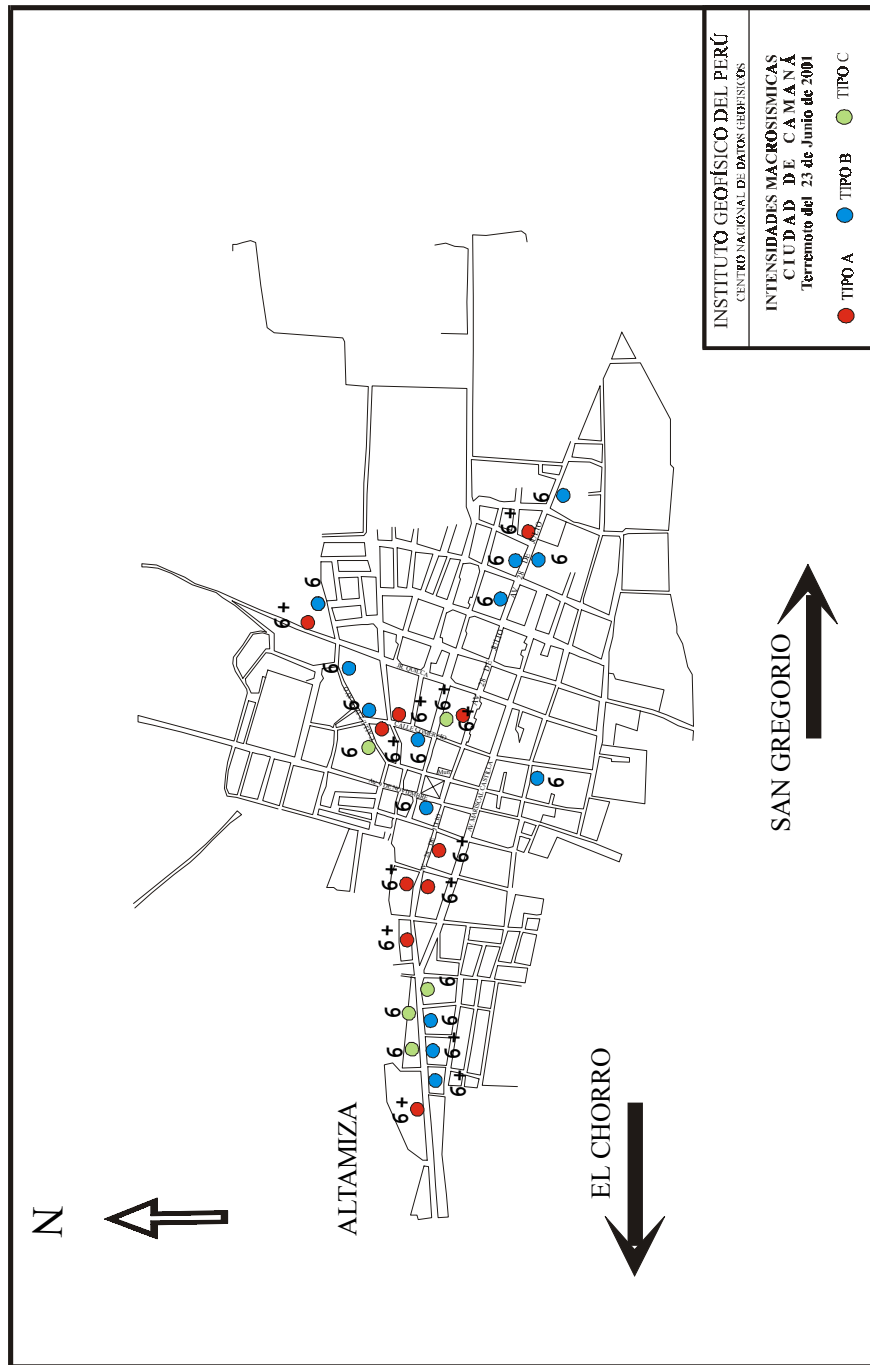


Figura 3. Intensidades Macrosmicas en la localidad de Camaná debidas al terremoto del 23 de Junio de 2001.

todas distribuidas a lo largo de la Av. 28 de Julio y en las calles Comercio y 2 de Mayo. En general, se ha observado que el nivel de daño ha sido mayor en viviendas de *Tipo A* (nivel 3); mientras que, en las viviendas del *Tipo B* y *C* se encontraron daños de nivel 2 y 1 respectivamente. Asimismo, en la Figura 3 se observa que el número de viviendas evaluadas de *Tipo A* es mayor en comparación con las de *Tipo B* y *C*.

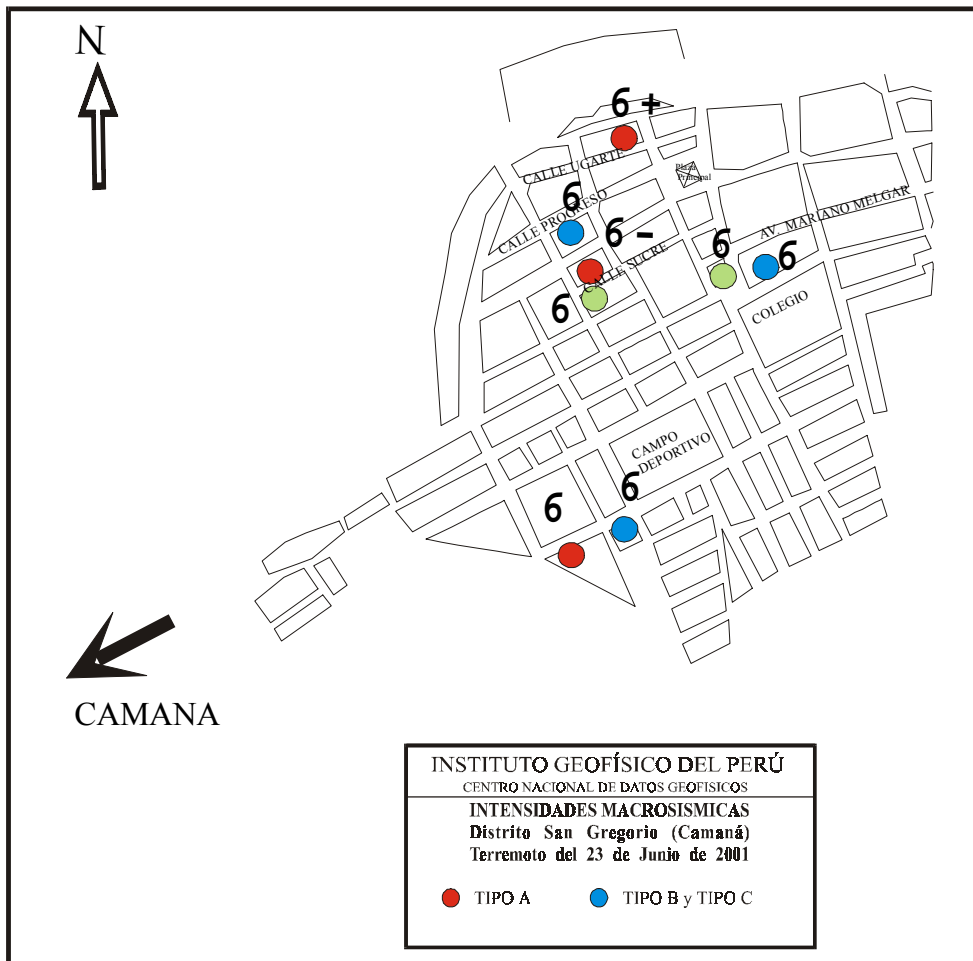


Figura 4. Intensidades macrosísmicas en el Distrito de san Gregorio (Camaná) producidas por el Terremoto del 23 de Junio de 2001.

En la localidad de San Gregorio, los valores de intensidad oscilaron entre 6 y 6⁺ MSK, tal como se muestra en la Figura 4.

En relación con el nivel de conservación de las viviendas evaluadas (Figura 5), las de *Tipo A* en mayor porcentaje se encuentran en mal estado; mientras que, las de *Tipo B* y *C* tienen un mayor porcentaje de viviendas en buen estado. Es necesario remarcar que las viviendas de *Tipo A* son más antiguas que del *Tipo B* y *C*; por lo tanto, estas últimas han resistido mejor al terremoto.

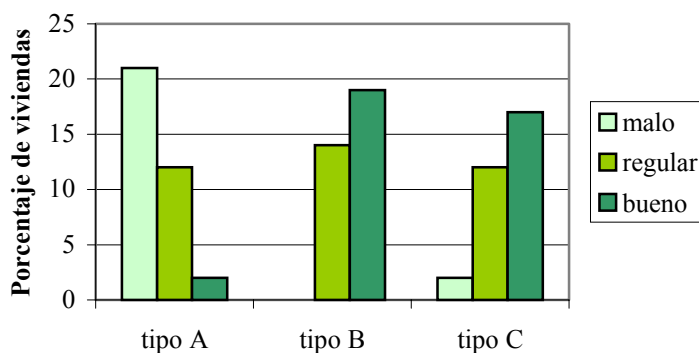


Figura 5. Estado de conservación de las viviendas en la ciudad de Camaná

Ciudad de Caravelí

En la ciudad de Caravelí se ha evaluado 38 viviendas, de las cuales el 58% son de *Tipo A*, el 19% de *Tipo B* y el 23% de *Tipo C*. Las viviendas más vulnerables por el sismo han sido las de *Tipo A*, las mismas que han sufrido daños de nivel 4 (aproximadamente el 80% de viviendas). Las viviendas de *Tipo B* y *C* presentaron daños de nivel 2 y 1 respectivamente.

Según la Figura 6, las construcciones de *Tipo A* son considerablemente mayores en número con relación a las de *Tipo B* y *C*, lo que demuestra la predominancia de estas viviendas en la ciudad de Caravelí.

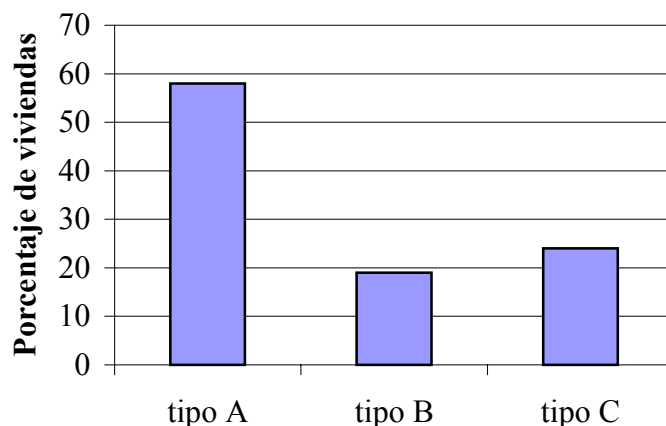


Figura 6. Porcentaje de viviendas evaluadas en la ciudad de Caravelí.

En relación con el estado de conservación de las viviendas, en la ciudad de Caravelí las de *Tipo A* se encontraban en estado regular o malo (Figura 7); mientras que, las de *Tipo B* y *C* en buen estado.

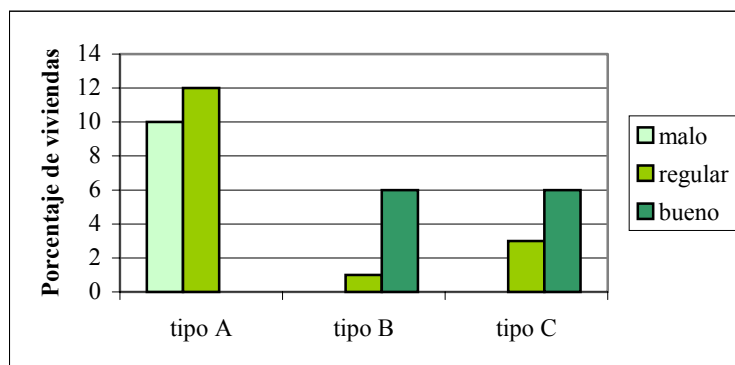


Figura 7. Estado de conservación de las viviendas en la ciudad de Caravelí.

En la ciudad de Caravelí, la intensidad máxima evaluada oscila entre 6 y 7 MSK en viviendas ubicadas en la Av. Buenos Aires y en los Jirones 2 de Mayo, Saenz Peña, Bolognesi y Castilla. En general, se ha observado que las viviendas de *Tipo A* sufrieron

colapso total o parcial (Figura 8); por lo tanto, estas resultaron más vulnerables para el terremoto en relación con las de *Tipo B* y *C*.

Conclusiones

De la evaluación de intensidades macrosísmicas realizadas en las provincias de Caravelí y Camaná se concluye que:

.- En el ámbito regional, las intensidades macrosísmicas evaluadas fueron de grado 5 MSK en Bella Unión y Atiquipa, grado 5⁺ MSK en Tocota y Chala, grado 6 MSK en Atico y grado 6⁺ MSK en Caravelí. En las ciudades de Ocoña y Camaná, la intensidad máxima fue de 6 MSK.

.- Localmente, los valores de intensidades macrosísmicas en la ciudad de Caravelí oscilaron entre 6 a 7⁻ MSK y en la ciudad de Camaná entre 6 a 6⁺ MSK.

.- En los distritos de Caravelí y Camaná, existe un mayor número de viviendas de *Tipo A*, de ahí que el daño en las mismas haya sido alto.

Bibliografía

- Huaco et al., (1993). Intensidades sísmicas y otros efectos causados por el sismo del 18 de abril de 1993. Observatorio Sismológico de Camacho-IGP, Contribución IGP N° 01.93b., 10 pp.
- Ocola et al., (1996) Efectos Macrosísmicos del sismo de Nazca del 12 de noviembre de 1996, Documento Preliminar, Instituto Geofísico del Perú.
- Ocola, (1979). Escala MSK – Versión adaptada para el Instituto Geofísico del Perú – IGP.



Figura 8. Intensidades Macrosísmicas en la localidad de Caravelí debidas al terremoto de 23 de Junio de 2001

Nombre de archivo: macro8
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: INTENSIDADES MACROSISMICAS EN LAS PROVINCIAS DE CARAVELI Y CAMANA
Asunto:
Autor: yperezp
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:28 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:28 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 3 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:20 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 1,167 (aprox.)
Número de caracteres: 6,657 (aprox.)

Estadística de Daños ocasionados por el Terremoto del 23-06-2001 en Iglesias Coloniales, Monumentos Históricos y Calles de la Ciudad de Arequipa y sus Provincias

*Víctor Aguilar y Eduardo Farfán
Instituto Geofísico de Characato
Universidad Nacional San Agustín de Arequipa*

Introducción

“...eran las 15 horas con 33 minutos cuando la tierra comenzó a temblar incesantemente, adquiriendo inusitada fuerza conforme pasaban los segundos que me parecían minutos interminables de terror y desesperación. Transcurridos algunos segundos, miraba mi casa como se balanceaba de un lado a otro con ondulaciones de la tierra de 20 cm de amplitud aproximadamente...”.

El día 23 de Junio de 2001, la región sur de Perú después de más de 100 años rompió su silencio sísmico con la ocurrencia de un violento terremoto que produjo muerte y destrucción en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna. Este terremoto alcanzó una intensidad máxima de grado VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada (MM) y una magnitud de 6.9 en la escala de Richter. Asimismo, el terremoto produjo, en toda la región sur, daños considerables en aproximadamente 35600 viviendas y otras 17585 quedaron en completa ruina.

Después de ocurrido el terremoto de Arequipa, el autor procedió a realizar una evaluación física y estadística de todos los daños presentados en iglesias, monumentos históricos, principales calles de la ciudad de Arequipa y provincias adyacentes. En este informe, los resultados preliminares son presentados siguiendo un procedimiento totalmente descriptivo.

Distrito de Arequipa

Cercado

- El Edificio de 12 pisos de la Beneficencia Pública, sufrió el desprendimiento de estuque y roturas de vidrios.
- Las oficinas de Administración del Mercado San Camilo sufrieron roturas de vidrios y deflexión en algunas de sus estructuras metálicas.

- En la Calle Siglo XX, las Torres del ex INPE construidas con sillar de 3m de diámetro y 10m de altura, se desplomaron por falta de confinamiento en los parapetos (Foto 1).



Foto 1.- *Calle Siglo XX. Las torres del ex INPE se desplomaron.*

- En la calle Rivero se produjo el desplome de la pared de sillar de una vivienda con más de 50 años de vida. La pared estuvo constituida por mortero de cal y/o barro (Foto 2).
- En la Esquina de las calles Ayacucho y Rivero colapsaron algunos muros de una vivienda de sillar (Foto 3).
- El puente Grau construido totalmente con sillar y que une a los distritos de Cayma, Yanahuara y Cerro Colorado con el centro de la Ciudad, sufrió una importante rajadura en su extremo izquierdo.
- En la calle Santa Martha (cercado), las oficinas de la Primera Comisaría resultaron afectadas con fisuras en sus muros. Asimismo, la División de Control de Multitudes presentó en su fachada numerosas fisuras.
- En la 2da y 3ra cuadra de la Calle San José y Colón (centro de la ciudad), varias viviendas fueron dañadas parcialmente. En la Calle Melgar, una vivienda colapsó completamente.
- En la calle Octavio Muñoz Najar, una vivienda construida en 1928 sufrió serios daños en sus paredes que se agrietaron por su antigüedad.



Foto 2.- Calle Rivero, desplome de una pared de sillar.



Foto 3.- Esquina entre las calles Ayacucho y Rivero. Colapsó parte de una vivienda de sillar.

- En el Hospital Honorio Delgado Espinoza, los daños como agrietamientos en la parte superior de sus columnas fueron debidos a la presencia de columnas cortas en los pórticos principales.
- En el Hospital Goyeneche, construcción antigua de sillar, los daños se presentaron principalmente en sus paredes con grietas de diferente longitud debidas

probablemente la forma o modelo de construcción (Arco de bóveda). Los daños son mayores en los pabellones de Medicina (varones y mujeres) y Obstetricia.

- El Hospital Nacional Carlos Seguin Escobedo (ESSALUD) con 39 años de antigüedad, presenta a partir del 2do piso serias grietas en sus paredes. Los pisos 5to, 6to y 7mo resultan ser los más afectados con la caída del tarrajeo de sus paredes y daños estructurales en los pórticos y placas.
- En el comedor universitario de la UNSA, se observó daños en su infraestructura de concreto armado, la misma que se agrietó por falta de rigidez y densidad en sus columnas.
- El pabellón de la Facultad de Arquitectura de la UNSA, respecto a otras facultades de esta casa de estudios, presenta mayores daños en su estructura de concreto armado con la presencia de grietas en sus columnas.
- El pabellón de la Facultad de Medicina de la UNSA presenta múltiples rajaduras.
- En la Biblioteca de Ingenierías de la UNSA, sus gradas resultaron seriamente dañadas por falta de confinamiento y arriostre en los elementos estructurales (Foto 4).



Foto 4.- Biblioteca de Ingenierías de la UNSA. Imagen que muestra los daños sufridos en las gradas de esta estructura.

- El Pabellón Nicholson, Facultad de Ingeniería Industrial de la UNSA, presenta roturas de vidrios.

- Los Pabellones de la Facultad de Geología, Geofísica y Minas (UNSA), sufrieron agrietamientos en su infraestructura de concreto armado y la destrucción de sus vidrios en un 80 %.
- En los colegios de la Salle y el Salesianos, presenta agrietamientos en sus construcciones de sillar, motivo por el cual parte de sus ambientes serán demolidos (Foto 5 y 6).

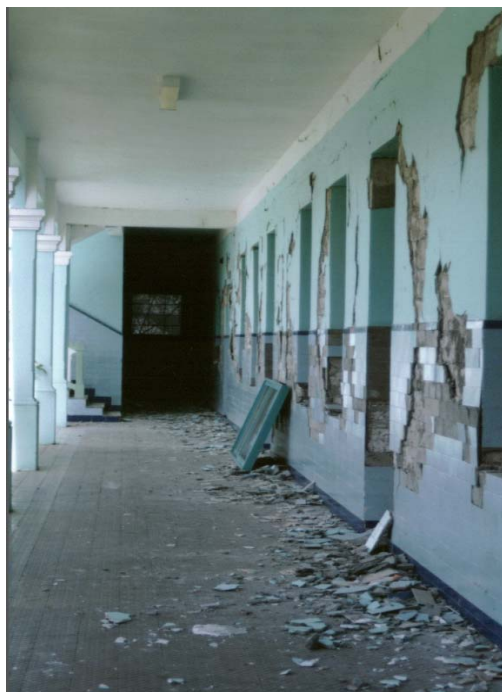


Foto 5.- Vista de la parte del Colegio Salesianos.

Foto 6.- Colegio de la Salle. Daños en su infraestructura en el interior y exterior de los edificios.

Iglesias

A continuación se presenta los resultados obtenidos de la inspección y evaluación de los daños causados por el terremoto del 23 de Junio en las principales Iglesias de la ciudad de Arequipa.

- La Catedral de Arequipa (Foto 7), sufrió daños incalculables. En primer lugar se considera el desplome de la parte superior de su torre izquierda, la misma que al caer lentamente perforó la bóveda. La torre del extremo derecho no llegó a colapsar quedando sostenida por rieles y refuerzos de concreto colocados durante su restauración después del terremoto de 1958 (Foto 8). Además, la Catedral presenta grietas verticales en los extremos de las torres junto a los ventanales, en la puerta principal de ingreso y en las claves de los arcos de las torres. Internamente, el techo presenta grietas longitudinales en el contacto de la pared sur con la bóveda. Los portales exteriores ubicados a ambos extremos presentan grietas cerca de la unión con la nave de la Catedral (Foto 9).



Foto 7.- Catedral de Arequipa. Desplome de la parte superior de su torre.



Foto 8.- Catedral de Arequipa. Vista de la torre del extremo derecho.



Foto 9.- Catedral de Arequipa. Vista de la torre del extremo izquierdo y portales seriamente agrietados.

- La Iglesia Santa Teresa, presenta serios daños en las cúpulas y columnas (resquebrajadas). Su cruz a quedado con 45 grados de inclinación en dirección NW y el campanario quedo en mal estado. En el convento del mismo nombre, uno de sus muros se derrumbó hacia la calle Peral. Asimismo, su campanario quedo en mal estado.

- La Iglesia de Santa Marta construida en 1875, resultó también seriamente afectada. Las estructuras frontales en la parte interior presentan fisuras profundas que atraviesan sus paredes (Foto 10).



Foto 10.- Iglesia de Santa Martha. Sus estructuras presentan fisuras profundas.

- En la Iglesia de San Agustín, se observa fisuras de longitud menor en su fachada y la mayoría de los pilares que sostienen parte del techo se han despedazado.
- En la Iglesia de la Merced su cúpula esta a punto de desplomarse y su fachada presenta diversas grietas.
- La iglesia de San Lazaro se encuentra dañada con grietas en la bóveda de la torre (Foto 11).
- La Iglesia de Yanahuara presenta deterioro en un 35 %. En general, se observa daños en las paredes, columnas, parte del techo de la sacristía, así como en la cúpula y su altar mayor.
- La Iglesia del Señor de la Caña presenta deterioro en un 60 % de su fachada. Los muros de la bóveda tienen fracturas en su base y pilares que soportan la portada, además de desprendimientos de los sillares que descansan sobre la clave del ósculo lateral. En esta iglesia la pared de la sacristía se ha desplomado.
- La Iglesia de la Recoleta presenta grietas en la parte alta del campanario.
- La Iglesia de Cayma, muestra daños considerables en una de las bóvedas muy cerca al atrio mayor, el mismo que colapso parcialmente.



Foto 11.- Iglesia San Lázaro, presenta grietas profundas en su techo.

- En el Monasterio de Santa Catalina, las estructuras interiores no registraron daños de gravedad; sin embargo, es de resaltar las numerosas fisuras en las paredes, techos y cornisas en la mayoría de los ambientes antiguos y construcción de sillar. Asimismo, se derrumbó dos de los ambientes antiguos de dispensa y enfermería, además en la calle Ugarte una de sus paredes colapso parcialmente (Foto 12). La fachada del templo Santa Catalina presentó igualmente numerosas grietas en sus columnas y cúpula.
- El Convento Santa Rosa ubicado en la calle San Pedro sufrió serios daños en sus paredes unidas por morteros con alturas de 3.5 y 4.5m.

Casonas

De las 246 casonas existentes en la ciudad de Arequipa, 36 se encuentran en pésimo estado a consecuencia del terremoto. A continuación una breve descripción de algunas de ellas.



Foto 12.-Calle Ugarte. pared posterior del monasterio de Santa Catalina colapso parcialmente.

- La Casa Goyeneche ubicada en la calle La Merced 201 y Tristán del Pozo en la calle San Francisco 108, presenta desprendimientos en los morteros, además de pequeñas fisuras en sus paredes de sillar.
- La Casa del Moral ubicada en la calle Melgar 318, es la más afectada ya que se produjo el desprendimiento de 3 bóvedas.
- Una Casona ubicada en la calle Bolognesi 331, sufrió el colapso de sus bóvedas, además de muros, portones y cornisas de sillar (Fotos 13 y 14).
- Las Casonas de Corbacho (calle La Merced 209), Monseñor Lisson (Pasaje Tejada 127), Wagner (San Agustín 115), Becerra (San Martha 313) y otras ubicadas en el puente Bolognesi 331, presentan fisuras de diversas longitudes en sus paredes. Estas viviendas son las más antiguas de toda la ciudad.



Foto 13.- Casona ubicada en el puente Bolognesi.

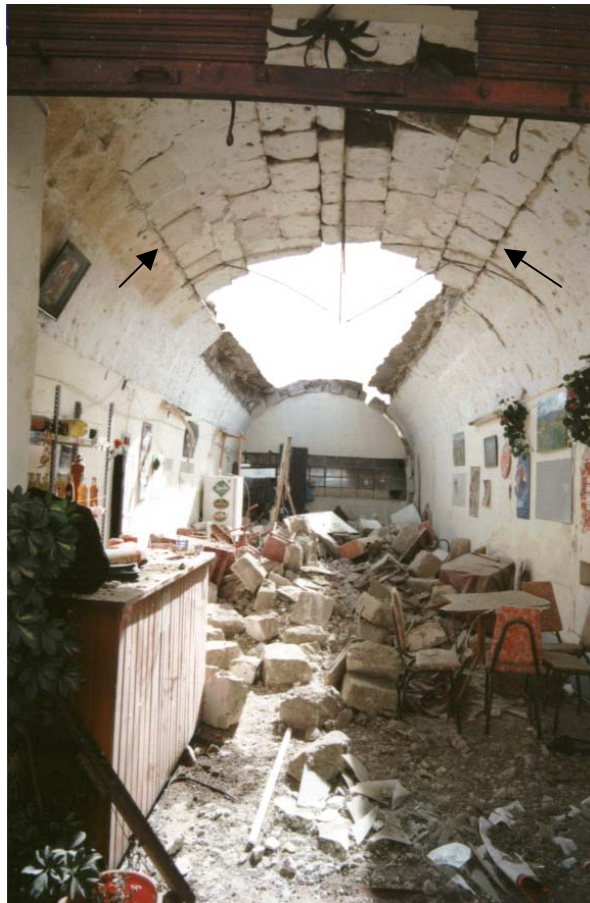


Foto 14.- Casona ubicada en la calle Bolognesi.

Evaluación General por Distritos

Distrito Selva Alegre

El Mercado de Villa Hermosa presenta grietas muy profundas en su estructura y sus columnas encontrándose a punto de caer (Foto 15).

Las zonas mas afectadas fueron las localidades de Pampas de Polanco, Independencia y otras ubicadas en las partes altas de este distrito.

En general, se ha reportando 60 viviendas con un gran número de agrietamientos.



Foto 15.- Mercado Villa Hermosa, distrito Selva Alegre. daños en su estructura y sus columnas están a punto de caer.

Distrito de Miraflores

La Iglesia San Antonio presenta grietas profundas en sus paredes siendo posible que colapse parte de sus estructuras.

El colegio Manuel Muñoz Najar presenta serios daños en sus paredes y columnas construidos con sillar.

Distrito Yanahuara

En el callejón Toledo, el 98 % de sus viviendas están inhabitables por presentar agrietamientos en sus paredes.

En las calles Tacna, Misti, Ugarte, Cortaderas, Recoleta, Lima y España las viviendas presentan diferente grado de daño en sus estructuras.

En general, se ha reportado 300 viviendas en mal estado.

Las Iglesias, del distrito de Yanahuara presentan fisuras en un 35% de sus estructuras: Cerrito San Jacinto tiene el frontis removido y en su sacristía se observa

pequeñas fisuras, San Juan Bautista fue cerrada debido a que su sacristía quedó destruida.

Distrito Cayma

En las urbanizaciones Cayma, Buenos Aires y Carmen Alto, la mayoría de las viviendas presentan resquebrajaduras.

En general, 242 viviendas de construcción precaria fueron prácticamente destruidas, 97 de material noble resultaron afectadas y 75 presentan fisuras.

En los PPJJ Velasco Alvarado, Chachani, Maria Parado de Bellido y Casimiro Cuadros aproximadamente 609 viviendas sufrieron diferente grado de daños.

Los colegios más dañados se ubican en los PPJJ Carmen Alto, Virgen de Chapi, Casimiro Cuadros y Buenos Aires.

El cementerio de Cayma presenta serios daños ya que colapso 50m² de una de sus paredes de sillar, además 400 nichos quedaron a la intemperie (Foto 16).

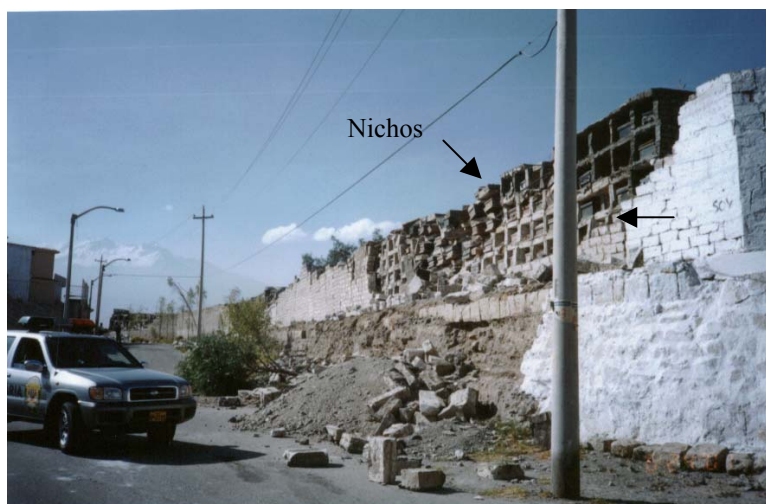


Foto 16.- Cementerio del distrito de Cayma. colapso una de sus paredes quedando a la intemperie algunos nichos.

En el Centro Educativo 40616 Casimiro Cuadros, 9 aulas resultaron parcialmente demolidas debido a que su infraestructura resultó dañada. En el Centro Educativo 40052 se observa la presencia de daños importantes en sus vigas, paredes y parte del techo. Asimismo, el colegio Pionero presenta serios daños en su estructura (Foto 17).



Foto 17.- Centro educativo 40052, El Pionero.

En la Urb. Acequia Alta, la carretera que va a Charcani Grande quedo bloqueada en varios tramos por derrumbes de los cerros.

Los pisos 3er, 4to y 5to del Hospital Julio Manrique de la PNP, fueron severamente dañados en su infraestructura por un gran número de fisuras.

Distrito Cerro Colorado

En las Urb. Alto Libertad, José Santos Atahualpa, Cerro Viejo y Las Canteras, las viviendas presentan diferentes grados de daño en sus paredes y columnas.

En la Av. Aviación y el sector de Zamacola se produjo el colapso de algunos cercos de sillar y las casas antiguas presentan resquebrajaduras quedando algunas inhabitables. En la Urb. Pachacutec Viejo colisionó una pared de concreto armado de mas de 30m de altura.

En la Urb. Mariscal Castilla se observó que las viviendas de construcción antiguas y rústica colapsaron en su mayoría.

Los colegios que quedaron seriamente dañados son: Semi Rural Pachacutec, CEI Semi Rural Pachacutec, Libertadores de América, Romero Luna Victoria y Domingo Zamacola y Jáuregui; los mismos que presentan agrietamientos en sus paredes y columnas.

Distrito Tiabaya

En este distrito 100 viviendas de material rústico quedaron destruidas.

En Pampas Nuevas se agrieto la tierra en varios lugares.

Las Iglesias de Tunales y Santiago Apóstol, presentan fisuras en las bóvedas y paredes (Foto 18).



Foto 18.-Iglesia Tunales, distrito de Tiabaya. Fisuras en la bóveda y paredes.

Distrito Hunter

En este distrito 299 viviendas fueron dañadas: 205 tienen fisuras en sus estructuras, 65 están seriamente afectadas y 29 colapsaron.

El Terminal Terrestre y el edificio de Aragón presentan fisuras en sus paredes.

El Hostal Indio Dormido fue declarado inhabitable por presentar grietas muy profundas en sus paredes.

La Av. Amistad presenta un agrietamiento de 12m en su pista y en el tramo hacia Tingo de 20m.

En Tingo Grande varias casas colapsaron (Fotos 19 y 20).

En calle Francisco Bolognesi del P.J. Augusto Freyre, se produjo el colapso de una pared, la misma que aplastó a un auto.



Foto 19.- Vivienda localizada en la Av. Amistad del distrito de Hunter. Fue declarada inhabitable.



Foto 20.-Vivienda ubicada en Tingo Grande, distrito de Hunter. Rajaduras en una de sus paredes.

En el Colegio San Agustín de Hipona 40033, uno de sus edificios (3 pisos) se inclinó y presenta profundas fisuras, además de huecos en las paredes y techos de algunos de sus ambientes (Foto 21). Asimismo, en los Colegios Claret y Juan Pablo y Guzmán, las estructuras quedaron agrietadas.



*Foto 21.-Colegio San Agustín de Hipona 40033, distrito de Hunter.
Presenta profundas fisuras.*

Distrito Socabaya

La municipalidad informa que 50 viviendas colapsaron y otras 65 presentan daños considerables.

En Bellapampa, Ciudad mi Trabajo, Lara y A.H. Horacio Zeballos Gamez, 117 viviendas fueron destruidas.

En el fundo Lara, ubicada sobre un terreno pantanoso, 533 viviendas de material noble fueron afectadas debido al desplome de sus paredes.

En la Villa Campo Ferial, varias viviendas se desplomaron dejando sin hogar a decenas de familias.

En el puente Virgen de los Remedios se observa agrietamientos en su estructura.

Las Ladrilleras artesanales sufrieron la destrucción de sus hornos quedando estos en escombros.

La infraestructura de la Iglesia San Fernando de Socabaya se encuentra muy deteriorada en sus paredes, techo y muros, próxima a colapsar (Foto 22).

Distrito Characato

En este distrito las zonas mas dañadas son Cerrillo y Yanayaco con 60 familias damnificadas. Los bordes de los terrenos de cultivo se desplomaron.



Foto 22.-Iglesia San Fernando, distrito de Socabaya. Infraestructura muy deteriorada.

Distrito Sabandia

En Sabandia, la Isla, Coripata, Buena vista y Yumina de 100 viviendas (Cercado), 60 colapsaron.

Una pared del cementerio y los canales de regadío colapsaron.

La Iglesia está dañada en sus columnas y torre con fisuras y desprendimiento de sillares.

Distrito Paucarpata

En la calle Ricardo Palma 510 de la Urb. California, un auto fue aplastado por el desplome de una pared.

En el Colegio Padre Perez de Gereño, 10 aulas resultaron seriamente dañadas con grietas y desprendimiento de los techos, las vigas y columnas.

En la calle Colon una vivienda de 3 pisos colapso parcialmente con el desplome de su pared externa (Foto 23).

La Iglesia Santa Ana de Paucarpata, sufrió el colapso de sus muros posteriores, los mismos que destruyeron las escaleras, la bóveda y el altar mayor.



Foto 23.- Vivienda ubicada en la calle Colon, Paucarpata.

Distrito Mariano Melgar

El edificio ubicado en la esquina de Simón Bolívar y Rosaspata prácticamente quedó inhabitable por el agrietamiento de sus columnas.

La Gran unidad escolar Mariano Melgar, construida hace 47 años, resultando seriamente dañadas en todo su perímetro, siendo los pabellones de la fachada de 3 pisos, computo, biblioteca y el gabinete de física, los más afectados ya que sus construcciones de sillar se agrietaron.

Distrito José Luis Bustamante y Rivero

La Urb. Dolores, fue la más perjudicada al estar asentada sobre estructuras húmedas, 10 viviendas de material noble se encuentran inhabitables.

El cerco perimétrico de la futura piscina olímpica también presenta agrietamientos.

En el Colegio Nacional Jorge Basadre, los daños fueron mayores ya que la infraestructura de sus ambientes fue afectada en un 80%. Las columnas y vigas de las aulas colapsaron.

El frontis de la moderna Iglesia "Virgen de la Medalla Milagrosa" de material noble, se encuentra seriamente dañada en sus paredes (Foto 24).



Foto 24.- Iglesia Virgen de la Medalla Milagrosa, distrito José Luis Bustamante y Rivero.

Distrito Polobaya

En Polobaya Chico el 70 % de las viviendas colapsaron parcial y totalmente (133 viviendas fueron declaradas inhabitables).

En La Capilla, aproximadamente 59 viviendas de construcción rústica colapsaron.

La Iglesia San Santiago, construida en 1910, sufrió agrietamientos en sus paredes y en su Cúpula.

Distrito de Pocsi

En los Anexos de Piaca y Tucupanay, varias viviendas sufrieron serios daños en sus paredes con fisuras de mediana longitud.

El Puente principal de este distrito sufrió agrietamientos en su superficie haciendo imposible el paso de vehículos.

Distrito Yura

Más de 15 viviendas de construcción precaria fueron destruidas en un 80 % y otras 7 de concreto presentaron fisuras en sus paredes.

La pista principal presenta grietas de 14 a 17 metros de longitud en sus bordes.

Su Iglesia construida a base de sillar, presenta grietas en su frontis (Foto 25).



Foto 25.- Iglesia del distrito de Yura.

Daños en Provincias de Arequipa

Provincia de Arequipa

La Joya

En el Cerrito Buena Vista colapsaron 25 viviendas; todas construidas con material rústico.

El colegio Carlos Suton y los centros primarios 40037 y 40062 presentan pequeñas fisuras en sus paredes.

Santa Rita

En este distrito colapsaron varias viviendas de construcción precaria.

El desborde del canal Santa Rita de Sigvas provocó la inundación de chacras.

El Pedregal

Se cayó el monumento de su Plaza Principal, además de otras viviendas de material rústico.

El tránsito quedó obstaculizado por la caída de 4 postes.

Provincia de Caravelí

Caraveli

En esta ciudad 650 familias quedaron damnificadas

Provincia la Unión

La Unión

En esta ciudad se reportó 290 viviendas destruidas en diversos distritos de la zona. La Iglesia del santuario de la Unión esta a punto de colapsar ya que presenta rajaduras en su estructura y averías en el altar mayor.

Sayla

De un total de 85 viviendas de material rústico, 27 fueron destruidas totalmente. El centro educativo 40526 y 4 canales de riego fueron destruidos.

Toro

En este distrito, 174 viviendas de adobe colapsaron, 46 quedaron inhabitables y 77 presentan rajaduras. Asimismo, la Iglesia matriz colapsó; mientras que, el local distrital y centros educativos presentan severas resquebraduras.

Provincia de Cotahuasi

Puyca

En esta localidad cuatro colegios presentan grietas y fisuras en sus paredes.

Provincia de Chuquibamba

Chuquibamba

Esta localidad se encontraba incomunicada por los derrumbes que se produjeron en sus vías principales.

El 30% de viviendas de adobe fueron destruidas y varios postes de luz colapsaron.

En el Hotel El Sol, su techo se desplomó a consecuencia que su estructura de madera se encuentra deteriorada.

Chichas

El colegio Nacional Víctor Raúl Haya de la Torre construido con material rústico colapsó parcialmente.

Tauria

En esta localidad la posta medica quedo destruida

Andaray

El 68 % de viviendas quedaron inhabitables.

Los centros educativos de Tumpullo, Huamarca y Huarangil con construcciones de material rústico, quedaron seriamente dañados en sus paredes.

Chaucalla

Algunas viviendas, colegios y la iglesia de esta localidad fueron seriamente afectadas en sus paredes de adobe.

Provincia de Camaná

Camaná

Un Tsunami arrasa con el 90% de viviendas de material noble ubicadas próximas a la línea de costa.

Dos mil Hectáreas con productos agrícolas fueron dañadas con el tsunami. Los sectores mas afectados fueron Pucchum, Santa Mónica, Santa Elizabet, Chule, La Calderona, La Deheza, El Chorro y La Punta.

El establecimiento penal quedo seriamente dañado con fisuras en sus paredes.

En el colegio Nacional 41041 Cristo Rey, de 51 aulas que contaba 9 serán destruidas debido a que presentan agrietamientos en sus paredes y muros.

La Posta de Salud en la Punta fue destruida por el tsunami.

Ocoña

A consecuencia del terremoto 50 viviendas quedaron destruidas.

Se produjo la ruptura de tuberías de conducción de agua que dejo a un 80% de pobladores sin agua.

El Colegio José Mejia Morante presenta grietas en sus paredes y columnas, alguno de sus ambientes serán demolidos.

Provincia de Aplao

Aplao

En esta localidad, 700 viviendas de adobe fueron completamente destruidas.

En las localidades de Mamas, La Real y Querulpa, varias docenas de viviendas de adobe quedaron dañadas en sus paredes.

En el colegio Libertador Castilla se observo la presencia de fisuras que dañaron la infraestructura de sus paredes y columnas.

Corire

En esta localidad, el 80 % viviendas de material rústico colapsaron.

En los anexos de La Candelaria, Uraca y Cantas, las viviendas fueron seriamente afectadas con caída de muros y fisuras.

En el sector de la Mezana se deslizó un cerro.

El colegio secundario Mixto de Corire es uno de los más afectados con graves problemas en su infraestructura debido al fisuramiento de sus paredes.

La carretera que une los distritos de Corire con Punta Colorada presenta grietas paralelas a la misma y longitudes que oscilan entre 5-15m (Foto 26).

Huancarqui

En esta localidad, 8 viviendas de adobe fueron afectadas con fisuras en sus paredes.



Foto 26.- Carretera que une los distritos de Corire y la Punta Colorada.

Orcopampa

Algunas viviendas de adobe de esta localidad presentan fisuras de consideración.

Pampacolca

En este distrito 60 viviendas colapsaron, 80 quedaron resquebrajadas y 15 con rajaduras. Tramos de la carretera entre Yato, Escaura y Pampacolca estuvieron interrumpidos por derrumbes.

Machahuay

En este distrito 590 viviendas colapsaron y 74 presentan rajaduras de diferentes longitudes. La iglesia matriz y los centros educativos de los anexos de Huasicac, Arhuin, y Acopalca se derrumbaron en casi su totalidad.

Viraco

En esta localidad, 65 viviendas de adobe colapsaron y 60 resultaron seriamente afectadas.

Provincia de Chivay

Chivay

Varias viviendas de construcción rústica cayeron por el terremoto y otras presentan fisuras y deterioros.

La iglesia de Nra Señora de la Asunción fue declarada en emergencia por la caída de sus dos cruces, caída parcial de su torre y rajaduras en su infraestructura.

Cabanaconde y Yanque

Los templos de estas localidades presentan rajaduras en sus estructuras.

En estas localidades, 150 viviendas de adobe fueron afectadas y 50 quedaron destruidas.

La iglesia de Yanque sufrió la caída de sus pilares y muros de apoyo.

Huanca

En esta localidad, 200 viviendas quedaron dañadas. La iglesia resquebrajada, dos colegios y las acequias colapsaron.

Tapay

En Tapay, 111 viviendas de adobe han sido totalmente afectadas. Los caminos que comunican a Tapay quedaron interrumpidas especialmente el tramo Cabanaconde – Tapay. En Tapay, 45 viviendas presentan rajaduras. En el anexo de San Juan de Chuccho 10 viviendas fueron afectadas, 15 en Cosñirhua, 30 en Llatica y 10 en Fure. Los canales de Llatica y Fure, fueron arrasados en más de mil metros ocasionando problemas en la agricultura.

Provincia de Mollendo

En Islay

En esta localidad 15 viviendas colapsaron y 70 fueron seriamente afectadas. Desplazamiento del talud del ferrocarril que une Mollendo con Matarani. El desembarcadero el Faro fue afectado.

Se observó hundimientos de 10 cm en varios tramos de la carretera de Mollendo, el Valle de Tambo y La Curva – Mejía (Foto 27).

La cruz de la iglesia Inmaculada Concepción sé cayó.



Foto 27.-Carretera que une Mollendo y el Valle de Tambo. Observese el nivel de hundimiento de la carretera

Cocachacra

En este distrito, 471 viviendas colapsaron y 869 sufrieron daños graves; 3 centros de educación y un local público colapsaron. El colegio de Chucarapi fue destruido totalmente.

Mejía

En esta localidad, 50 viviendas fueron afectadas parcialmente y dos locales de educación colapsaron.

Deán Valdivia

En este distrito, 153 viviendas colapsaron y 177 presentan rajaduras; dos colegios colapsaron y tres fueron afectados en su infraestructura, además 3 locales públicos colapsaron. En el distrito Virgen de las Mercedes, 46 viviendas fueron completamente destruidas y 20 dañadas. Un total de 13 colegios fueron dañados, 2 de los cuales están completamente inhabitables. En el Boquerón se observó procesos de licuefacción en los terrenos de cultivo (Foto 28).



Foto 28.-Terrenos de cultivo del distrito de Deán Valdivia (Mollendo)

La Pampilla

Varias viviendas de adobe colapsaron, su iglesia quedó seriamente dañada en sus paredes con la presencia de agrietamientos.

Punta de Bombón

En esta localidad, 429 viviendas colapsaron y 434 presentan rajaduras, además un local de educación y tres públicos colapsaron. Este distrito quedo aislado a consecuencia de que el puente Freyre tiene sus estructuras resquebrajadas.

Dos mil viviendas destruidas; mientras que, el 50% se derrumbaron, 40% estan inhabitables y el 10% registran daños leves. Se cayeron postes de alta tensión que dejo sin fluido eléctrico.

Catas

El 90 % de viviendas fueron afectadas. Se produjo la caída parcial de su iglesia.

Resumen

En la siguiente cuadro estadístico se resume el total de los daños causados por el terremoto del 23 de Junio de 2001 en el Departamento de Arequipa según el Instituto Nacional de Defensa Civil.

Provincias	Fallecidos	Heridos	Desaparecidos	Damnificados	Viv. Destruidas	Viv. Afectadas
Arequipa	7	1,422	0	25,536	1,590	5,332
Camaná	25	40	60	12,858	3,730	1,256
Castilla	0	312	0	9,831	753	1,771
Condesuyos	1	19	0	8,946	639	1,704
Caylloma	3	11	0	10,710	607	2,356
Islay	4	110	2	11,373	1,076	1,639
La Unión	1	17	0	2,562	234	386
Caraveli	0	70	0	5,904	492	984
Total	41	2001	62	87,720	9,121	15,428

Agradecimientos

Mi agradecimiento al Director del Centro Nacional de Datos Geofísicos, Dr. Hernando Tavera por su invitación a presentar estos resultados en el Informe Final del terremoto de Arequipa elaborado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos del Instituto Geofísico del Perú.

Nombre de archivo: macro9
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN
Asunto:
Autor: Victor Aguilar
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 12/07/2002 02:37 P.M.
Cambio número: 3
Guardado el: 08/08/2008 02:22 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:23 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 30
Número de palabras: 4,157 (aprox.)
Número de caracteres: 23,699 (aprox.)

EFFECTOS DE SITIO

Nombre de archivo: SISM
Directorio: C:\WINDOWS\Escritorio
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: SISMOLOGIA Y SISMOTECTONICA
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 08/08/2008 12:35 A.M.
Cambio número: 6
Guardado el: 08/08/2008 02:54 A.M.
Guardado por: IGP
Tiempo de edición: 12 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:55 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 1
Número de palabras: 8 (aprox.)
Número de caracteres: 46 (aprox.)

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, Camana, Moquegua, Ilo y Tacna

*Javier Lermo, Fernando Lázares y Julio Cuenca
Coordinación de Ingeniería Sismológica; Instituto de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)*

Resumen

Efectos de sitio son analizados en varias ciudades del Perú, a partir de datos de réplicas ($4.2 < M_s < 6.6$) del terremoto de Arequipa ($M_w=8.2$, $M_s=7.9$) de fallamiento inverso. El método de Nakamura y una variación del método estándar (Método promedio) fueron aplicados a los datos mencionados, registrados en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Ilo y Camaná. Amplificaciones relativas mayor a 10 veces fueron observadas en la mayoría de ellas. Sin embargo el rango de frecuencias en las cuales éstas ocurren, son las siguientes: en Arequipa a partir de 1 a 20 Hz; en Tacna a partir de 0.3 a 10 Hz; y en Moquegua, Ilo y Camaná a partir de 2 a 10 Hz. Los daños en las edificaciones responden a los efectos de sitio encontrados en las cinco ciudades. Además, utilizando la mayoría de los datos de las estaciones de referencia se pudo obtener la siguiente relación de atenuación: $\text{Log}(A_{max})=1.3+0.3M-\text{Log } R-0.0031R$.

Introducción

El terremoto de Arequipa-Perú del 23 de junio del 2001 ($M_w=8.2$) de fallamiento inverso y con profundidad de 38 km, se localizó en la costa del Pacífico frente a la ciudad de Ocoña, Arequipa. De acuerdo a la distribución de réplicas y los daños observados muestra una gran directividad hacia el sureste. La aceleración máxima registrada en la ciudad de Moquegua fue de 284 gal (CISMID). Se reportan intensidades MM de VII y VIII en las ciudades de Moquegua y Tacna (IGP-IGUNSA), así como un maremoto local (ola de 8 a 10 m de altura, Tavera et al., 2001) en la localidad de la Punta, Camaná. Esta zona presenta un periodo de recurrencia de aproximadamente 100 años (Dorbath et al, 1991).

Los autores enterados de lo ocurrido en el Sur del Perú, decidieron realizar un viaje de estudio técnico hacia esta zona, gracias al apoyo del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). El propósito principal del viaje fue registrar las réplicas del sismo principal en las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna, Ilo y Camaná, con el objeto de estimar los efectos de sitio y correlacionarlos con los daños observados, para ello se utilizaron tres acelerógrafos digitales de 24 bits marca Kinometrics.

Tectónica y Sismicidad en la Región

La placa oceánica de Nazca que penetra debajo de la placa continental sudamericana da lugar al fenómeno de “subducción”, a una velocidad de 8.4 cm/año y dirección de N80°, originando una interacción que se refleja en actividad volcánica, sísmica y levantamiento de los Andes en el extremo suroeste del Perú. En la Fig. 1, modificado de Dewey et al.(1992), muestra esta zona de convergencia denominada Trinchera o Fosa Perú-Chile, la cual se encuentra alrededor de 6,000 metros bajo el nivel del mar y a 100 kilómetros aproximadamente frente a las costas. La Fig. 1 muestra también, con líneas gruesas continuas que la placa de Nazca de edad Eocena (Dewey et al., 1992), en la parte norte y centro del Perú subduce con un ángulo de entre 15°-20° hasta alrededor de 50 Km. de profundidad y manteniendo una profundidad similar hasta 100-150 Km. Sin embargo en la parte sur del Perú, a partir de la latitud 15° dicha

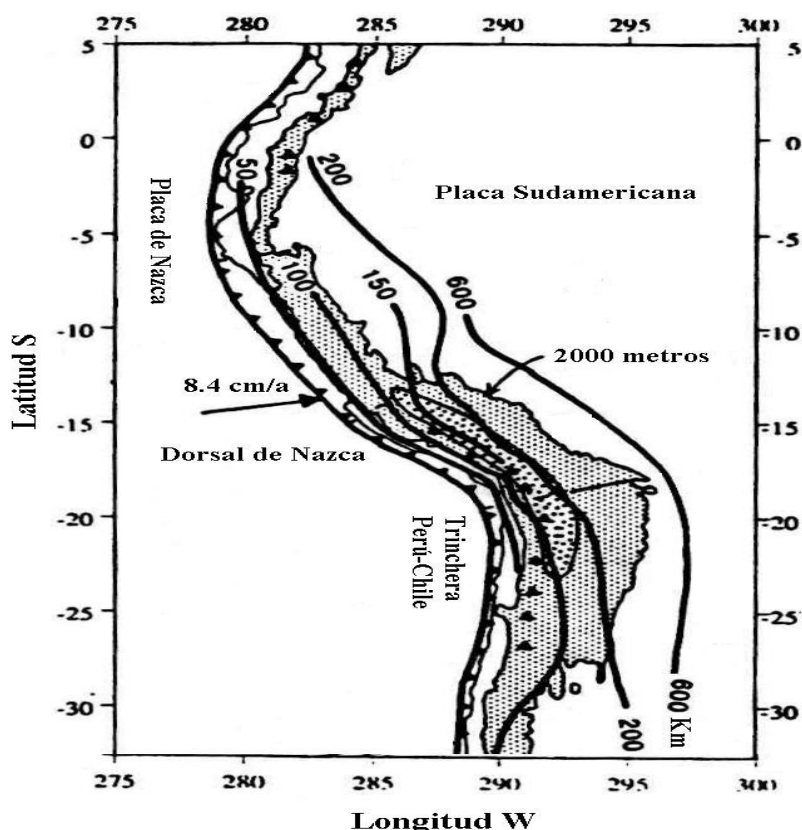


Fig. 1. Configuración de la deformación de la cadena de los Andes (zona sombreada). Contornos topográficos cada 2000 metros. Los triángulos negros indican volcanes. Líneas gruesas indican isopropfundidades de la placa subducida. Las flecha indica la dirección de deslizamiento de la Placa de Nazca respecto a la Sudamericana (modificada desde Dewey et la., 1992).

inclinación aumenta a 30° y se mantiene hasta 250 Km. de profundidad (zona del altiplano), al tiempo que la cordillera de Los Andes alcanzan su mayor ancho, mayor raíz y presencia de volcanes activos (Ubinas, Misti, y Sabancaya de más reciente actividad). Debido a esto, la placa se contornea (Boyd et al., 1984, Grange et al., 1984) cambiando abruptamente tanto en inclinación como en su dirección de convergencia, expresado por la dirección de los ejes de esfuerzos principales de presión (paralelos a la dirección de subducción).

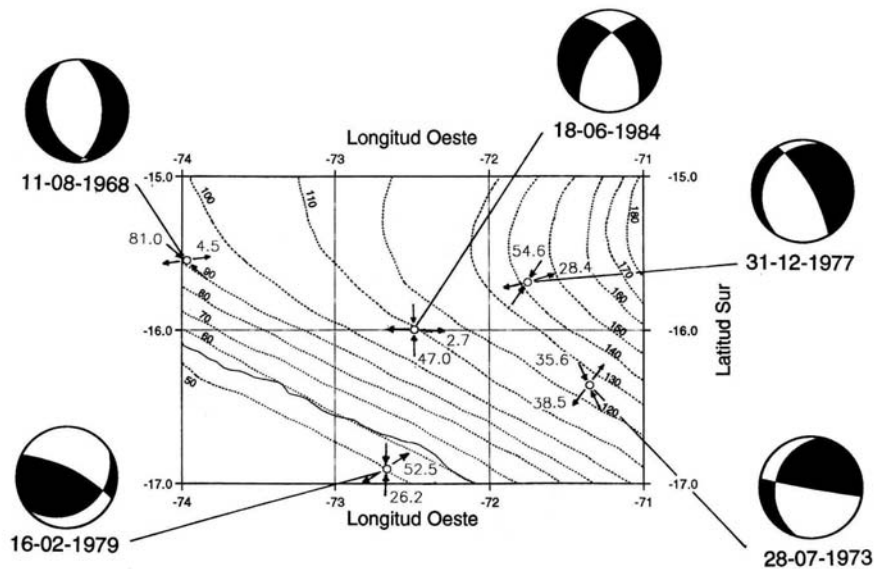


Fig. 2. Ubicación de cinco eventos relocalizados y sus respectivos mecanismos focales (cuadrantes compresionales en negro y los tensionales en blanco). Líneas punteadas indican isopropundidades en km según Grange (1984), donde se han dibujado las direcciones de los ejes T (flechas hacia fuera) y ejes P (flechas hacia adentro) y sus respectivos ángulos de inclinación para cada uno de los cinco sismos analizados (tomada desde Cuenca, 1993).

La Fig. 2, tomado de Cuenca (1993), muestra cinco eventos modelados entre los 15° y 17° S, que corroboran este cambio transicional del ángulo de buzamiento, así como también el estado de esfuerzos que siguen la dirección de buzamiento de la placa infradeslizante y la dirección de los ejes principales T orientados hacia la contorsión, perpendicularmente a los contornos de isopropundidades (modelo de Grange). Por lo tanto, la zona de contacto sismogénica se encuentra dentro los 50 Km. de profundidad, donde ocurren grandes eventos de mecanismo inverso (como los eventos de 1979, 1999 y 2001, ver tablas 1 y 2), mientras que los eventos de mecanismo normal ocurren a

profundidades mayores relacionados a fenómenos de gravedad de la placa de Nazca (como los eventos 1968, 1973, 1977 y 1984).

Por otro lado, Dorbath et al., 1990 estudian los sismos de subducción grandes e históricos del Perú con el propósito de estimar sus longitudes de ruptura, magnitud de momento y de tsunamis, en base a las intensidades reportadas, altura máxima de las ondas de tsunamis medido en la costa y magnitudes reportadas por Lomnitz (1970) y Silgado (1978). Con estos datos grafican las zonas de rupturas de los sismos históricos del Perú en función del tiempo, como se muestra en la Fig. 3. Ellos definen tres zonas a lo largo de la trinchera: una zona norte, afectada solamente por un temblor histórico, que puede ser interpretada como una zona asísmica. La zona central presenta rupturas complejas, con tiempos de recurrencia pequeños y grandes. Sin embargo, la zona sur presenta en promedio una recurrencia en tiempo estable de aproximadamente 100 años para grandes temblores. Por lo tanto ellos pronosticaban un gran temblor para esta zona en un futuro cercano. Esta Fig. 3, desarrollada por Dorbath et al., ha sido modificada para incluir en la tercera zona la longitud de ruptura del terremoto de subducción del 23 de Junio del 2001 ($M_w=8.2$, EIC), ocurrida precisamente en esta zona. La longitud de ruptura, fue estimada a partir de la distribución de 101 réplicas localizadas y reportadas por USGS National Earthquake Information Center (NEIC) ($M>4$), ocurridas durante los primeros 21 días después del sismo principal. Esta distribución y su estimación del área de ruptura se ha graficado en la Fig. 4, donde se muestran con círculos abiertos las réplicas y el área con líneas pequeñas discontinuas. El valor estimado de su longitud es de aproximadamente 300 km paralela a la costa por 100 km de ancho. Así mismo, con líneas discontinuas se traza aproximadamente el área de ruptura del terremoto de 1868, con el objeto de compararlo con éste sismo de Arequipa que resulta de menor tamaño.

Para el evento principal (estrella grande, Fig. 4) varias agencias han reportado sus parámetros de localización y fuente (Tabla 1), de ellas se eligió como la más adecuada, la localización: 16.20° S, 73.75° W con profundidad de 38 Km (IGP). La magnitud ($M_w=8.2$) y los parámetros de fuente se tomó de la agencia EIC, que reporta una falla inversa de bajo ángulo ($M_o=2.2 \times 10^{21}$ Nm, $az=309$, $buz=21$ y $corr=61$), que se propagó hacia el extremo sureste formando dos zonas de liberación máxima de energía: la primera alrededor del evento principal y la segunda al sureste concentrada en

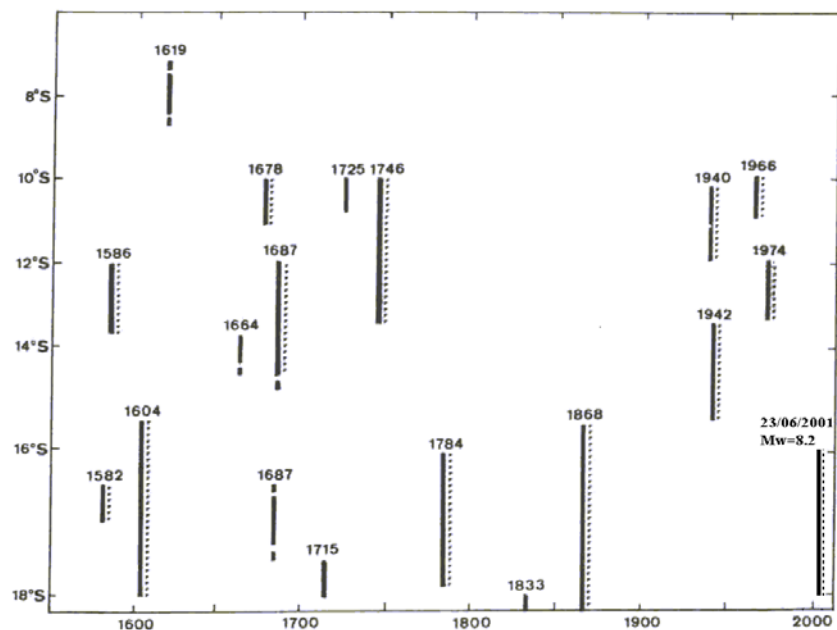


Fig. 3. Gráfica que muestra una estimación de la longitud de ruptura de grandes e históricos sismos de subducción registrados en la costa Peruana Vs tiempo. Las líneas verticales continuas es la estimación de la longitud de ruptura, las líneas discontinuas indican la presencia de tsunamis. Parte superior a cada línea se muestra el año que ocurrió el terremoto. Gráfica modificada de Dorbath et al, 1990, para incluir el sismo de Arequipa ($M_w=8.2$) del 23 de junio de 2001.

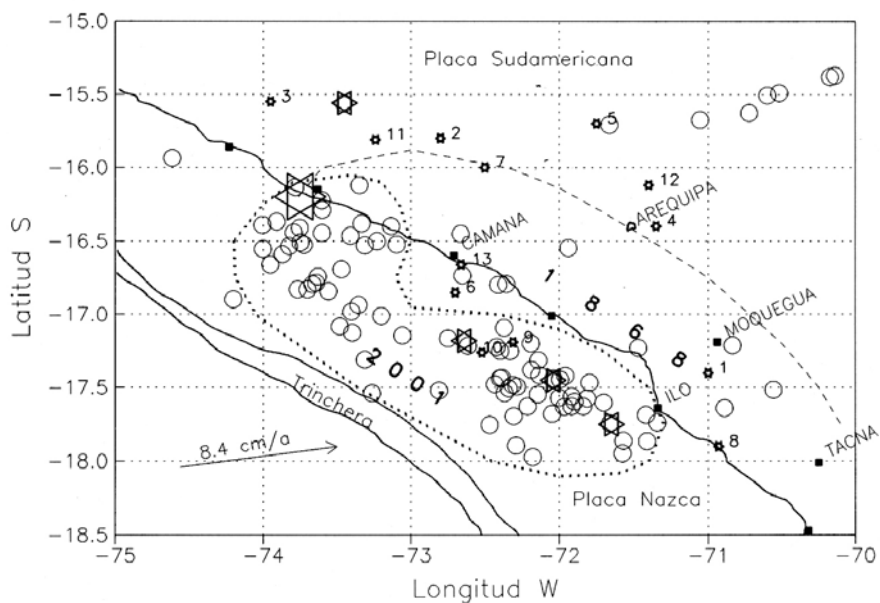


Fig. 4. Mapa de la costa sureste de Perú que muestra la ubicación del sismo principal (estrella grande), sus réplicas (círculo pequeño abierto), las cuatro réplicas más grandes (estrella mediana) y sismos importantes previos (estrella pequeña). Las líneas punteadas y discontinuas muestran el área de ruptura de los sismos de 2001 y de 1868, respectivamente. Los cuadrados oscuros representan la ubicación de las cinco ciudades analizadas.

las coordenadas 17.5° S y 72.0° W (Fig. 4). Esta segunda zona de ruptura se confirma por la presencia de las tres réplicas mayores registradas, las cuales se han representado en la Fig. 4 con estrellas más pequeñas ($M=6.3, 6.8$ y 7.6). En la Fig. 4, se muestra con líneas punteadas esta área, la cual presenta un estrangulamiento en su parte central provocada por la ausencia de réplicas. Esta ausencia se debe posiblemente a la coincidencia de esta zona con las áreas de ruptura de dos sismos recientes. En la Fig. 4 se reportan estos dos sismos con los números 6 y 13 simbolizados con estrellas pequeñas oscuras, así como otros 11 sismos importantes ($M>5.5$) previos al evento del 23 de junio del 2001 (ver también Tabla 2).

Tabla 1. Parámetros de fuente del temblor de Arequipa del 23 de Junio, 2001.

Fuente	Latitud	Longitud	Prof. (Km)	M_0 (Nm)	Az	Buz	Corr	MI	Ms	Mw
CMT	17.21 S	73.02 W	25.7	$4.9 \cdot 10^{21}$	318°	14°	79°		7.9	8.4
NEIC	16.15 S	73.40 W	33N	$3.7 \cdot 10^{21}$	263°	6°	26°			8.3
IGP	16.20 S	73.75 W	38					6.9	7.7	8.2
EIC	16.15 S	73.40 W	30	$2.2 \cdot 10^{21}$	309°	21°	61°			8.2

CMT, Harvard University; USGS, U.S. Geological Survey; NEIC, National Earthquake Information Center; IGP, Instituto Geofísico del Perú; EIC, Earthquake Information Center, Japón (Kikuchi and Yamanaka, 2001); Az=Azimut, Buz=buzamiento, Corr=corrimiento, MI= magnitud local, Ms=magnitud superficial, Mw=magnitud de momento.

Tabla 2. Sismos ($M>5.5$) en la región estudiada, previos al temblor de Arequipa

	Fecha	Latitud S	Longitud W	Prof (km)	Magnitud
1	1948-05-11 08:56	-17.40	-71.00	60	7.1 Ms NOAA
2	1960-01-13 15:40	-15.80	-72.80	120	7.5 Ms NOAA
3	1968-08-11 02:41:52.8	-15.55 ^a	-73.95 ^a	86.0 ^a	5.6 mb USGS
4	1973-07-28 22:18:14.9	-16.40 ^a	-71.35 ^a	117.95 ^a	5.7 mb NEIS
5	1977-12-31 07:53:13.9	15.70 ^a	-71.75 ^a	132.19 ^a	6.0 mb ISC
6	1979-02-16 10:08:53.4	-16.85 ^a	-72.70 ^a	50.07 ^a	6.9 Ms NEIS
7	1984-06-18 11:20:15.5	-16.00 ^a	-72.5 ^a	94.95 ^a	5.8 mb ISC
8	1987-08-13 152306.93	-17.90	-70.93	36	6.4 Ms USGS
9	1988-04-12 231955.57	-17.19	-72.31	33	7.0 Ms USGS
10	1988-04-13 003931.17	-17.26	-72.52	16	6.2 Ms USGS
11	1989-11-29 010014.85	-15.81	-73.24	70	6.5 mb PAS
12	1998-10-08 045142.89	-16.12	-71.40	136	6.4 mb BRK
13	1999-04-03 061718.36	-16.66	-72.66	87	6.8 Mw USGS

^a, Cuenca, 1993.

Movimientos del Terreno

Registro del evento principal en la ciudad de Moquegua

En la Fig.5 se muestran los registros (CISMID-UNI) y los espectros de respuesta de las componentes horizontales de campo libre que se obtuvieron en la ciudad de Moquegua del evento principal. Destaca la gran aceleración observada en esta ciudad (284 gal, dirección EW), así como su gran duración en la etapa intensa que llegó a ser más de medio minuto. Este registro se obtuvo de un acelerógrafo localizado sobre depósitos sedimentarios (conglomerados) productos del acarreo del río Tumilaca que amplificó el movimiento.

Por otro lado, el espectro de respuesta muestra que para periodos estructurales muy bajos ($T < 0.2$ s) un oscilador con cinco por ciento de amortiguamiento pudo haber alcanzado una aceleración cercana al valor de la gravedad (g), lo que explica parte de los daños observados en casas de adobe de esta ciudad.

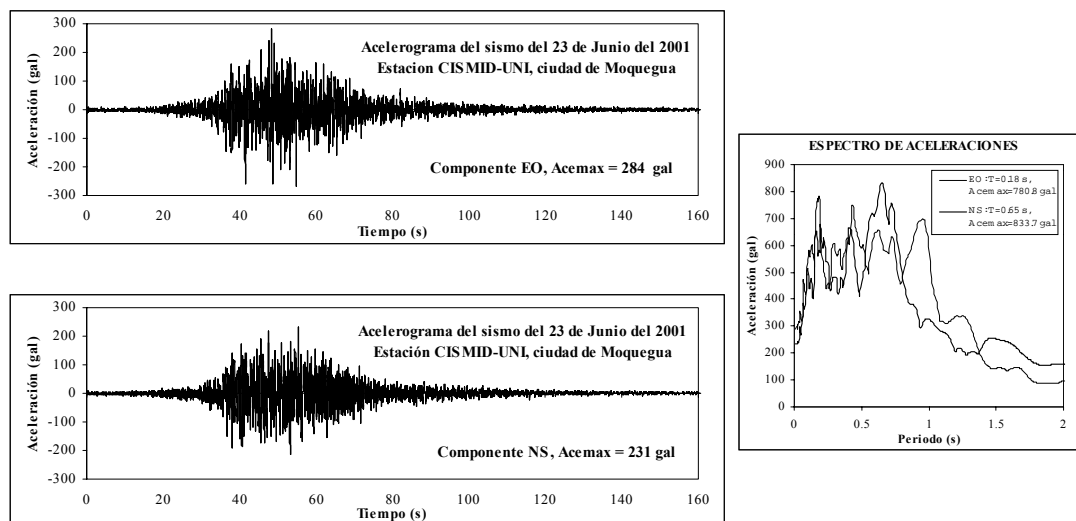


Fig. 5. Registros horizontales y espectros de respuesta (5%) del sismo de Arequipa obtenidos en la estación de Moquegua en campo libre (CISMID-UNI).

Atenuación del movimiento

Utilizando el registro de las réplicas del temblor de Arequipa en las zonas de mayor daño se desarrolla una ley de atenuación para sismos de subducción. Se analizaron 30 acelerogramas registrados en diversas estaciones dentro de las ciudades de Arequipa, Moquegua, Tacna e Ilo. Los datos de aceleración máxima del suelo, obtenidos en roca o terreno firme, pueden observarse en la Fig. 6 como una función de la distancia focal (Tabla 3). Después de efectuar un análisis de regresión en dos etapas se obtuvo la siguiente ley de atenuación para A_{max} :

$$E(\log A_{max}) = 1.3 + 0.3 M - \log R - 0.003 R, \quad \sigma(\log A_{max}) = 0.40$$

donde A_{max} está en cm/s^2 , R es la distancia focal en km y M es la magnitud.

En la Fig. 6, con línea continua se muestra el ajuste para los datos analizados (se fijó una magnitud de 4.8 como promedio para estos datos), y con línea separada por cuadros se muestra el ajuste al sismo de Arequipa ($M_w=8.2$).

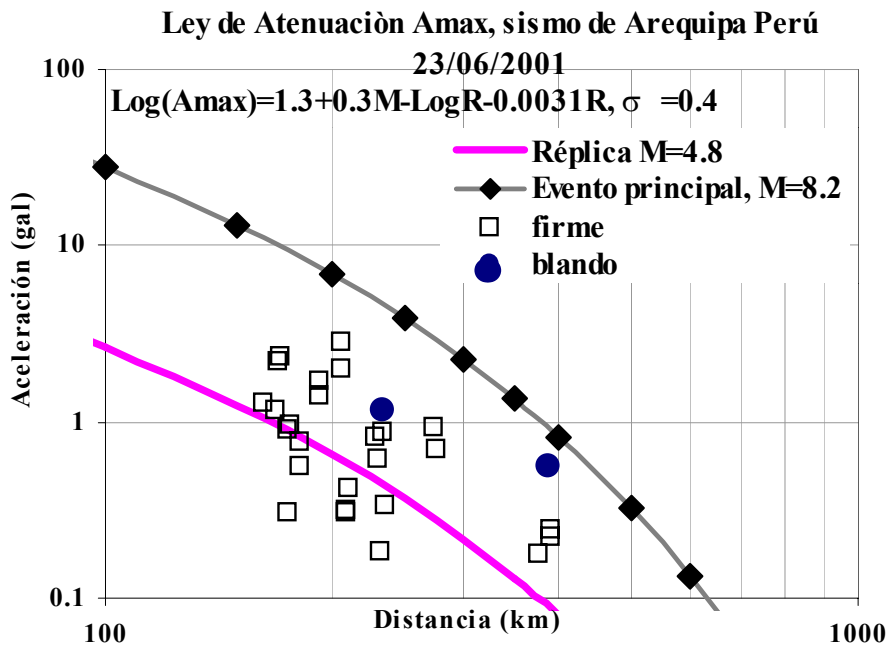


Fig. 6. Datos de aceleración máximas registrados en roca o suelo firme contra distancia focal, obtenidas de réplicas del sismo de Arequipa.

Tabla 3. Datos de A_{max} en sitios firmes desde las réplicas del temblor de Arequipa ($M_w=8.2$)

Fecha	Origen	Lat.S (°)	Long.W (°)	Prof (Km)	M	Dept.-Estac.	Amax (gal)			Dist. Km	Prom Horz cm/s**2	Comentarios	
							Vert	NS	EW				
23/06/2001	20:33:13	16.15	73.75	30	8.2	Moq-Avia	177	231	284	320	258.86	Suelo	
01/07/2001	11:06:30	17.14	73.05	33	5.2	Areq-arem	0.28	0.76	0.77	182	0.76501	terreno firme	
							Areq-unas	0.45	0.54	0.59	181	0.56555	terreno firme
01/07/2001	21:32:52	17.94	71.57	33	4.2	Areq-ovan	0.68	1.32	1.01	169	1.17526	terreno firme	
							Areq-caym	0.57	0.89	1.03	176	0.96254	terreno firme
							Areq-arem	0.46	1.07	1.46	162	1.27994	terreno firme
03/07/2001	12:57:41	16.51	73.74	29	5.8	Areq-cris	0.68	1.32	1.01	234	1.17526	Suelo	
							Areq-huac	0.13	0.19	0.17	232	0.18027	Roca
							Areq-juli	0.63	0.72	1.02	234	0.88283	terreno firme
05/07/2001	13:53:49	15.56	73.45	62	6.6	Moq-chen	4.81	7.23	7.1	325	7.16529	Suelo	
							Moq-sana	4.00	6.74	7.48	323	7.11962	Suelo
06/07/2001	09:21:56	16.12	73.34	33	4.8	Tac-cent	0.18	0.26	0.18	390	0.22360	terreno firme	
							Tac-cono	0.12	0.19	0.29	391	0.24515	terreno firme
							Tac-nuev	0.36	0.48	0.64	387	0.56568	Suelo
07/07/2001	05:19:43	16.46	73.41	33	5.0	Tac-unjb	0.05	0.22	0.12	376	0.1772	terreno firme	
07/07/2001	10:06:40	17.53	72.36	33	4.8	Tac-tupa	0.6	0.85	0.81	229	0.83024	Roca	
							Tac-unjb	0.33	0.68	0.55	230	0.61842	terreno firme
07/07/2001	10:10:02	17.67	72.04	33	4.9	Tac-tupa	0.85	1.67	1.69	192	1.68003	Roca	
							Tac-unjb	0.58	1.72	0.94	193	1.38600	terreno firme
07/07/2001	11:13:47	17.52	72.8	33	4.6	Tac-tupa	0.89	0.86	0.97	274	0.91665	Roca	
							Tac-unjb	0.39	0.84	0.52	275	0.69857	terreno firme
07/07/2001	11:17:32	17.57	71.8	33	5.2	Tac-tupa	1.37	1.84	2.45	170	2.16657	Roca	
							Tac-unjb	1.01	2.92	1.57	171	2.34428	terreno firme
07/07/2001	11:49:21	17.41	72.13	33	4.9	Tac-tupa	0.24	0.28	0.33	209	0.30602	Roca	
							Tac-unjb	0.15	0.25	0.37	210	0.31575	terreno firme
07/07/2001	11:55:59	17.54	72.14	33	4.7	Tac-tupa	1.33	2.23	3.3	206	2.81628	Roca	
							Tac-unjb	1.36	1.88	2.13	206	2.00889	terreno firme
07/07/2001	13:31:04	17.75	72.46	33	4.7	Tac-tupa	0.27	0.36	0.31	235	0.33593	roca	
07/07/2001	13:36:16	17.62	72.21	33	4.6	Tac-tupa	0.29	0.41	0.44	211	0.42526	roca	
08/07/2001	21:15:18	16.73	72.65	33	4.7	Ilo-bri5	1.05	0.94	0.85	174	0.89613	terreno firme	
							Ilo-magi	0.26	0.33	0.27	174	0.30149	roca

Mapas de Intensidades

La Fig. 7 muestra dos mapas con curvas de igual intensidad en la escala de Mercalli Modificada, desarrolladas por el IGP (Tavera *et al.*, 2001) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), respectivamente. Los dos mapas presentan una intensidad de VIII como el valor más alto observado, sin embargo, este valor no abarca las mismas ciudades en los dos mapas. Mientras que en el mapa del IGP el valor de VIII encierra las ciudades de Chala, Ocoña, Camaná y Mollendo, el mapa de la UNSA encierra las ciudades de Ilo, Moquegua y Mollendo. Con respecto a las intensidades menores a VIII, las curvas de

los dos mapas concuerdan aproximadamente. Aún cuando hay esta diferencia, los dos mapas muestran un alargamiento de las intensidades hacia el sur, en acuerdo a la distribución del número de viviendas dañadas y destruidas por departamento (INDECI, 2001; Zegarra et al., 2001), y a la directividad observada por la distribución de las réplicas

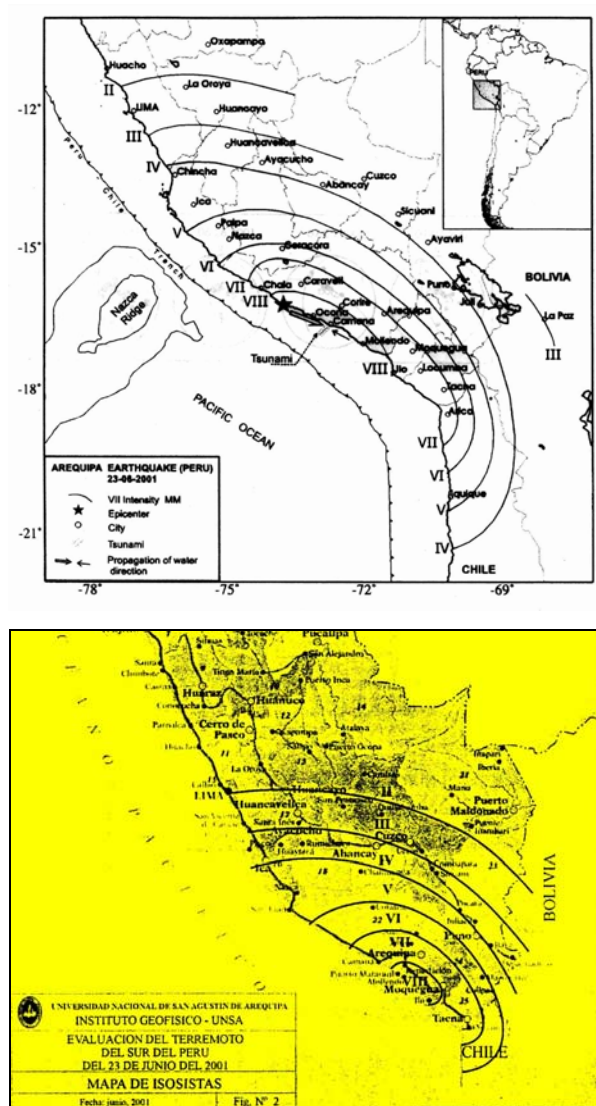


Fig. 7. Mapas con curvas de igual intensidad en la escala de Mercalli Modificada para el sismo de Arequipa. Parte superior, mapa desarrollada por IGP (Tavera et al., 2001). Parte inferior, mapa desarrollado por UNSA.

Efectos de Sitio y Daños en Edificaciones

Uno de los métodos más populares para estimar efectos de sitio en regiones de moderada a alta sismicidad es el uso de la razón espectral (de espectros de Fourier) de registros de temblores (*método estándar*), obtenidos simultáneamente en estaciones ubicadas sobre suelo blando con respecto a una estación de referencia ubicada en suelo firme (asumiéndola libre de efectos de sitio). Este método supone que los efectos de fuente y trayecto son idénticos para todas las estaciones, por lo que, cuando las razones espectrales promedio es procesada para eventos con diferentes distancias epicentrales y azimuths, se asume implícitamente, que el efecto de sitio es predominantemente unidimensional (Field y Jacob, 1995). La razón espectral es usualmente procesada usando el espectro de amplitudes de Fourier, suavizado, de la parte más intensa de los registros de velocidad o aceleración. En esta caso, interesa más evaluar el efecto de sitio observado durante temblores fuertes que los asociados a temblores débiles. Sin embargo, el registro de sismos fuertes ($M_s > 7$) no son tan frecuentes. Por lo que una buena alternativa es utilizar razones espectrales de temblores débiles (por ejemplo Singh et al., 1988; Lermo y Chávez-García, 1993; 1994). Finalmente, en la Fig. 8 se muestra este método, donde se grafican los registros, sus espectros de Fourier y la razón espectral de las componentes NS de una réplica del sismo de Arequipa para una estación en suelo blando (CRIS) con respecto a otra en roca (HUAC), ambos ubicados en la ciudad de Arequipa.

Otro método, es la estimación de la razón espectral entre las componentes horizontales y la vertical de un mismo registro (*método de Nakamura*), propuesto originalmente por Nakamura (1989) para interpretar mediciones de microtemblores. Este método fue aplicado por Lermo y Chávez-García (1993) a la parte intensa de las ondas-S en registros de movimientos débiles, con resultados que sugirieron que si el efecto de sitio es causado por una geología simple, proporciona una estimación robusta de la frecuencia y amplitud del primer modo de resonancia. La ventaja más importante de este método es que elimina el requerimiento de una estación de referencia. Esto es muy usual cuando la estación de referencia falla o presenta efectos debido a condiciones topográficas, o bien cuando el registro obtenido por las estaciones en sitios de suelo

blando es diferente. Nuevamente, la Fig. 8 muestra también este método para la estación en suelo blando (CRIS).

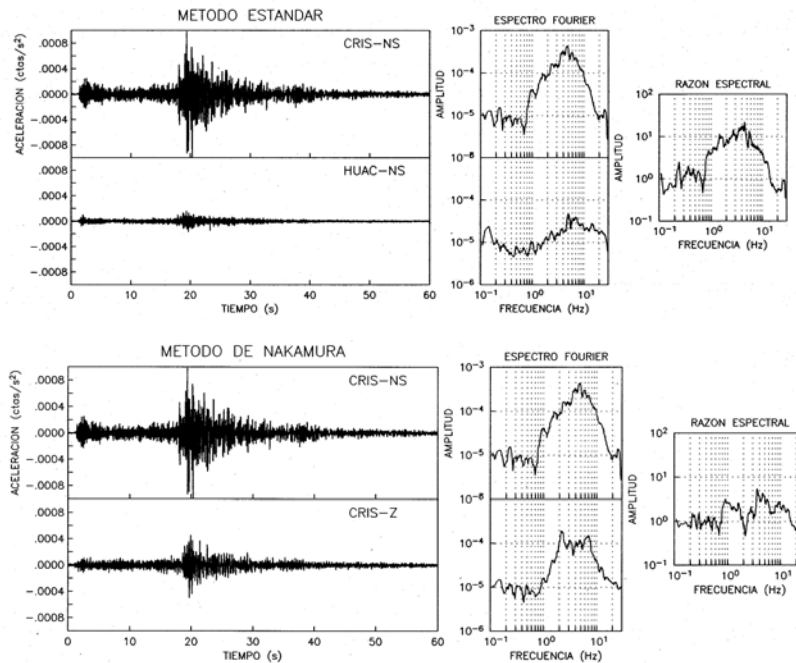


Fig. 8. Comparación de dos métodos para estimar el efecto de sitio: Método Estandar y método de Nakamura. Registros horizontales NS, espectros de Fourier, y razones espectrales.

Como se mencionó en la introducción, en este trabajo se analizaran cinco ciudades importantes afectados por el sismo de Arequipa. En cada uno de ellas se instalaron tres acelerógrafos digitales de alta resolución, dejando uno como estación de referencia, y las otras dos móviles en diferentes puntos de cada ciudad, con el propósito de aplicar el método estándar. Aún cuando nos apoyamos de la geología para identificar la estación de referencia, no siempre se pudo encontrar una estación de referencia definida (afloramiento rocoso), por lo que se requirió de un análisis dinámico previo en todos los sitios. Para este ejercicio, el método de Nakamura es una buena opción, ya que se espera que la razón espectral entre la componente horizontal y la vertical para un buen sitio de referencia es cercano a la unidad (Lermo y Chávez-García, 1993, 1995). Una vez seleccionado el sitio de referencia para las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna, se modificó el método estándar, para poder aplicarlo, ya que no siempre se tenía el mismo registro de la réplica en la estación de suelo blando y la de referencia. Esta modificación que se muestra en la Fig. 9 (llamándola *método estándar-*

promedio, EP), consiste en obtener un espectro de Fourier-promedio de varias réplicas en la estación de referencia. Si ahora usamos este espectro-promedio para estimar el efecto de sitio en los lugares donde no se tiene el mismo registro en la estación de suelo blando y en la de referencia, vemos que el resultado es mucho mejor que el estimado con el método de Nakamura, como se demuestra en la Fig. 9, donde el resultado presenta aproximadamente la misma amplificación que el obtenido con el método estándar. En la ciudad de Ilo, no fue necesario aplicar el método EP, porque aquí si tuvimos pares de réplicas registradas al mismo tiempo en roca y suelo. Finalmente, en la ciudad de Camaná, por falta de tiempo, solo se instaló un equipo en el centro de la ciudad, que registró varias réplicas, con las cuales se estimó el efecto de sitio utilizando el método de Nakamura.

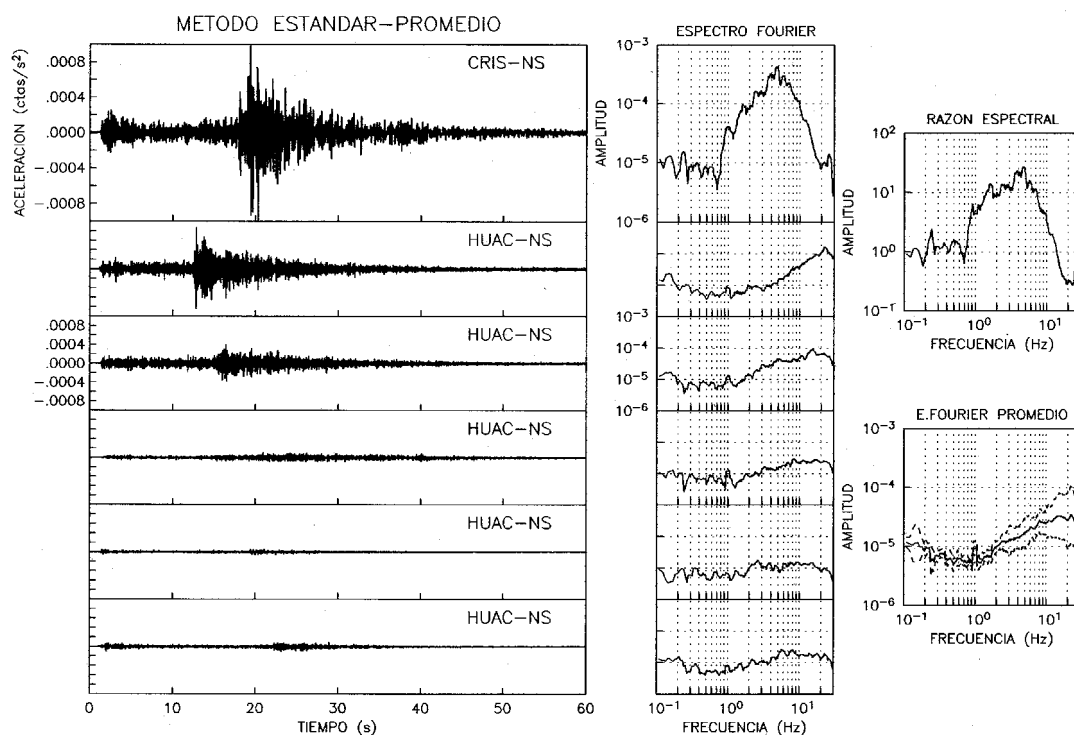


Fig. 9. Método estándar-promedio para estimar el efecto de sitio. Registros horizontales NS, espectros de Fourier, espectro de Fourier-promedio y razón espectral.

Ciudad de Arequipa

Efecto de sitio: En esta ciudad, la distribución de los instrumentos se realizó en base a los daños observados después del temblor y a una propuesta de microzonificación sísmica realizado por Zenon (1991), quien a partir de 227 mediciones de microtremores, 125 estudios de mecánica de suelo y estudios de geología, geomorfología y la evaluación de los daños del sismo del 16 de febrero de 1979, divide a la ciudad de arequipa en cuatro zonas sísmicas. En la Fig. 10 que muestra el mapa urbano de la ciudad, se han trazado con líneas gruesas estas cuatro zonas sísmicas, y con círculos oscuros los ocho sitios seleccionados para registrar réplicas del sismo de Arequipa. La estación de referencia (HUAC), se puso en la Zona A, conformada por rocas ígneas distribuidas hacia el suroeste y noreste de la Ciudad. En la Zona B, se colocaron dos estaciones (AREM y OVAN), conformada por afloramientos de sillar, suelos puzolánicos y flujos de barro distribuidos hacia el noroeste, centro y este de la ciudad, respectivamente. En la Zona C, que abarca la mayor parte del casco urbano, conformada por suelos que presentan comportamientos geotécnicos erráticos a homogéneos, se colocaron tres estaciones (JULIO, MUSEO y UNSA). Finalmente en la Zona D, distribuidas en dos partes, una hacia el norte conformada por material piroclástico, se ha instalado la estación CAYM y la otra hacia el sur conformada por suelos aluviales con nivel freático cerca de la superficie, se ha instalado la estación CRIS.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 11 (mapa geológico-urbano de la ciudad de Arequipa), se ha graficado, en cada uno de las ocho estaciones sísmicas mencionadas, registros de tres réplicas de magnitudes similares, con el objeto de comparar sus amplitudes con respecto a la estación de referencia (HUAC). También se muestra la catedral de la ciudad con sus torres dañadas después del sismo.

En la estación de referencia (HUAC) se analizaron 11 réplicas para obtener el espectro-promedio y poder aplicar el método EP. En las Figs. 12 y 13 se presentan los resultados para las componentes horizontales (NS y EW), para las siete estaciones distribuidas en las diferentes zonas mencionadas. En cada una de ellas se ha graficado la razón espectral individual (línea delgada) y su promedio (línea gruesa). Si ahora

comparamos la amplificación relativa (A_0) de cada unas de ellas y la relacionamos con las zonas a la cual pertenecen, podemos concluir lo siguiente: i) Se comprobó que la zona A es un buen sitios de referencia; ii) la zona B distribuida en la parte central de la ciudad presenta la menor amplificación relativa (A_0) comparada con las demás zonas ($A_0 \pm 5$ veces entre 2.0 y 20 Hz); iii) La otra zona B, caracterizadas por los flujos de barro, presenta una amplificación mayor que la ubicada en el centro de la ciudad ($A_0 \pm 10$ veces entre 1.0 y 20 Hz); iv) la zona C que abarca la mayor parte de la ciudad, representada por las estaciones UNSA, MUSEO y JULIO, presenta la mayor amplificación relativa comparada con las demás zonas, en especial las estaciones de MUSEO y UNSA ($A_0 > 10$ veces entre 0.5 y 5.0 Hz y $A_0 < 10$ veces entre 5.0 y 20 Hz), sin embargo en la estación JULIO, estas amplificaciones muestran una reducción importante que puede ser representativo de la mayor parte de esta zona C; v) la zona D ubicada hacia el sur de la ciudad y representada por la estación CRIS, muestra una amplificación parecida a la de los flujos de barro (AREM), con la diferencia de las altas frecuencias a partir de los 6.0 Hz ($A_0 \pm 10$ veces entre 1.0 y 6.0 Hz y $A_0 \pm 5$ veces entre 6.0 y 20 Hz); vi) mientras que la otra zona D, ubicada hacia el norte de la ciudad y representada por la estación CAYM muestra una amplificación parecida a la zona B del centro (OVAN), pero con una mayor amplificación ($A_0 \pm 10$ veces entre 2.0 y 20 Hz). Por otro lado, a manera de comparación, en la parte inferior de la fig. 13, se han agrupado las ocho funciones de transferencia empíricas, resaltando la estación de referencia (HUAC, línea gruesa), la estación OV (OVAN) con menor amplificación y UN-MU (UNSA y MUSEO), con mayor amplificación.

Por otro lado, los periodos dominantes obtenidos por Zenon (1991) a partir de registros de microtemores, para las cuatro zonas mencionadas, presentan los siguientes valores: zona A, de 0.15 a 0.25 segundos (de 4.0 a 6.6 Hz); zona B, de 0.15 a 0.35 segundos (de 2.8 a 6.6 Hz); y Zona C y D de 0.30 a 0.45 segundos (de 2.2 a 3.3 Hz). Si ahora comparamos los periodos dominantes obtenidos por Zenon y los obtenidos en este trabajo, vemos una gran diferencia en cuanto a sus valores, en especial hacia bajas frecuencias, ya que la excitación de estos suelos con sismos provocan bandas de amplificación y no frecuencia dominante estrechas. Esta diferencia probablemente este asociada a la poca energía de excitación de los microtemores con respecto a los sismos, así como también a la heterogeneidad de los paquetes estratigráficos de estos suelos.

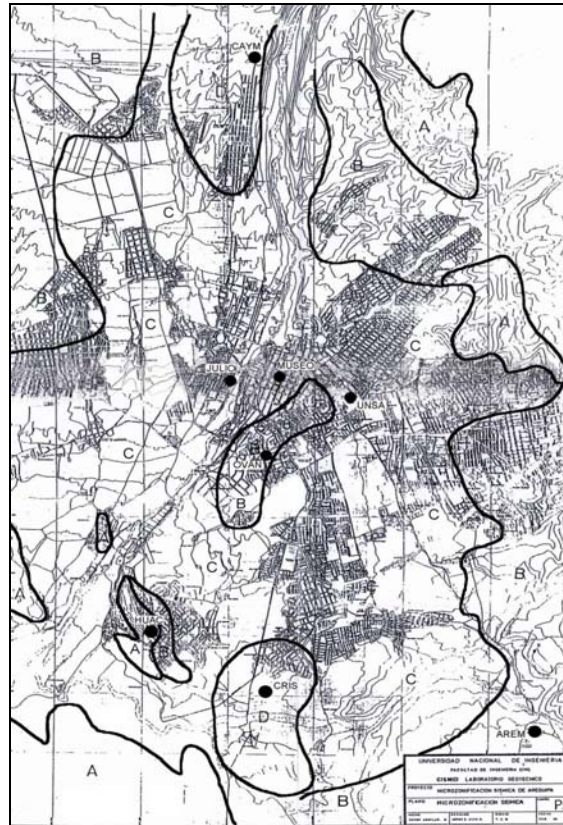


Fig. 10. Mapa urbano de la ciudad de Arequipa. Líneas continuas gruesas, zonificación propuesta por Zenon (1991). Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. HUAC, estación de referencia.

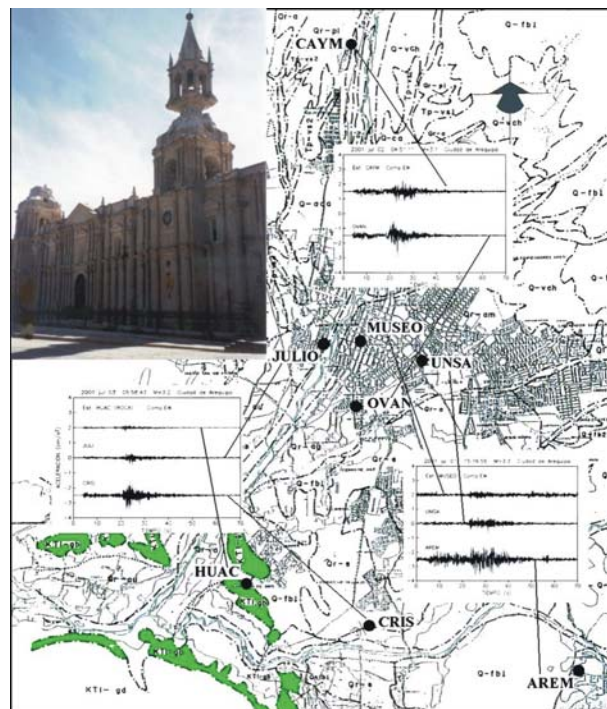


Fig. 11. Mapa urbano de la ciudad de Arequipa. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. HUAC, estación de referencia. Comparación de ocho registros (una por cada estación) de tres réplicas con magnitudes similares.

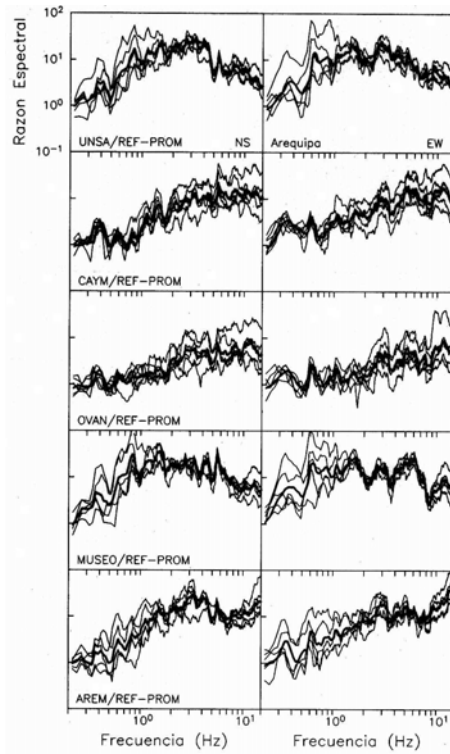


Fig. 12. Resultados de aplicar el método EP a cinco estaciones de la ciudad de Arequipa, para las componentes NS y EW (UNSA, CAYM, OVAN, MUSEO y AREM). Línea gruesa, razón espectral promedio. Línea delgada, razón espectral individual.

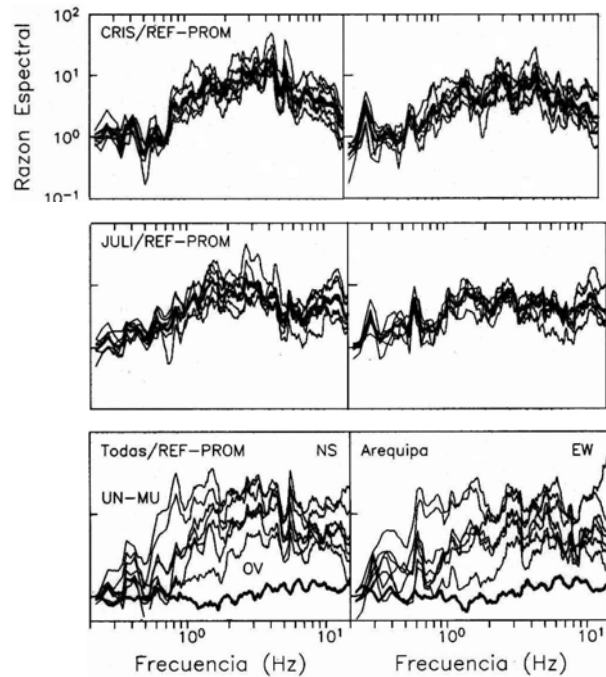


Fig. 13. Resultados de aplicar el método EP a dos estaciones de la ciudad de Arequipa, para las componentes NS y EW (CRIS y JULI). Línea gruesa, razón espectral promedio. Línea delgada, razón espectral individual. Parte inferior, resultados en las componentes NS y EW del efecto de sitio para las ocho estaciones. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando.

Daños: Los daños más severos se concentraron en edificaciones antiguas y consideradas “monumentales” construidas con bloques de material volcánico llamado ignimbrita conocidos coloquialmente como “sillar”. Estas edificaciones se concentran mayormente en la zona antigua de la ciudad (zona C). La más afectada fue la catedral (Fig.11), la cual sufrió la caída de una torre quedando la otra a punto de colapsar. Esta edificación se encuentra a pocos metros de la estación MUSEO donde se observaron amplificaciones mayores a las 10 veces en una banda entre 0.5 a 20 Hz. Sin embargo viviendas autoconstruidas de sillar asentadas en roca (Zona A, Fig.14), donde se ubicó la estación HUAC, no fueron afectadas debido a la ausencia de efectos de sitio. Las edificaciones de ladrillos de arcilla en su mayoría no presentaron daños; pero, aquellas ubicadas donde se colocó la estación CRIS (zona D) sufrieron daños severos (Fig.14) debido a que es una zona con nivel freático superficial, y con amplificaciones mayores a 5 veces hacia altas frecuencias, que provocaron asentamientos en el suelo afectando a edificaciones de uno y dos pisos (periodos entre 0.1 y 0.2).

Edificaciones dañadas de concreto reforzado fueron aquellas que presentaban gran flexibilidad en alguna de sus direcciones, como por ejemplo el pabellón de ingeniería industrial de la Universidad Nacional San Agustín (UNSA) con daños en su tabiquería, ubicado junto a la estación UNSA (zona C) la cual presentó amplificaciones similares al de MUSEO, afectando a éste y otros pabellones que tienen periodos entre 0.3 a 0.5 aproximadamente (de 3 a 5 pisos). De igual manera el pabellón de 7 pisos y sótano del hospital nacional Carlos Alberto Segúin, ubicado cerca de la zona antigua de la ciudad, sufrió daños moderados a severos sólo en su tabiquería; columnas, vigas y losas no fueron afectadas.



Fig.14. Izquierda, vivienda ubicado cerca de la estación HUAC. Derecha, vivienda ubicado cerca de la estación CRIS

Ciudad de Moquegua

Efectos de sitio: En esta ciudad se trabajó también de acuerdo a los daños observados después del sismo, que coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994), quien, con base a estudios geológicos y de inspección realizada a los diferentes tipos de vivienda (adobe, albañilería con techo flexible, albañilería semi-resistente y albañilería resistente) divide en cinco sectores a la ciudad y de acuerdo a los daños observados y al porcentaje del tipo de vivienda en cada una de estos sectores, clasifica a la ciudad en riesgo sísmico bajo, medio y alto. En la Fig. 15 se muestra esta clasificación, así como los sitios donde se instalaron los acelerógrafos (círculos oscuros). En la zona de alto riesgo, se instalaron tres estaciones (AYAC, MUNI y PLA5), una más en la zona de riesgo sísmico medio (AVIA), y otros dos en zonas donde se tiene prevista la expansión de la ciudad. Una de estas zonas denominada como Pampas de San Antonio se puso la estación SANA, y la otra hacia la zona de CHEN CHEN (CHEN), donde se decidió reubicar a los afectados del sismo de Arequipa.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 16 (mapa urbano de la ciudad de Moquegua), se ha graficado, en cada uno de las seis estaciones mencionadas, registros de dos réplicas de magnitudes similares. Si observamos sus amplitudes, vemos que ninguna de ellas muestra una amplitud menor, por lo que, se aplicó a cada estación el método de Nakamura, con el objeto de seleccionar la estación que tenga el menor efecto de sitio, y así tomarlo como estación de referencia. En la parte inferior de la Fig. 17, se muestran los resultados para las componentes horizontales de las seis estaciones mencionadas. Cada razón espectral es el promedio de 9 réplicas analizadas con el método de Nakamura. La razón espectral que presentó menor amplificación fue la de CHEN, graficada con línea gruesa. Finalmente, tomando como estación de referencia este promedio espectral, se aplicó el método EP a las otras cinco estaciones, cuyos resultados se muestran en la parte superior de la Fig. 17, donde nuevamente se ha graficado con línea gruesa la estación de referencia (CHEN) y con líneas delgadas el promedio de las razones espectrales obtenidas para cada componente horizontal y cada estación. En promedio podemos observar una amplificación relativa en las cinco estaciones, entre 5 y 10 veces en un rango de

frecuencias de 1.0 a 20 Hz aproximadamente, siendo la estación SA (SANA) la que muestra una mayor amplificación.

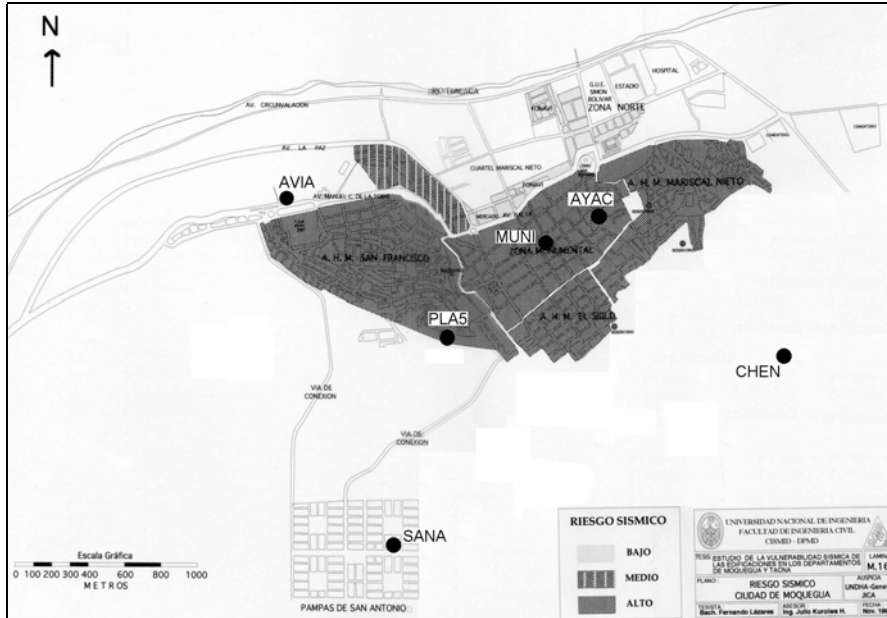


Fig. 15. Mapa urbano de la ciudad de Moquegua, que muestra tres zonas con diferente nivel riesgo sísmico (Lázares, 1994) Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CHEN, estación de referencia.

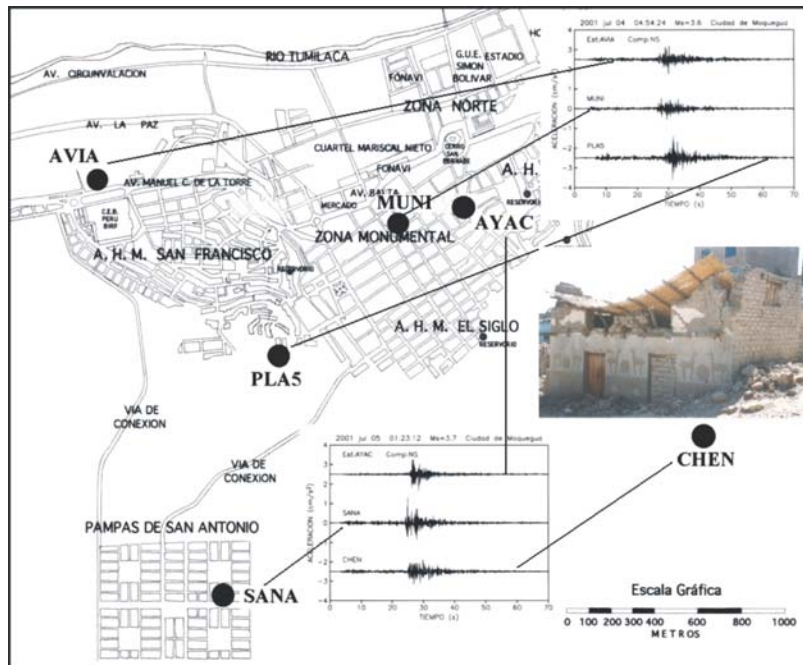


Fig. 16. Mapa urbano de la ciudad de Moquegua. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CHEN, estación de referencia Comparación de seis registros (una por cada estación) de dos réplicas con magnitudes similares.

Aún cuando la estación de referencia no fue la adecuada, los resultados obtenidos demuestran que: i) las zonas clasificadas con riesgo sísmico medio y alto, presentan amplificaciones relativa muy parecidas, alrededor de 5 veces en una banda de frecuencias entre 2 y 8 Hz.; ii) De acuerdo a los resultados observados en la estación SANA, la zona de las Pampas de San Antonio, debe ser clasificada como zona de alto riesgo sísmico; iii) De acuerdo a los resultados observados en la estación CHEN, probablemente esta zona sea la adecuada para el futuro crecimiento de la ciudad de Moquegua, sin embargo se recomienda realizar mas mediciones con registros de movimientos débiles en diferentes puntos de esta zona.

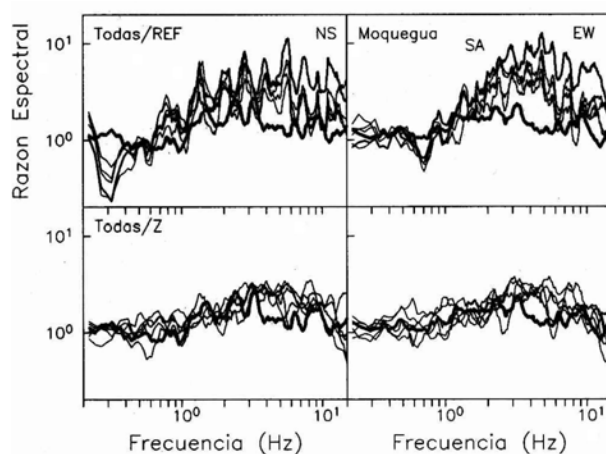


Fig. 17. Parte superior, resultados de aplicar el método EP a las componentes horizontales, de las cinco estaciones en suelo blando. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior, comparación del método de Nakamura para las seis estaciones, línea gruesa estación de referencia (CHEN).

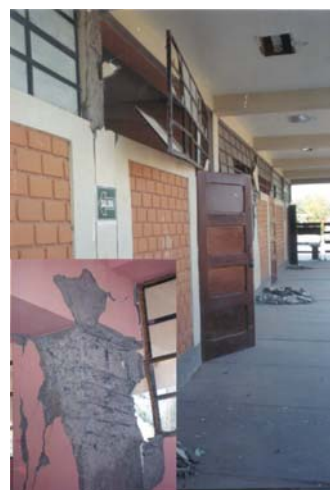


Fig.18. Arriba, colegio ubicado cerca de estación AYAC. Derecha, colegio ubicado cerca de estación SANA

Daños: En esta ciudad se presentaron los mayores daños por el sismo de Arequipa, precisamente en la zona caracterizada por Lázares (1994), como de alto riesgo sísmico, que mostró amplificaciones de hasta 5 veces en promedio en una banda de frecuencias entre 2 y 8 Hz. Este mismo comportamiento se puede observar en el espectro de respuesta de aceleraciones del registro del evento principal (Fig.5) el cual muestra una demanda sísmica en promedio de 0.6g en ambas direcciones para una banda de periodos de estructuras de 0.1 a 0.7 s. Esto explica los daños muy severos a edificaciones de adobe (Fig. 16), tanto antiguas (en promedio de 100 años y ubicadas en la zona monumental) y las recientes (en promedio 20 años y ubicadas en las zonas periféricas). Estas últimas se ubican en zonas de topografía con pendientes fuertes, aumentando el efecto de sitio.

Por otro lado, colegios de concreto reforzado construidos antes de la vigencia del último código sismorresistente (1997) sufrieron daños moderados a severos, sobre todo de columna corta. En la Fig. 18 se muestra este efecto, probablemente por la mayor amplificación observada en SANA; donde un colegio cerca de esta estación presentó daños graves de columna corta, a diferencia de otra, cerca de la estación AYAC, donde se tuvo menor amplificación relativa, el colegio se comportó adecuadamente. Colegios construidos con el código sismorresistente vigente se comportaron satisfactoriamente.

Ciudad de Tacna

Efectos de sitio: Nuevamente en esta ciudad los daños observados después del sismo, coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994), quien, con base a estudios geológicos y de inspección realizada a los diferentes tipos de vivienda (adobe, albañilería con techo flexible, albañilería semi-resistente y albañilería resistente) divide en ocho sectores a la ciudad de Tacna y de acuerdo a los daños observados y al porcentaje del tipo de vivienda en cada una de estos sectores, clasifica a la ciudad en riesgo sísmico medio y alto. En la Fig. 19 se muestra esta clasificación, así como los sitios donde se instalaron los acelerógrafos (círculos oscuros). En la zona de alto riesgo, se instalaron tres estaciones (NUEV, TUPA y HOSP), y otras tres en la zona de riesgo sísmico medio (CENT, UNJB y PALM), y uno más, en una zonas donde se tiene prevista la expansión de la ciudad, denominada como CONO SUR (CANO).

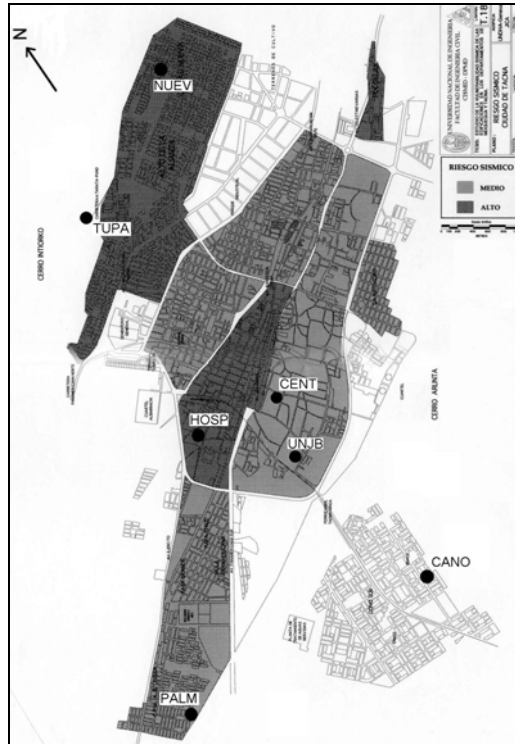


Fig. 19. Mapa urbano de la ciudad de Tacna, que muestra dos zonas con diferente nivel riesgo sísmico (Lázares, 1994) Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. PALM, estación de referencia.

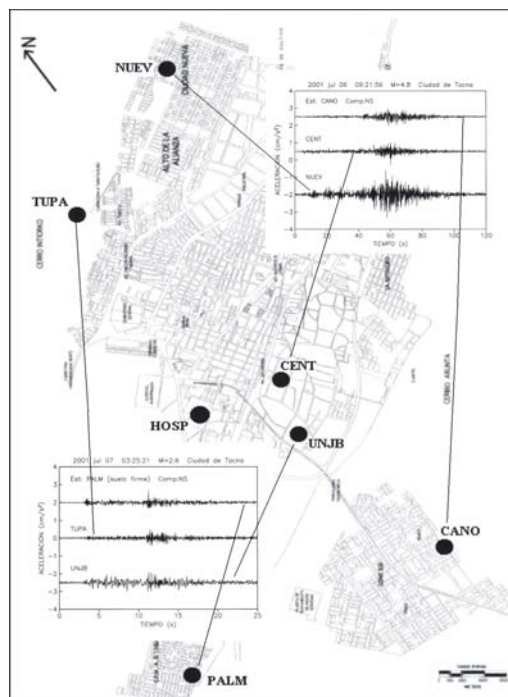


Fig. 20. Ciudad de Tacna. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. PALM, estación de referencia. Comparación de seis registros (una por cada estación) de dos réplicas de diferente magnitud.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 20 (mapa urbano de la ciudad de Tacna), se ha graficado, en cada uno de las seis estaciones mencionadas, registros de dos réplicas de magnitudes similares. Si observamos sus amplitudes, vemos que tres de ellas muestra una amplitud menor (CANO, TUPA y PALM), por lo que, se aplicó a cada una de ellas el método de Nakamura, con el objeto de seleccionar la estación que tenga el menor efecto de sitio, y así tomarlo como estación de referencia. En la parte inferior de la Fig. 21, se muestran los resultados para las componentes horizontales de las tres estaciones mencionadas. Cada razón espectral es el promedio de cinco réplicas analizadas con el método de Nakamura. La razón espectral que presentó menor amplificación fue la de PALM, graficada con línea gruesa. Finalmente, tomando como estación de referencia este promedio espectral, se aplicó el método EP a las otras seis estaciones, cuyos resultados se muestran en la parte intermedia y superior de la Fig. 21, donde nuevamente se ha graficado con línea gruesa la estación de referencia (PALM) y con líneas delgadas el promedio de las razones espectrales obtenidas para cada componente horizontal y cada estación. En forma general, se observa un comportamiento similar a los efectos de sitio observados en la ciudad de Arequipa, ya que en este caso, tres lugares (TUPA, UNJB, HOSP) analizados muestran amplificaciones relativas mayores a 10 veces hacia frecuencias bajas (0.3 a 10 Hz), mientras que la estación NUEV, muestra una amplificación mayor a 10 veces hacia altas frecuencias (2.0 a 10 Hz). A diferencia de las estaciones de CENT y CANO, cuyas amplitudes son menores a 10 veces pero en la misma banda de frecuencias (0.3 a 10 Hz.).

Por lo tanto, si comparamos estos resultados con la zonificación de Lazares (1994), observamos una correspondencia buena con las zona clasificada como riesgo sísmico alto y las mayores amplificaciones relativas observadas en HOSP, TUPA y NUEV. En cuanto a la zona clasificada como riesgo sísmico medio, la amplificación observada en la estación UNJB, no corresponde con esta zona, por lo que sería deseable una revisión de esta zona. Así también, la zona cercana a la estación de referencia (PALM), puede ser reclasificada como de riesgo sísmico bajo. Por otro lado, podemos observar que la zona conocida como CONO SUR, probablemente puede ser clasificada como de riesgo sísmico medio, por la respuesta de la estación CANO.

Daño: Viviendas de adobe ubicados en la zona antigua sufrieron daños severos (estación CENT). Las de ladrillos y bloques de concreto auto-construidas de dos y tres pisos localizados cerca de las estaciones NUEV y UNJB sufrieron colapso total y parcial (Fig.22). Estos daños corroboran las amplificaciones observadas hacia altas frecuencias en casi todos los lugares analizados, así como defectos estructurales en su diseño; entre otros: baja densidad de muros (primer piso blando), torsión y mecanismo viga fuerte-columna débil. Como en Arequipa, edificaciones de concreto reforzado flexibles tuvieron daños en su tabiquería como el caso del hospital Hipólito Unanue (HOSP). Y así como en Moquegua, varios colegios sufrieron daños por columna corta.

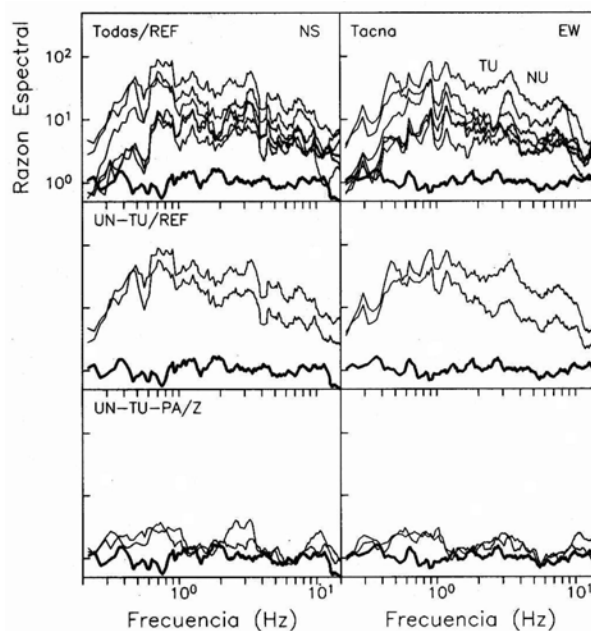


Fig. 21. Parte superior, resultados para las componentes NS y EW del efecto de sitio en las siete estaciones. Línea gruesa, estación de referencia. Líneas delgadas, estaciones en suelo blando. Parte inferior,



Fig.22. Izquierda, vivienda ubicado cerca de estación NUEV. Derecha, vivienda ubicado cerca de estación UNJB.

Ciudad de Ilo

Efectos de sitio: En esta ciudad los daños observados después del sismo, no coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994), quien, siguiendo el mismo procedimiento, clasifica a la ciudad de Ilo en riesgo sísmico bajo y medio. En la Fig. 23 se muestra esta clasificación, así como los sitios donde se instalaron los acelerógrafos (círculos oscuros). Dos en la zona de riesgo medio, y uno en la zonas donde se tiene prevista la expansión de la ciudad, denominada como PAMPA INALÁMBRICA (BRI5), donde se observaron la mayoría de los daños.

Con el objeto de resaltar el comportamiento dinámico de estos suelos, en la Fig. 24 (mapa urbano de la ciudad de Ilo), se ha graficado, en cada uno de las tres estaciones mencionadas, registros de una réplicas. Si observamos sus amplitudes, vemos que dos de ellas (CARI y MAGI) muestra una amplitud mucho menor que la instalada en la zona de expansión (BRI5). Esto se debe, a que estas dos estaciones se encuentran sobre roca. Esto es corroborado al aplicar el método Nakamura a seis réplicas registradas en estas dos estaciones. En la parte superior de la Fig.25 se muestra este análisis; mientras que en la parte inferior, se presenta el resultado de aplicar el método EP a la estación BRI5. La amplificación observada en este lugar es aproximadamente menor a 5 veces en un rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz.

Daños: Los daños se concentraron en viviendas de ladrillos de arcilla ubicados en la zona de expansión, probablemente debidas al efecto de sitio observado en este lugar (BRI5), así como defectos estructurales similares a los encontrados en Tacna siendo moderados a severos.

Ciudad de Camaná: En esta ciudad solamente se pudo analizar un solo lugar ubicado en el Hotel Premier, donde registramos 9 réplicas, a los cuales se le aplicó el método de Nakamura. En la Fig. 26 se muestra este resultado, donde podemos notar que el promedio presenta una amplificación (de los resultados anteriores se puede mencionar que esta amplitud esta subvaluada) de 4 veces aproximadamente entre 2 y 8 Hz. Se observaron daños leves a moderados en algunas viviendas.

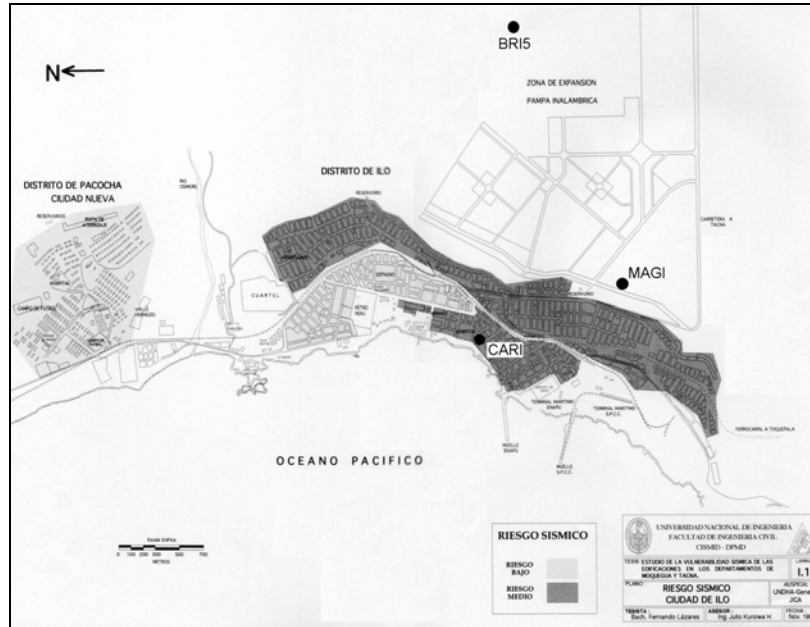


Fig. 23. Mapa urbano de la ciudad de Ilo, que muestra dos zonas con diferente nivel riesgo sísmico (Lázares, 1994) Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CARI y MAGI estaciones en roca.

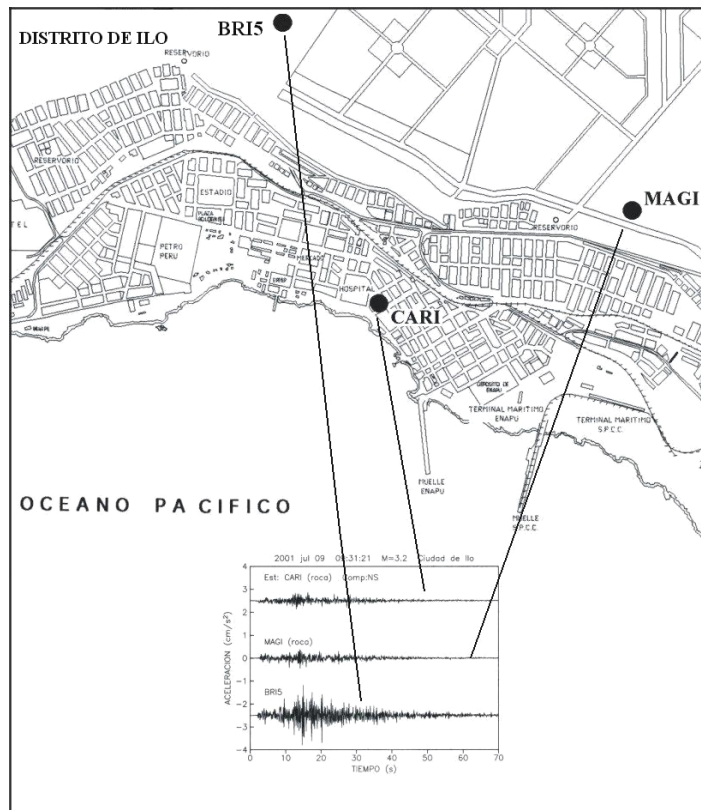


Fig. 24. Ciudad de Ilo. Círculos oscuros, ubicación de las estaciones sísmicas. CARI y MAGI, estaciones de referencia. Parte inferior, comparación de tres registros (una por cada estación) de una réplica del sismo de Arequipa.

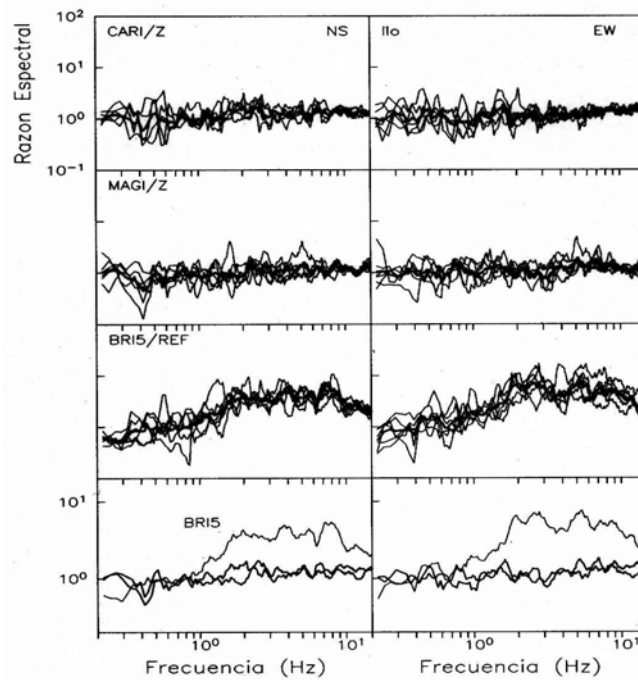


Fig. 25. Las primeras cuatro gráficas muestran los resultados de aplicar el método de Nakamura a CARI y MAGI. La quinta y sexta gráfica los resultados de aplicar el método de EP a la estación BRI5. Parte inferior, resultados del efecto de sitio en la estación BRI5.

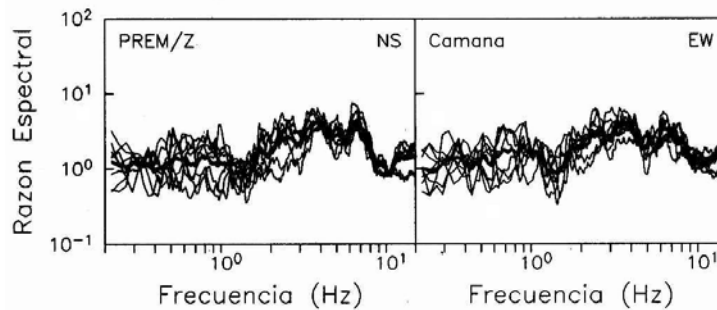


Fig. 26. Resultados de aplicar el método de Nakamura en las componentes NS y EW, en la estación PREM, de la ciudad de Camaná. Líneas delgadas, razones espectrales individuales. Línea gruesa, promedio de las razones espectrales.

Conclusiones

- El terremoto de Arequipa, Perú del 23 de junio del 2001 ($M_l=6.9$, $M_s=7.9$, $M_w=8.4$) de fallamiento inverso y con profundidad de 38 km, se localizó en la costa del Pacífico frente a la ciudad de Ocoña, Arequipa. Se reportó un maremoto local (ola de 8 a 10 m de altura, Tavera et al., 2001) en la localidad de la Punta, Camaná.
- La agencia EIC, reporta una falla inversa de bajo ángulo ($M_o=2.2 \times 10^{21}$ Nm, $az=309$, $buz=21$ y $corr=61$), que se propagó hacia el extremo sureste formando dos zonas de

liberación máxima de energía: la primera alrededor del evento principal y la segunda al sureste concentrada en las coordenadas 17.5° S y 72.0° W

- El área de ruptura (300 x 100 km, aproximadamente) presenta un estrangulamiento en su parte central provocada por la ausencia de réplicas. Esta ausencia se deba probablemente a la coincidencia de esta zona con las áreas de ruptura de dos sismos recientes (16/02/1979, Ms=6.9 y 03/04/1999, Ms=6.8). Esta área fue estimada a partir de la distribución de 101 réplicas localizadas y reportadas por USGS National Earthquake Information Center (NEIC) ($M > 4$), ocurridas durante los primeros 21 días después del sismo principal.

- De acuerdo a la distribución de las réplicas y los daños observados muestra una gran directividad hacia el sureste.

- Esta zona presenta un periodo de recurrencia de aproximadamente 100 años (Dorbath et al, 1991).

- La aceleración máxima del sismo de Arequipa registrada en suelo blando en la ciudad de Moquegua fue de 284 gales en la dirección EW, y su duración de la etapa intensa llegó a ser más de medio minuto. El espectro de respuesta muestra una demanda sísmica en promedio de 0.6g en ambas direcciones para una banda de periodos de estructuras de 0.1 a 0.7 s (CISMID-UNI).

- Se propone la siguiente ley de atenuación para el sur del Perú: $\text{Log}(A_{\text{max}}) = 1.3 + 0.3M - \text{Log}R - 0.0031R$, $\sigma = 0.4$.

- Las curvas de igual intensidad (MM), desarrolladas por el IGP (Tavera et al., 2001) y el Instituto Geofísico de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA), presentan una intensidad de VIII como el valor más alto observado, e intensidades de VII para las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna.

- El método de Nakamura muestra deficiencias en cuanto a su amplificación, al ser comparada con el método estándar en cuatro de las ciudades analizadas. Sin embargo, el método fue indispensable para seleccionar sitios de referencia con un mínimo de efectos de sitio en las ciudades de Moquegua y Tacna.

- Debido al problema de no tener el mismo registro de la réplica en la estación de suelo blando y la de referencia, se modificó el método estándar (llamándola *método estándar-promedio, EP*), que consiste en obtener un espectro de Fourier-promedio de varias réplicas en la estación de referencia, el cual será utilizado como espectro maestro para obtener las razones espectrales individuales en cada una de las estaciones seleccionadas.

- En la ciudad de Arequipa, el estudio se realizó en base a los daños observados después del temblor y a la propuesta de microzonificación sísmica realizado por Zenon (1991), que divide a la ciudad de arequipa en cuatro zonas sísmicas. Los valores de amplificación relativa obtenidos en ocho sitios concuerdan en forma general con las zonas propuestas. Los periodos dominantes obtenidos por Zenon y los obtenidos en este trabajo, presentan diferencias en cuanto a sus valores, en especial hacia bajas frecuencias, ya que la excitación de estos suelos con sismos provocan bandas de amplificación y no frecuencia dominante estrechas.

- En la ciudad de Moquegua, aún cuando la estación de referencia no fue la adecuada, los resultados obtenidos demuestran que: i) las zonas clasificadas con riesgo sísmico medio y alto, presentan amplificaciones relativa muy parecidas, alrededor de 5 veces en una banda de frecuencias entre 2 y 8 Hz.; ii) de acuerdo a los resultados observados en la estación SANA, la zona de las Pampas de San Antonio, debe ser clasificada como zona de alto riesgo sísmico; iii) de acuerdo a los resultados observados en la estación CHEN, probablemente esta zona sea la adecuada para el futuro crecimiento de la ciudad de Moquegua, sin embargo se recomienda realizar mas mediciones con registros de movimientos débiles en diferentes puntos de esta zona.

- En la ciudad de Tacna, al comparar estos resultados con la zonificación de Lazares (1994), observamos una correspondencia buena con las zona clasificada como riesgo sísmico alto y las mayores amplificaciones relativas observadas en HOSP, TUPA y NUEV. En cuanto a la zona clasificada como riesgo sísmico medio, la amplificación observada en la estación UNJB, no corresponde con esta zona, por lo que seria deseable una revisión de esta zona. Así también, las zona cercana a la estación de referencia (PALM), puede ser reclasificada como de riesgo sísmico bajo. Por otro lado, podemos observa que la zona conocida como CONO SUR, probablemente puede ser clasificada como de riesgo sísmico medio, por la respuesta de la estación CANO.

- En la ciudad de Ilo, los daños observados después del sismo, no coincidieron con el mapa de riesgo sísmico elaborado por Lázares (1994). Los daños se observaron en la zona de expansión de la ciudad (Pampa Inalámbrica, BRI5) cuya amplificación observada en este lugar es aproximadamente menor a 5 veces en un rango de frecuencias entre 2 y 10 Hz.

- En forma general, los daños en las edificaciones responden a los efectos de sitio encontrados en las cinco ciudades. Edificaciones de mampostería de sillar, adobe y

ladrillos o bloques de concreto, sufrieron daños severos, colapsos parciales y totales. Las de sillar ubicadas en suelos rocosos no sufrieron daños. Edificios de concreto reforzado flexibles presentaron daños en los muros de tabiquería. Colegios de concreto reforzado, construidas antes de la última norma de diseño sísmico (1997), sufrieron daños severos por la presencia de columnas cortas. Las construidas con la última norma se comportaron satisfactoriamente.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Ing Héctor Palsa Árias-Barajona del Instituto Geofísico de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, por su apoyo en el trabajo de campo, así como al CISMID, Municipalidad Provincial de Moquegua. y Universidad Nacional Jorge Basadre, Tacna.

Bibliografía

- Aguilar, Z. (1991). Microzonificación sísmica de la ciudad de Arequipa, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, CISMID-Laboratorio de Geotécnia, Lima, Perú, pp.176.
- Boyd, T. M., J. A. Snoke, I. S. Sacks y A. Roodríguez (1984). High -resolution determination oof the Benioff zone geometry beneath Southern Peru, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 559-568.
- Cotrado, D. y Y. Siña (1993). Microzonificación sísmica de la ciudad de Tacna, Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna, Facultad de Ingeniería, Tacna, Perú, pp.
- Cuenca, J. (1993). Modelación de ondas P y SH en el suroeste del Perú y determinación de Tips en el Perú, Tesis de maestría UNAM, México, p112.
- Dewey, J. F. y S. H. Lamb (1992). Active tectonics of the Andes. *Tectonophysics*, 205 (1-3), 79-95.
- Dorbath, L., A. Cisternas and C. Dorbath (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquake in Peru. *Bull. Seism. Soc. Am.* 80, 551-576.
- Field, E.H., K. Jacob (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent, *Bull. Seism. Soc. Am.* 85, 1127-1143.
- Grange, F. P. Cunninham, J. Gagnepain, D. Hartzfield, P. Molnar, L. Ocola, A. Rodríguez, S. W. Roecker, J. M. Stock y G. Suárez (1984). The configuration f the seismic zone and the doowgoing slab in the southern Peru, *Geophys. Res. Lett.*, 11, 38-41.
- Lázares, L.F. (1994). Estudio de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones en los departamentos de Moquegua y Tacna, Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú, pp.286.
- Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 83, 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1994). Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13, 413-423.

- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1995). Efectos de sitio en la Ciudad de Oaxaca. Resultados con registros de temblores y mediciones de microtemblores, *Revista de Ingeniería Sísmica*, 50, México, 1-13.
- Lomnitz, C. (1970). Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955, *Geolog.Rundsch*, 59, 938-960.
- Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú, 1513-1974). Inst. Geol. Min., Lima, 131 pp.
- Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena, and R. Quaas (1988). A study of relative amplification of seismic waves in the valley of Mexico with respect to a hill zone site, *Earthquake Spectra*, 4, 653-674.
- Tavera, H, E. Buforn, I.Bernal, Y. Antayhua and L. Vilcapoma (2001). The Arequipa (Perú) earthquake of June 23, 2001, *Journal of Seismology*, submitted.
- Zegarra, L, A., San Bartolomé y Daniel Quiun (2001). Comportamiento ante el terremoto del 23-06-2001 de las viviendas de adobe reforzadas en Moquegua, Tacna y Arica, Serie DI-SIC-2001-07,08,09, Pontificia Universidad Católica del Perú, Dpto. de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Lima, Perú, pp 44..

Nombre de archivo: efectos1
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:53 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:53 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 6 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:36 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 32
Número de palabras: 7,711 (aprox.)
Número de caracteres:43,955 (aprox.)

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

Rubén Boroschek¹, Diana Comte², Alexis Morales¹

¹Departamento de Ingeniería Civil, rborosch@ing.uchile.cl

²Departamento de Geofísica, dcomte@dgf.uchile.cl

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas

Universidad de Chile

Resumen

Los Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica de la Universidad de Chile en conjunto con instituciones internacionales poseen redes sismológicas y de movimiento fuerte en el norte de Chile. Estas redes registraron el terremoto del 23 de Junio del 2001 de Magnitud $M_w=8.4$ ocurrido en el Sur del Perú que es a su vez el mayor detectado en los últimos 25 años en la zona. El evento en la zona norte de Chile presenta importantes aceleraciones y velocidades máximas considerando que la zona esta a más de 400 km de distancia del epicentro y 200 km de la zona de ruptura y espectros de respuesta muy cercanos a la demanda elástica establecida en la norma chilena de diseño NCh 433 of 96.

Abstract

The Civil Engineering and Geophysics Department of the University of Chile together with international institutions have seismic and strong motion stations in the northern part of Chile. These networks register the June 23, 2001 Magnitude $M_w=8.4$ event that occurred in Southern Peru, which is the strongest event in the last 25 years. This earthquake presented in the Northern Chilean region relatively large maximum velocities and accelerations although the recording sites are more than 400 km away from the epicentral region and 200 km of the rupture zone. Elastic response spectra from these records are close to the elastic demand established in the Chilean NCh 433 of 96 design code.

Introducción

La Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile a través de sus Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica han mantenido un programa permanente de instrumentación en la brecha sísmica del norte del país con el objeto de determinar las características sismotectónicas de esta región, el análisis del movimiento sísmico y su relación con el daño en infraestructura.

La red sismológica del norte de Chile fue instalada a través de un proyecto conjunto entre el Departamento de Geofísica, el Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS-Francia), el Institut de Recherche pour le Développement (IRD-Francia), el Centro Sismológico de la Universidad de Tarapacá (Arica) y el Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad Católica de Antofagasta. La

Red de Movimiento Fuerte, acelerógrafos, fue instalada por el Departamento de Ingeniería Civil desde los años 70 y posee instrumentos en Putre, Arica, Cuya, Pisagua, Iquique, El Loa, Tocopilla y Antofagasta. Estas redes han permitido el monitoreo permanente de la actividad sísmica y han ayudado a mitigar el riesgo sísmico nacional.

Tabla 1.
Aceleración y Velocidad Máxima Horizontal

Registro	Acel. Max [g]	Vel. Max [cm/seg]
Cuya	0.14	8.62
	0.16	9.39
Pisagua	0.03	2.94
	0.04	4.26
Putre	0.20	11.74
	0.19	10.65
Arica Casa	0.27	19.86
	0.32	32.64
Arica Costa	0.34	26.00
	0.27	25.17
Arica Hospital	0.21	19.17
	0.28	19.10
Poconchile	0.25	29.21
	0.26	29.06

Tabla 2.
Aceleración y Velocidad Máxima Vertical

Registro	Acel. Max [g]	Vel. Max [cm/seg]
Cuya	0.07	4.40
Pisagua	0.04	5.01
Putre	0.10	5.50
Arica Casa	0.18	18.55
Arica Costa	0.09	13.05
Arica Hospital	0.14	15.64
Poconchile	0.15	14.90

Estas redes registraron el sismo principal y las numerosas réplicas asociadas al terremoto del 23 de Junio del 2001 que tuvo una magnitud $M_w=8.4$ y que corresponde al sismo más grande registrado en los últimos 25 años en la zona. El análisis desde un punto de vista sismológico de este evento se presenta en Comte et al., (Ref. 1).

Implicancias para la Ingeniería Sismorresistente

El terremoto del sur del Perú se registró en siete estaciones de acelerógrafos en el norte de Chile (Ref 2). La Figura 1 presenta el registro obtenido en el acelerógrafo digital de Arica instalado al amparo del proyecto conjunto IRD-UCh-IPGS. Las aceleraciones y velocidades máximas horizontales y verticales observadas se presentan en las Tablas 1 y 2 y los espectros de respuesta asociados a un 5% de razón de amortiguamiento crítico en las Figuras 2, 3 y 4. Se ha clasificado preliminarmente el tipo de suelo de cada estación con el fin de comparar los espectros elásticos con los requisitos de la norma NCh 433 of 96. Para esta clasificación se ha utilizado como referencia el período correspondiente al máximo valor del espectro y antecedentes geotécnicos parciales. En el caso de la Estación Arica Hospital existe una clasificación geotécnica que lo ubica como de borde entre Tipo de Suelo II y III.

Si se considera que la distancia epicentral promedio entre las estaciones de registros es cercana a los 450 kilómetros, los valores de velocidades y aceleraciones máximas obtenidas son considerablemente mayores a los observados en otros eventos sísmicos nacionales. Por ejemplo las aceleraciones máximas registradas en las tres estaciones de Arica, 0.28, 0.32 y 0.34 g, son mayores a las que se estiman con las curvas de atenuación usualmente utilizadas, aunque dichas curvas normalmente no consideran distancias superiores a los 300 km.

Un valor particularmente superior a lo esperado es la velocidad máxima observada a distancias mayores de 400 km con respecto a lo registrado a distancias mucho menores. Por ejemplo, en las estaciones de Arica este valor es cercano a los 30 cm/seg, en contraste con la velocidad que se obtuvo en el sismo del 3 de Marzo de 1985 en Melipilla, 33 cm/seg y en Llolleo 40 cm/seg, ubicadas a distancias epicentrales menores de 100 km.

Con estos nuevos datos, para suelos tipo I y II e incluyendo solamente los datos de los terremotos de 1985 y 1995, una proposición preliminar de curva de atenuación es la siguiente, Figuras 8 y 9:

$$\text{Aceleración Máx. Horizontal} = \frac{0.002 \cdot e^{M_w}}{(R + 60)^{0.59}}$$

$$\text{Aceleración Máx. Vertical} = \frac{0.002 \cdot e^{0.97M_w}}{(R + 60)^{0.66}}$$

Estas curvas se deben corregir al incorporar información sobre las características del suelo, antecedentes de aceleración a distancias menores para este sismo, que en estos momentos no están disponibles y otros eventos de subducción chilenos.

En la Figura 5 a y b se presenta la aceleración máxima de los registros comparada con la aceleración efectiva, derivada del espectro de respuesta. De esta figura se aprecia que la razón entre los valores efectivos y máximos de aceleración es cercana a 0.90, lo que es similar al valor observado con los registros de aceleración de los años 85 y 95.

En Arica (Intensidad VII) este terremoto generó espectros de respuesta elástica muy cercanos al de diseño de la norma NCh433. La norma en general fue superada en el rango de periodos mayores a 0.8 segundos, en suelo equivalente tipo II y en zona sísmica 3. En los otros casos, de los cuales se poseen antecedentes instrumentales, la norma no se vio superada, pero si igualada, Figura 4.

Al comparar este evento con el que ocurrió el 8 de agosto de 1987, cerca de la costa y de la desembocadura del río Camarones, a aproximadamente 50 kilómetros de distancia hipocentral de la ciudad de Arica se observa que los máximos fueron similares: Intensidad VI-VII, aceleración 0.28 g y velocidad 21 cm/seg (González y Saragoni, Ref 2). En la Figuras 7 se comparan los espectros de respuesta para la Estación Arica Casa - Cementerio para ambos eventos. En esta se observa que el evento del Sur del Perú generó demandas mayores que las del 1987, para periodos superiores a 0.25 segundos y presenta una banda espectral más amplia.

Después de ocurrido este evento los Departamentos de Geofísica e Ingeniería Civil colocaron 11 acelerógrafos digitales adicionales en la zona, lo que permitirá reforzar la capacidad de evaluación en la primera y segunda región del país.

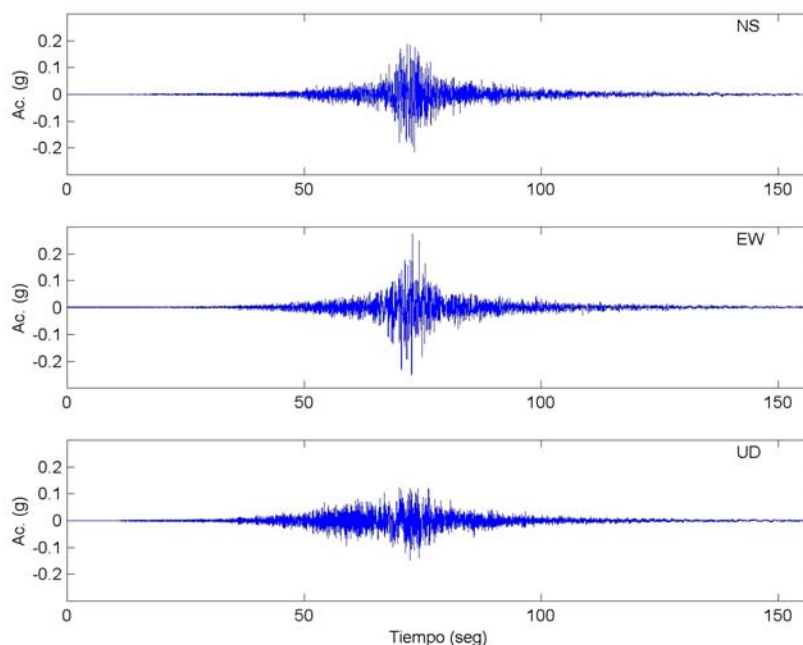


Figura 1: Acelerograma Estación Hospital Arica

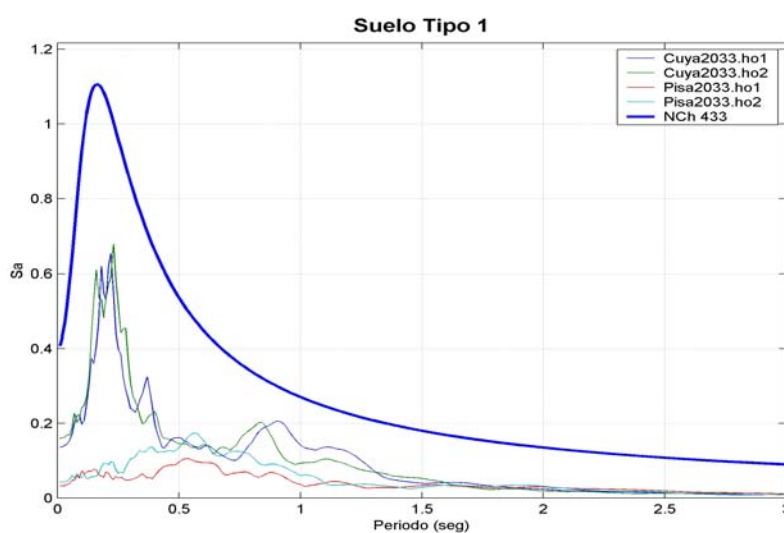


Figura 2: Espectro de respuesta 5% amortiguamiento, Zona 3, Suelo I (clasificación por máximo valor espectral) y comparación con requisito elástico de la Norma NCh433.of96.

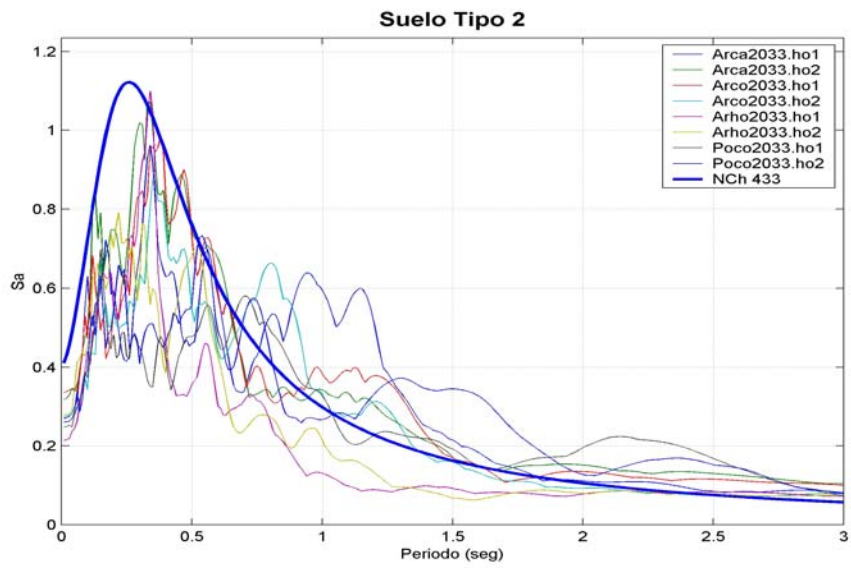


Figura 3: Espectro de respuesta 5% amortiguamiento, Zona 3, Suelo II (clasificación por máximo valor espectral) y comparación con requisito elástico de la Norma NCh433.of96.

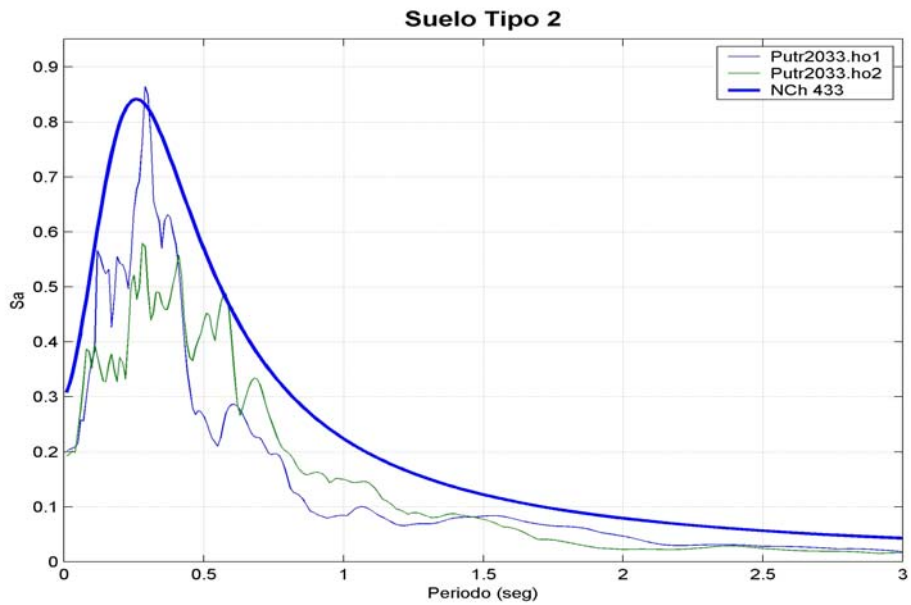


Figura 4: Espectro de respuesta 5% amortiguamiento, Zona 2, Suelo II (clasificación por máximo valor espectral) y comparación con requisito elástico de la Norma NCh433.of96.

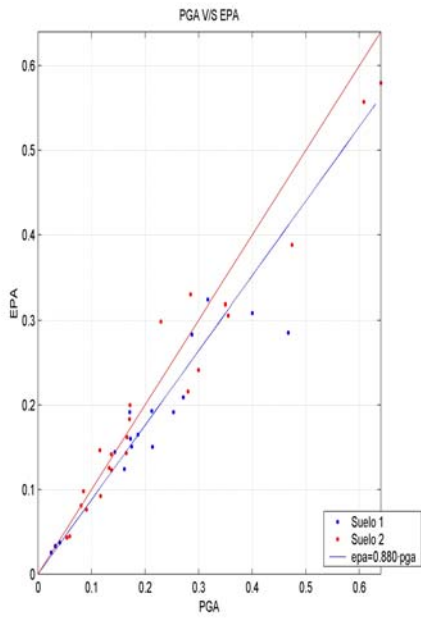


Figura 5.a: Comparación entre aceleraciones horizontales efectivas y aceleraciones máximas del registro. Sismos de 1985 y 1995

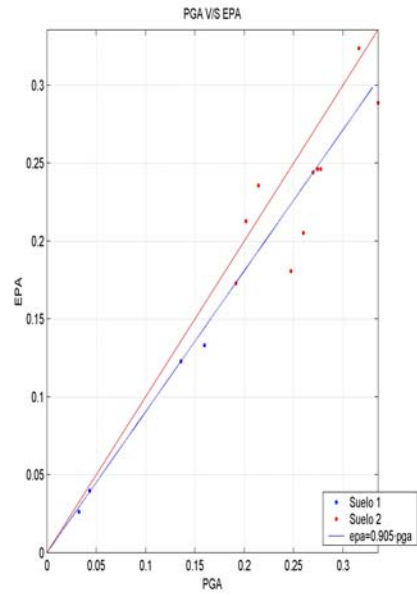


Figura 5.b: Comparación entre aceleraciones horizontales efectivas y aceleraciones máximas del registro. Sismo Sur Perú

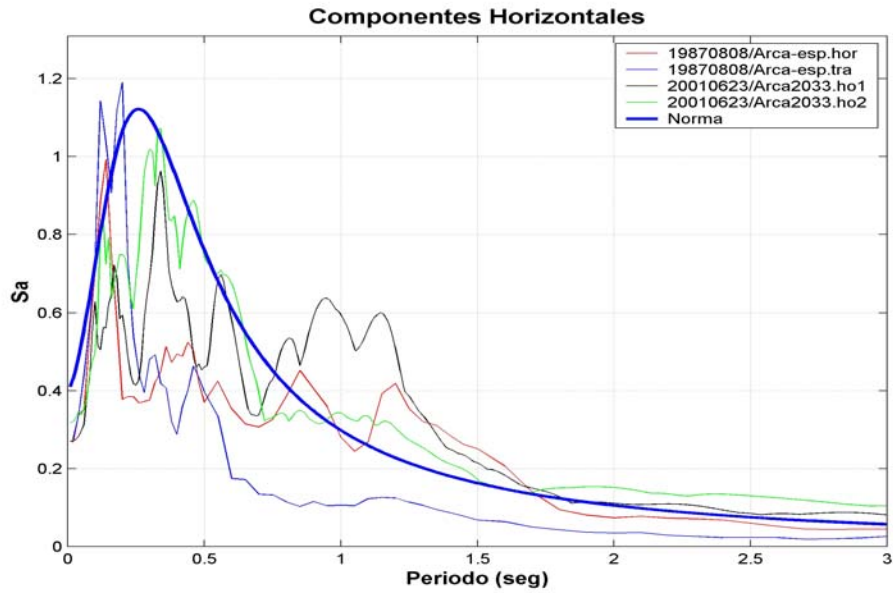


Figura 6: Comparación de Espectro de Respuesta Terremoto de Arica 1987 y Terremoto Sur Perú 2001 en la Estación Casa-Cementerio en la ciudad de Arica. Registros horizontales.

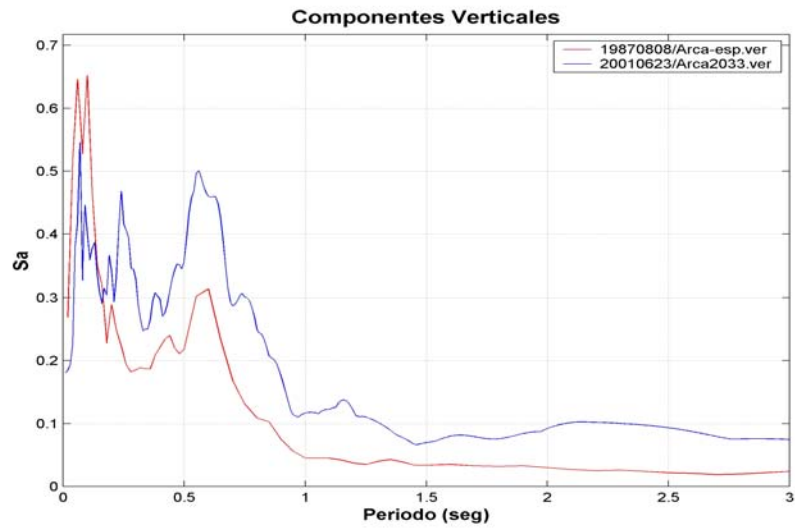


Figura 7: Comparación de Espectro de Respuesta Terremoto de Arica 1987 y Terremoto Sur Perú 2001 en la Estación Casa-Cementerio en la ciudad de Arica. Registros verticales.

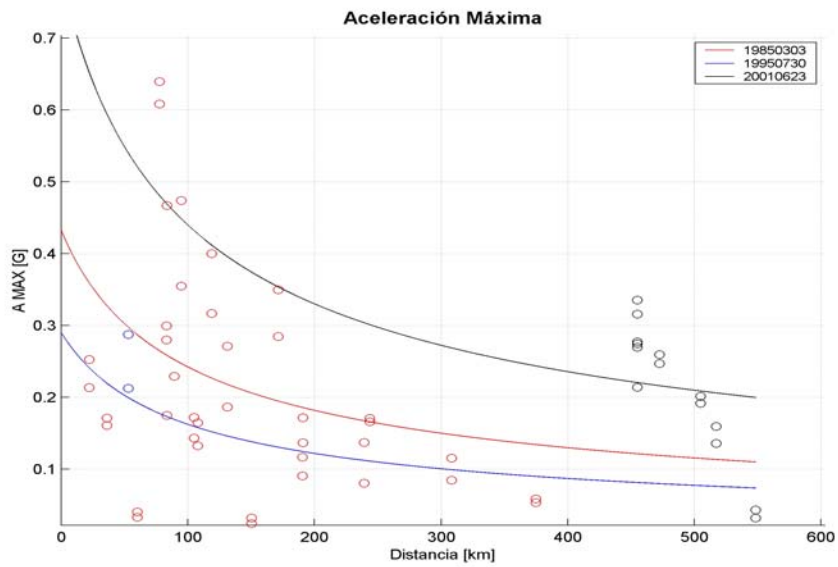


Figura 8: Curvas de atenuación para aceleración máxima horizontal

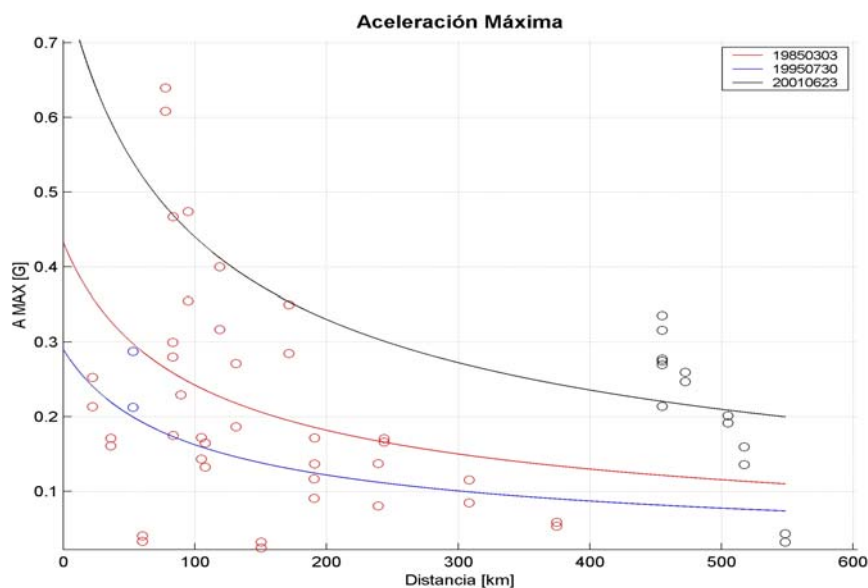


Figura 9: Curvas de atenuación para aceleración máxima vertical

Conclusiones

Se han analizado los registros de movimiento en la zona norte de Chile causado por el terremoto del 23 de Junio de 2001 en el Sur del Perú. Se concluye que las aceleraciones y velocidades son relativamente altas considerando la distancia a la zona de ruptura. Además se aprecia que la demanda de la norma chilena NCh 433 of 96 es equivalente a lo obtenido en este evento y que implicó una intensidad VII en la zona.

Agradecimientos

Se agradece a los Departamentos de Ingeniería Civil y Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y en especial al ingeniero Pedro Soto por el apoyo a este trabajo.

Bibliografía

1. Comte, D., Boroschek, R., Tavera, H., Dorbath, L., Portugal, D., Frogneux, M., Haessler, H., Montes, H., Bernal, I., Antayhua, Y., Salas, H., Inza, A., Rodriguez, S., Glass, B., Correa, E., Meneses, C., Balmaceda, I., Cruz, A., "Análisis del terremoto del sur del Perú, 23 de Junio 2001, Mw=8.4 utilizando

- datos locales". VIII Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Chile, 2002.
2. González, E. y Saragoni, G. R. "Análisis de los acelerogramas del sismo del Arica del 8 de Agosto de 1987". 5 Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Agosto 1989.
 3. Red Nacional de Acelerógrafos, "Registros en el Norte de Chile, Terremoto del Sur del Perú, 23 de Junio 2001, Mw=8.4", Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, RENADIC 01/04.

Nombre de archivo: efectos2_chi
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: El Terremoto del Sur de Perú 2001
Asunto:
Autor: rb
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 04:56 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 04:56 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 5 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:45 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 10
Número de palabras: 1,535 (aprox.)
Número de caracteres: 8,750 (aprox.)

Agradecimientos

Nuestro especial agradecimiento a los Drs. Ronald Woodman y Hernán Montes, Presidente Ejecutivo y Director Técnico del IGP, por el apoyo brindado al Centro Nacional de Datos Geofísicos (CNDG) para proceder a atender la emergencia producida por el terremoto del 23 de Junio de 2001 en la región sur del Perú. A los Ings. Jorge Espinoza (Jefe de Redes Geofísicas), David Portugal y Sr. Edmundo Vila, y demás personal de Redes Geofísicas que apoyaron en la preparación de los equipos de campo y posterior instalación. A la Dirección de Administración por el importante apoyo logístico en el desarrollo de las campañas de campo y edición del presente informe.

Asimismo, a todas las personas entrevistadas en los departamentos de Arequipa, Moquegua y Tacna, que a pesar de las circunstancias en que se encontraban, permitieron el acceso a sus viviendas a fin de ser evaluadas y respondieron cordialmente a nuestras preguntas.

A las autoridades de la Ciudad de Arequipa que nos brindaron todas las facilidades del caso para realizar los trabajos de campo. Al Dr. Orlando Macedo de la Oficina del IGP en Arequipa, por su apoyo con el material fotográfico. Al Arq. Gina Valdivia (Moquegua), Ings. Luis Vera Abarca y Jorge Barriga (Tacna), Arq. Enrique Schiaffino (Ilo) y Arq. Salvador Zavala (Mollendo) por su importante apoyo a fin de conseguir los respectivos mapas catastrales de cada ciudad y localidad encuestada. A los Ing. Elías Adriazola, Jorge Bedoya (Ilo), Bertha Arias y Luis Alxrto Guccione (Valle Algarrobal) por su ayuda en la toma de datos y en la obtención de material fotográfico.

Finalmente, nuestro agradecimiento a Rafael Alvarado por su apoyo en la traducción de los resúmenes de cada artículo al idioma inglés.

Nombre de archivo: agradece
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:13 P.M.
Cambio número: 4
Guardado el: 08/08/2008 02:59 A.M.
Guardado por: Hernando Tavera
Tiempo de edición: 14 minutos
Impreso el: 08/08/2008 02:59 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 2
Número de palabras: 253 (aprox.)
Número de caracteres: 1,445 (aprox.)



PERSONAL

**CENTRO NACIONAL DE DATOS
GEOFISICOS - SISMOLOGIA**

INSTITUTO GEOFISICO DEL PERU

Lima, Abril de 2002



- 1 .- Ing. Hector Aleman Hidalgo
- 2 .- Bach. Renzo Vilca Valencia
- 3 .- Bach. Freddy Ccallo Huaquisto
- 4 .- Dr. Hernando Tavera (*Director del CNDG*)
- 5 .- Sr. Henry Salas Vasquez
- 6 .- Bach. Igor Valdivia Polanco
- 7 .- Lic. Simeón Rodríguez Cancán
- 8 .- Ing. Hernán Heras Muchica
- 9 .- Lic. Luis Vilcapoma Lazaro
- 10.- MsC. Yolanda Zamudio Diaz
- 11.- Bach. María Manrique Rivera
- 12.- Ing. Isabel Bernal Esquia
- 13.- Ing. Yanet Antayhua Vera
- 14.- Sra. Yvonne Pérez-Pacheco Ramírez
- 15.- Bach. Julia Carpio Llerena
- 16.- Sra. Consuelo Agüero Alberco
- 17.- Ing. Efraín Fernández Aguilar

Nombre de archivo: personal
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título:
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:15 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:15 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 03:02 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 2
Número de palabras: 0 (aprox.)
Número de caracteres:5 (aprox.)

A 30 Días del Terremoto de Arequipa (Serie de Preguntas y Respuestas)

Hernando Tavera
Centro Nacional de Datos Geofísicos

Después de 30 días de ocurrido el terremoto del 23 de Junio de 2001, es necesario aclarar muchas de las versiones que sobre él han sido emitidas por personas e instituciones nacionales e internacionales. Algunas de estas versiones han generado confusión e incertidumbre en la población, de ahí que sea necesario informar qué hay de cierto y qué se ha logrado conocer a la fecha sobre el terremoto de Arequipa.

¿Cuál es el origen del Terremoto del 23 de Junio de 2001?

El terremoto de Arequipa tuvo su origen en la principal fuente sismogénica existente en el Perú; es decir, el terremoto fue generado por el proceso de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Debe entenderse que ambas placas se desplazan en sentido contrario, siendo la velocidad de desplazamiento de la placa de Nazca del orden de 8-10 cm/año. Este contacto o fricción de placas se produce de norte a sur frente al borde Oeste de Sudamérica, de ahí que los grandes terremotos ocurran frente a la costa o en el mar como frecuentemente se afirma.

¿Cuál fue la magnitud del terremoto?

Primero debemos entender que la magnitud es la medida cuantitativa (cantidad) del total de la energía que libera el terremoto. También es importante saber que, actualmente la magnitud puede ser medida utilizando varias escalas dependiendo del tipo de onda sísmica que se utilice y de la distancia a la cual fue registrada. Así, las más conocidas son las de Richter (ML), ondas de volumen (mb), ondas superficiales (Ms) y magnitud momento (Mw). El Instituto Geofísico (IGP) reporta la magnitud en la escala de Richter y mb; mientras que, las agencias internacionales reportan la magnitud Ms y Mw. En estas condiciones, los valores de magnitud expresados en Ms y Mw, siempre son mayores a los valores de Richter y mb.

El IGP reportó para el terremoto de Arequipa una magnitud de 6.9 en la escala de Richter; mientras que, las agencias internacionales dieron una magnitud en la escala Ms de 7.9 y en Mw de 8.4. Como se puede notar, estos valores son mayores que los de Richter, como se señaló anteriormente. A la fecha el IGP ha obtenido los siguientes valores de magnitud: 6.9 en Richter, 7.7 en Ms y 8.2 en Mw.

Se ha dicho que la diferencia de magnitud se debió a saturación en los registros del terremoto y que las agencias mundiales son más precisas, ¿qué hay de cierto en esto?

Después de la anterior explicación, es evidente que las personas que han vertido esas afirmaciones desconocen la existencia de diversas escalas para medir la magnitud de los terremotos. Además, el IGP cuenta en la actualidad con 32 estaciones sísmicas distribuidas en todo el país y de estas, 11 son de banda ancha; por lo tanto, no presentan saturación en la señal correspondiente al terremoto de Arequipa.

Algunos medios de comunicación han informado que el IGP ha minimizado el tamaño del desastre ocasionado por el terremoto de Arequipa, ¿es cierto?

Verá, esas afirmaciones tienen su origen en el valor de magnitud reportado por el IGP, pero debemos considerar que ahora la idea de la magnitud ya queda bastante clara. Sin embargo, debemos indicar que la magnitud de un terremoto NO tiene relación directa con la destrucción que se produce en superficie, esta es una idea totalmente equivocada ya que los daños y efectos en las construcciones dependen básicamente del tipo de suelo y de la calidad de las construcciones. Muchos de nosotros debemos recordar que en 1990 y 1991 ocurrieron dos terremotos en el nor-oriental peruano con magnitudes menores al terremoto de Arequipa (6.8-7.0Mw); sin embargo, produjeron destrucción y muerte en las ciudades de Moyobamba y Rioja, ambas ciudades y todas las localidades distribuidas en su alrededor quedaron tan destruidas como las ciudades de Moquegua y Tacna. Otro ejemplo, en 1999 la localidad de Chuschi en Ayacucho fue destruida con un sismo de magnitud 4.5Mw y Cusco en 1986 con un sismo de magnitud 6.0Mw. Creo que con estos ejemplos, debe quedar claro que el grado de destrucción de una ciudad debido a los terremotos NO depende del tamaño del mismo, sino de muchos otros factores directamente relacionado con la vulnerabilidad de las localidades y ciudades.

¿El terremoto de Arequipa tuvo alguna característica especial?

El terremoto de Arequipa fue sentido en superficie por las personas durante 120 segundos aproximadamente, tiempo durante el cual la energía que liberó se debió a que se produjo tres rupturas, o sea tres sismos. Iniciado el terremoto, 6 segundos después se produce un segundo sismo y 39 segundos después un tercero de mayor magnitud. Esta información esta disponible en nuestro web (<http://www.igp.gob.pe/cns/>) desde el día 26 de Junio y publicado en el Comercio el día 6 de Julio. Si se pretende ubicar estos sismos en el espacio, el segundo habría ocurrido a 15 km del primero en dirección SE y el tercero se ubicaría aproximadamente frente ala localidad de Camaná a 100 km de distancia del primero. Se debe remarcar que el tiempo de duración del terremoto es generalmente asociado al tiempo en que las personas sienten este fenómeno, pero realmente su tiempo de duración debe ser considerado a partir de su registro en un sismograma y en el caso del terremoto de Arequipa, este tuvo una duración del orden de 90 minutos sin considerar el registro de las fases que se transmiten por el interior de la Tierra.

¿Cuántas réplicas se ha producido después del terremoto de Arequipa?

Hasta el día 10 de Julio se ha registrado aproximadamente 180 réplicas con magnitudes mayores a 3.5mb y entre estas se encuentran las mayores ocurridas el 25 de junio, 5 y 7 de julio, esta ultima de mayor magnitud (6.5mb, 7.2Mw). Todas estas réplicas fueron sentidas en la región Sur con intensidades en la escala de Mercalli Modificada del orden de II como mínimo. Sin embargo, el número de réplicas sentidas y no sentidas supera los 4,500.

¿Qué información proporcionan las réplicas?

El análisis espacio-tiempo de las réplicas muestra el área total de fricción o mejor dicho, el área involucrada en todo el proceso que dio origen al terremoto de Arequipa. Estas réplicas muestran un área de fricción o ruptura de 260x160km², la misma que se extiende desde la localidad de Ocoña hasta la de Ilo. Debe entenderse que la energía liberada por el terremoto de Arequipa y sus réplicas se habría acumulado en los extremos de esta área. Una vez terminada la crisis sísmica y registrada la “última réplica”, el proceso de acumulación de energía en esta área vuelve a iniciarse y debe dar origen a un nuevo terremoto en el futuro.

¿Cuál fue la intensidad del terremoto de Arequipa?

El concepto de intensidad de un terremoto tiene relación con el grado de destrucción que estos producen en la superficie; por lo tanto, es de esperarse que el daño o destrucción sea mayor cerca del epicentro del terremoto y menor a distancias grandes. De ahí, que en Lima el terremoto fue sentido como un sismo leve; mientras que, en el sur este produjo gran destrucción. La intensidad máxima evaluada de manera preliminar fue de VII-VIII en la escala de Mercalli Modificada para las localidades de Camaná, Mollendo, Ilo, Arequipa, Moquegua y Tacna entre las principales.

¿Por qué se ha observado mayor destrucción en las ciudades de Moquegua y Tacna?

En primer lugar, es importante aclarar que el área involucrada en el proceso de ruptura del terremoto de Arequipa se extiende desde la localidad de Ocoña hasta Ilo, esto ha permitido que toda la región Sur de Perú y Norte de Chile sea afectada con la mayor cantidad de energía liberada por el terremoto.

En segundo lugar, se debe comprender que un terremoto no es el que produce muerte y destrucción, sino que es el hombre y su habitat quien se hace vulnerable a este peligro. Una analogía para explicar esto podría ser que una persona debidamente vacunada contra la tuberculosis, nunca será afectada por tal enfermedad ya que ha tomado las previsiones del caso y es menos vulnerable. Si la persona no se vacuna, entonces la probabilidad que fallezca con la enfermedad es alta. Esto significa, que el hombre debe construir en zonas geológicamente adecuadas (suelo estable), con materiales de calidad y supervisados por un ingeniero civil que asegure se respete los parámetros geofísicos que norman las construcciones antisísmicas. Si las construcciones no cumplen con estas normas y si además, son muy antiguas o se encuentran turgurizadas y en mal estado, evidentemente su vulnerabilidad ante un peligro como los terremotos es alta. Estas viviendas serán destruidas y con ellas el número de personas que fallezca será mayor.

¿Qué actividades ha realizado el IGP para estudiar el terremoto de Arequipa?

Después de ocurrido el terremoto, el IGP ha instalado 8 estaciones sísmicas entre las localidades de Nazca y Camaná y en coordinación con la Universidad de Santiago de

Chile se ha instalado otras 10 entre Arequipa y Tacna a fin de registrar las réplicas producidas por el terremoto. Igualmente se ha instalado 5 acelerógrafos para estudiar el comportamiento del suelo ante este tipo de fenómenos. Asimismo, personal del IGP se ha desplazado a las zonas afectadas para realizar una evaluación de los daños a fin de elaborar mapas de intensidades locales que permitan proporcionar información a fin de ser utilizada para la reconstrucción de las localidades/ciudades afectadas. Por otro lado, se ha coordinado la visita de profesionales en ingeniería sísmica de la Universidad de Mexico y de la Universidad de Boston de EEUU, para que en coordinación con la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa puedan realizar los estudios sobre el comportamiento de los suelos y estructuras en la región Sur de Perú. Con la Fundación Venezolana de Sismología se ha recibido la visita de un neotectónico para la evaluación geológica y otros efectos geodinámicos.

¿El IGP tiene resultados de estos estudios?

La información con la que actualmente se cuenta es cuantiosa y tomará mucho tiempo poder disponer de resultados de los diferentes estudios que se puedan realizar desde el punto de vista de la sismología. Una vez disponible cualquier tipo de resultados, preliminares o finales, serán de conocimiento de la comunidad científica y del público en general a través de nuestra pagina WEB. Asimismo, estos resultados serán entregados a las autoridades correspondientes.

¿Profesionales de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa han informado sobre un desplazamiento de la placa continental sobre la de Nazca de 35-50 cm, esto era de conocimiento del IGP?

La información a la que hace referencia es cierta, pero esta fue conocida por la comunidad científica horas después de ocurrido el terremoto de Arequipa y por lo tanto del IGP. A fin de verificar estos resultados, el IGP continua procesando el total de la información y ha creído conveniente no emitir declaraciones al respecto porque es evidente que estos valores deben ser cuantificados con mayor información. Es evidente que se debe evitar generar incertidumbre y pánico en la población.

¿Por qué el IGP dijo inicialmente que no había probabilidad de que produzca un tsunami?

Por lo general, los terremotos que generan tsunamis ocurren mar adentro. El epicentro del terremoto de Arequipa fue ubicado prácticamente sobre la línea de costa, de ahí que fuese poco probable que este genere un tsunami, pero sí marejadas a todo lo largo de la costa sur de Perú. El tsunami producido por el terremoto de Arequipa fue de carácter muy local y se originó bajo condiciones muy especiales y poco frecuentes. Las características del proceso que originó el terremoto, permitieron la fluctuación del mar cerca de la costa con marejadas de hasta 2 metros y circulación de las aguas a diferentes velocidades hacia el SE y viceversa paralelas a la costa. Ambas corrientes de agua se habrían encontrado al Nor-oeste de la localidad de Camaná para luego avanzar hacia La Punta con olas que alcanzaron alturas del orden de 7-8 metros, que como todos sabemos produjo destrucción y muerte en esta pequeña localidad de Camaná.

¿Ocurrirá un nuevo terremoto en la región sur de Perú?

Ya hemos indicado en varias oportunidades que en el Perú siempre han ocurrido terremotos, ocurren y seguirán ocurriendo mientras exista la Tierra. Hay que pensar que en la región sur no ocurría un terremoto desde hace más de 100 años y probablemente transcurra el mismo periodo de tiempo para que en esta misma zona vuelva a ocurrir otro. Sin embargo, cuando los investigadores proyectan sobre un mapa la ubicación de los últimos terremotos y sus áreas de ruptura, se puede observar que existen áreas en donde no ha ocurrido un terremoto de magnitud elevada, de esta manera se conoce el lugar y de acuerdo a la historia sísmica se estima una magnitud para el mismo, pero no se puede conocer la fecha en que estos ocurrirán. La idea en este caso, es estar conscientes de que en cualquier momento alguna de nuestras ciudades puede ser afectada por un terremoto y ante esta realidad, debemos tomar las previsiones del caso.

¿Cuáles serían las previsiones que hace mención?

Considero que la tarea fundamental en este caso es Educación y Prevención. Evidentemente, para realizar ambas se requiere de tiempo e inversión económica; por lo que, la responsabilidad recae sobre las autoridades y son ellas las que deben evaluar que es más importante. No hay que olvidar que ante un terremoto no se salva la persona más joven, fuerte, inteligente, mujer u hombre, solo sobrevivirán las personas que están

realmente capacitadas y educadas para tal fin. Ahora, es importante evaluar las características físicas de las ciudades, de las viviendas y del tipo de suelo sobre el cual están levantadas para tener una idea exacta de su vulnerabilidad ante los terremotos. Ahora, de acuerdo a esas realidades se debe tomar las previsiones del caso.

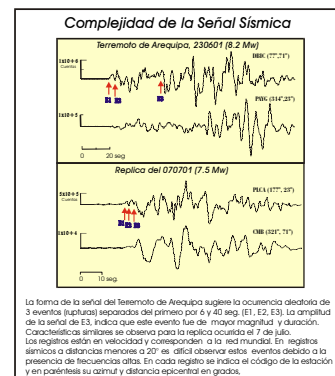
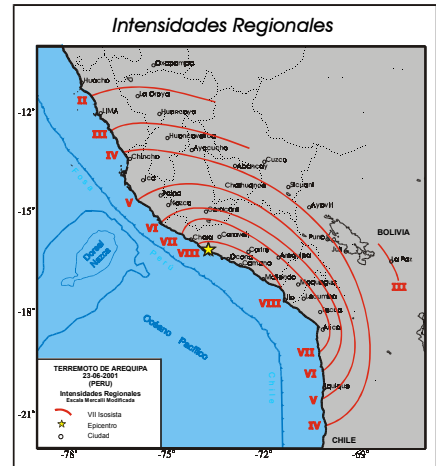
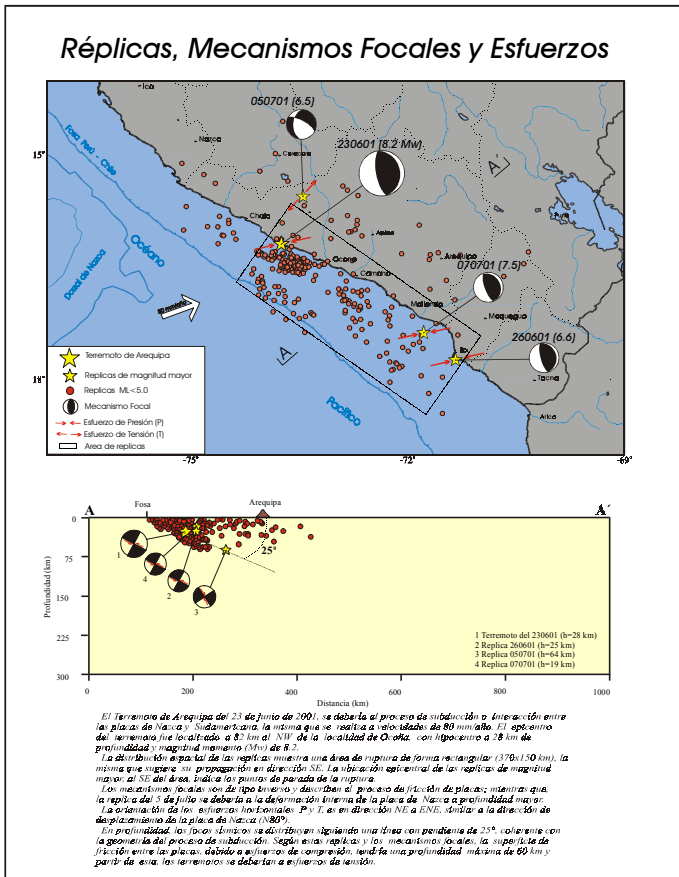
De ocurrir un terremoto en Lima, ¿cual sería la situación del desastre?

No puedo responder directamente a su pregunta, pero si puedo decirle que todo depende de la vulnerabilidad de la ciudad. Habría que voltear la mirada a las ciudades Moquegua y Tacna, y ver donde y porque se produjo tan importante destrucción, y luego mirar Lima y preguntarse: donde están las viviendas más antiguas, donde se ha construido sin control, donde existe tugurización, donde son malos los suelos, donde se ha producido la expansión urbana sin control, donde se ha construido sin normas antisísmicas, donde existe congestión de tránsito vehicular, señalizaciones o propagandas, tendidos eléctricos. Creo que cada uno de nosotros podremos responder con certeza que sucedería en Lima si ocurriese un terremoto como el que destruyó las ciudades de la región Sur de Perú.

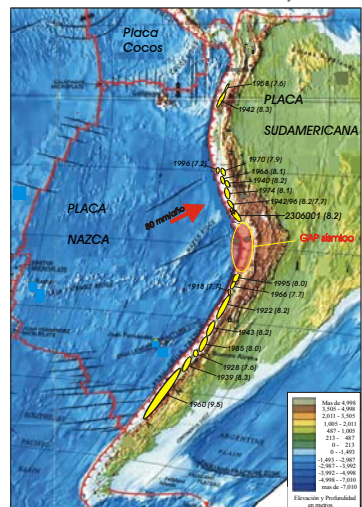
Nombre de archivo: anexo1
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: Algunas Notas sobre las Aceleraciones Máximas del Terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001
Asunto:
Autor: Hernando Tavera
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:18 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:18 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 03:04 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 8
Número de palabras: 2,143 (aprox.)
Número de caracteres: 12,220 (aprox.)

TERREMOTO DE AREQUIPA DEL 23 DE JUNIO DE 2001 (8.2 Mw)

Réplicas principales entre el 26 de junio y 10 de julio de 2001

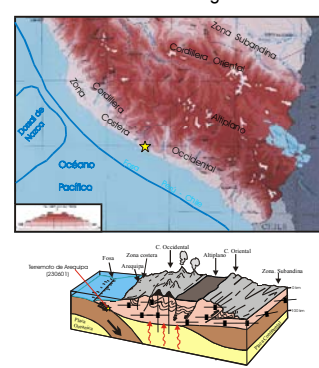


Placas Tectónicas y Áreas de Ruptura de Terremotos ocurridas en Sudamérica entre 1900 y 2001



La distribución espacial de las áreas de ruptura de terremotos ocurridos en Sudamérica entre los años 1900 y 2001, muestra la presencia de importantes lagunas de sismicidad ("Gap Sísmico") en Perú y norte de Chile.

Unidades Estructurales y Esquema del Proceso de Subducción en la Región Sur de Perú



Fuentes de Información

- Réplicas.
- Anzuino, Y., Barón, J., Yáñez, C., Millones, J., Rodríguez, S., Pérez-Pacheco, J., Salas, H., Vilagómez, L. (2001). Distribución de réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de junio de 2001. *Revista del Observatorio Geofísico y Sismológico, IGEP, Arequipa, Perú.*
- Planimetría de la Faja (mecanismos focales, esfuerzos, profundidad de las Fajas, Afo y Entendidos Regionales).
- Torres, H., E. Rojas, J. Barón, Y. Góngora, L. Vilagómez (2001). *The Arequipa Peru earthquake of June 23, 2001. Journal of Seismology (in review)*
- Unidades Estructurales.
- Diabrom, R. G., Lambrecht, R., Marco (1980). *Geología de las Andes peruanicas, Caracteres generales de la tectónica geológica de las Andes peruanicas.* Rev. Inst. Geofísico.
- Esquema del Proceso de Subducción.
- Hannon, M. (1980). *México y Maricón, Biotita e historia de la Geología.* Hermann Ed. De Cuzco y Are. Perú-Francia.
- Dirección Corporativa de Planes.
- Marín, Y. y P. Benda (1978). *Proceso de plate movement.* J. Geophys. Res. 78, 5333-5354.
- Área de Estudio de Terremotos Históricos.
- Durrant, L., A. Góngora, G. Durrant (1990). *Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru.* Bull. Seism. Soc. Am. 78, 511-515.
- Kullback, J. (1972). *Rupture zone of large South American earthquakes and some predictions.* J. Geophys. Res. 77, 2087-2103
- Placas Tectónicas.
- National Geographic Society (1995). *The Earth Fractured Surface.*

Nombre de archivo: anexo2
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título:
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:23 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:23 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 03:05 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 1
Número de palabras: 7 (aprox.)
Número de caracteres:43 (aprox.)

Nombre de archivo: anexo2
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título:
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:23 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:23 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 2 minutos
Impreso el: 08/08/2008 03:05 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 1
Número de palabras: 7 (aprox.)
Número de caracteres:43 (aprox.)



Imágenes de Viviendas del tipo B ubicadas en el Mercado de Arequipa y que sufrieron desprendimiento de cornizas. Techos característicos de viviendas de tipo B. Bóvedas con rieles presentes en el cercado de Arequipa y que fallan por falta de refuerzo transversal y la diferencia de rigidez entre el techo y los bloques de sillar.



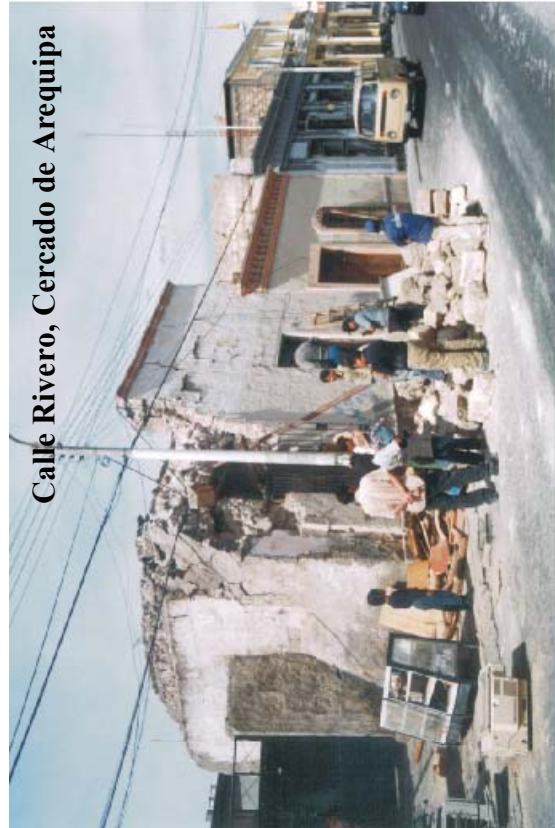
Imágenes de viviendas de tipo A. En el distrito de Sachaca una vivienda con más de 200 años de edad que descansa sobre un afloramiento de roca, la misma que sufrió daños en su base. Asimismo, se presenta una vivienda que ha colapsado parte del muro por pérdida de adherencia por el transcurso de los años y por mala calidad del mortero.



Parte posterior del Convento Santa Catalina

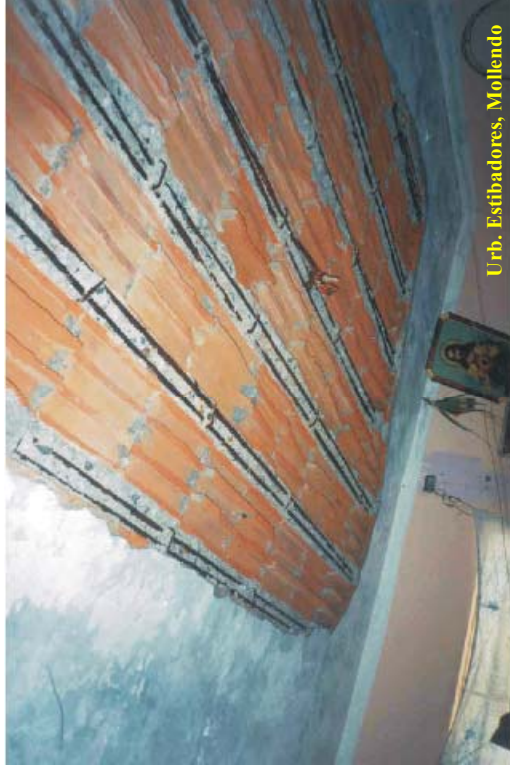


Calle San Antonio, Miraflores

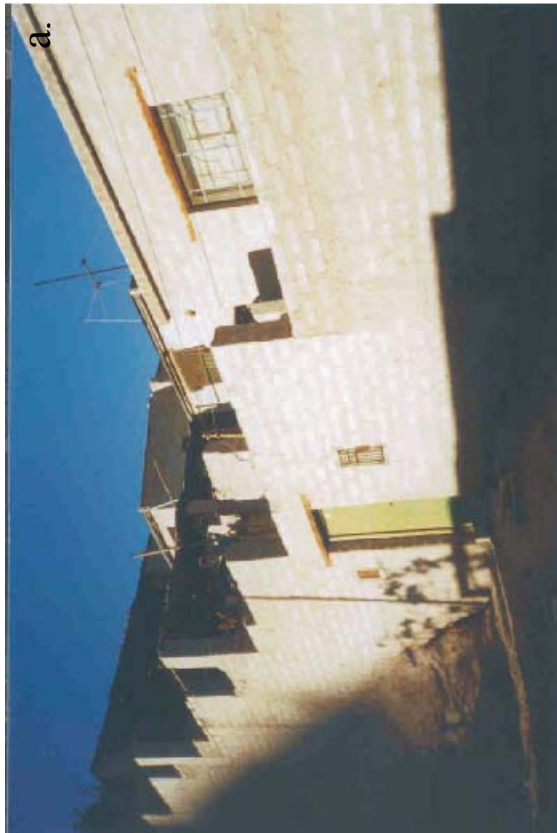


Calle Rivero, Cercado de Arequipa

Imágenes de viviendas y construcciones de Tipo B que colapsaron en la ciudad de Arequipa



Imágenes de la zona Costanera de Mollendo. Obsérvese agrietamientos longitudinales paralelos a la línea de costa debido a inestabilidad de taludes. En el extremo inferior derecho muestra la caída de trozos de revoque del techo de una vivienda, por corrosión salina.



a) Imágen de una vivienda de tipo A, de buena calidad, ubicada en el Pueblo Joven El Siglo, no sufrió daños.

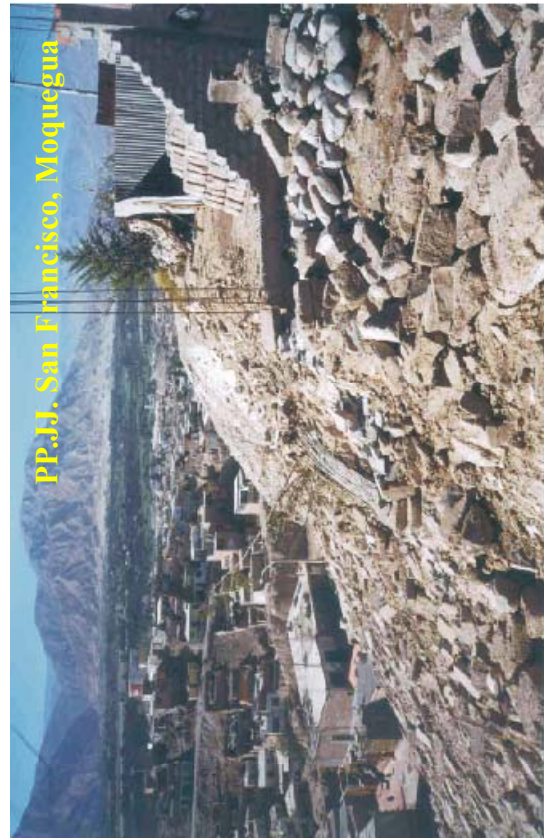
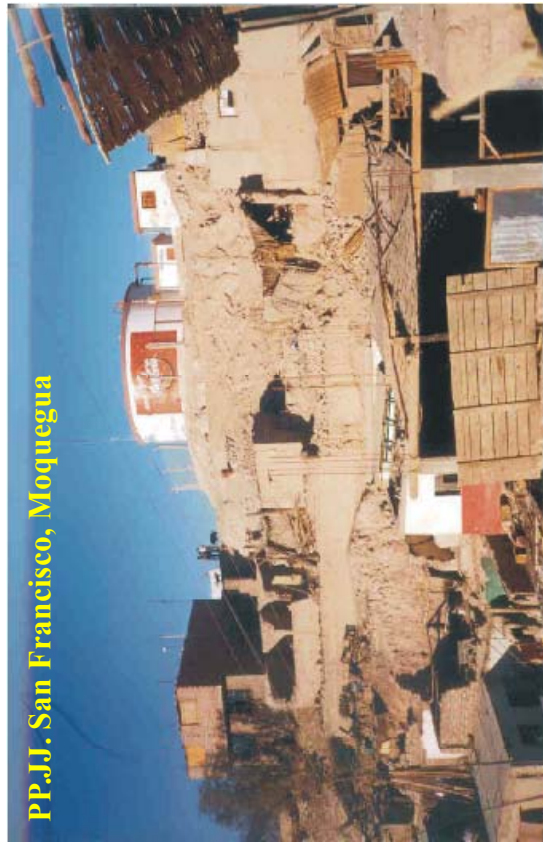
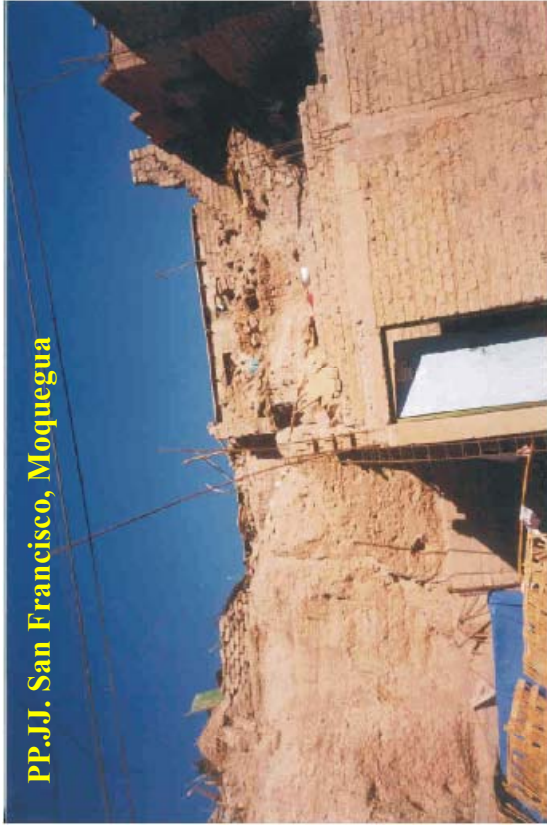
b) Vivienda de tipo C, ubicada entre las calles Moquegua y Arequipa en el Cercado Monumental, sufrió daños leves; mientras que las de tipo A, de mala calidad, ubicadas hacia los costados, colapsaron.

C) En el Cercado Monumental, se observa que viviendas de tipo A, colapsaron mientras que la de tipo C, no han sufrido daño.



Imágenes de viviendas e Iglesia de tipo A, ubicadas en el Cercado Monumental de la ciudad de Moquegua, los mismos que presentan daños severos

Cercado Monumental de Moquegua; ambas fotos muestran colapso de viviendas de tipo A, otras con daños severos, también son de tipo A.



Imágenes de viviendas de tipo A, de mala calidad, ubicadas en el Pueblo Joven San Francisco, de Moquegua. Se observa que edificaciones construidas en suelo inclinado han colapsado.



Iglesia Catas, Punta de Bombón



Av. Ramón Castilla, Punta de Bombón



Av. Ramón Castilla, Punta de Bombón



Iglesia Catas, Punta de Bombón



Av. Ramón Castilla, Punta de Bombón



Av. Ramón Castilla, Punta de Bombón

Imágen de construcciones de tipo B en Punta de Bombón. Algunas de ellas sufrieron el colapso de muros y paredes..



Av. Ernesto de Olazabal, Punta de Bombón



Puente el Frayle, Acceso a Punta de Bombón



Av. Ernesto de Olazabal, Punta de Bombón



Puente el Frayle, Acceso a Punta de Bombón

Imágenes de construcciones de tipo A, en la Avenida Ernesto de Olazabal, en Punta de Bombón colapsaron y del Puente el Frayle, de acceso a Punta de Bombón, Panamericana Sur; muestra asentamiento diferencial de uno de los estribos, así como agrietamiento por efecto de la densificación de su sub-base.



Av. Ernesto de Olazabal, Punta de Bombon



Puente el Frayle, Acceso a Punta de Bombon



Av. Ernesto de Olazabal, Punta de Bombon



Puente el Frayle, Acceso a Punta de Bombon

Imágenes de construcciones de tipo A, en la Avenida Ernesto de Olazabal, en Punta de Bombon colapsaron y del Puente el Frayle, de acceso a Punta de Bombón, Panamericana Sur, muestra asentamiento diferencial de uno de los estribos, así como agrietamiento por efecto de la densificación de su sub-base.



Av. Moure, Distrito de Ciudad Nueva de Tacna



Av. Moure, Distrito de Ciudad Nueva de Tacna



Av. Moure, Distrito de Ciudad Nueva de Tacna



Av. Moure, Distrito de Ciudad Nueva de Tacna

Imágenes de viviendas de tipo C, en la Av. Moure del Distrito de Ciudad Nueva de Tacna. Destrucción parcial.



Vista frontal y lateral de una Vivienda de tipo C ubicada en la Av. El Sol, Distrito de Ciudad Nueva, Tacna. Sufrió destrucción parcial y asentamiento por problema del tipo de suelo.



Catedral de la ciudad de Arequipa, vista desde el Portal de Flores. Colapso una de las torres y la otra daños severos.

El Portal de Flores visto desde la Plaza de Armas. Observe una grieta pequeña en el 2º piso que se prolonga hasta el 1º. Asimismo, se ha producido caída de revestimiento.

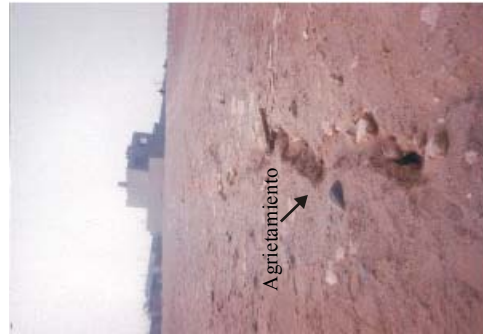




Imágenes de construcciones de tipo C. En la Universidad San Agustín se observa que la Biblioteca de Ingenierías se ha producido el colapso de la escalera y en la Facultad de Ing. Civil los muros presenta agrietamientos. El Colegio Salesianos, sufrió el desprendimiento de trozos de estuque.



Viviendas y edificaciones de tipo C ubicadas en suelos altamente freáticos como es la Urb. Lara y en suelos relativamente estables en el cercado de Arequipa, SUNAT.



Imágenes de construcciones de tipo C ubicadas en diferentes sectores de la ciudad de Ilo y que presentan destrucción parcial en la mayor parte de las edificaciones debido al tipo de suelo sobre el que fueron construidas. La Imagen inferior derecha presenta agrietamiento y fisuras sobre la superficie del suelo, rumbo N 40° E.



Imágenes de viviendas de tipo C ubicadas en La Pascana, Valle Hermoso, Ilo. Se observa el colapso en diversas partes de las construcciones.



Sector Las Brisas V, Ilo



Sector Las Brisas V, Ilo



Local Southern Perú, Ross Siding, Ilo



Edificio Southern Perú, Ross Siding



Museo Municipal en el Valle Algarrobal, Ilo



Museo Municipal en el Valle Algarrobal, Ilo

Imágenes de construcciones de tipo C ubicadas en diferentes lugares de la ciudad de Ilo. Los daños severos.



Sector Las Brisas III, Ilo

Nombre de archivo: anexo3
Directorio: \\Omega\usuarios\ETorres\texto_final_V2
Plantilla: C:\WINDOWS\Application Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título:
Asunto:
Autor: IGP
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 05/07/2002 05:28 P.M.
Cambio número: 2
Guardado el: 05/07/2002 05:28 P.M.
Guardado por: Ivone
Tiempo de edición: 4 minutos
Impreso el: 08/08/2008 03:18 A.M.
Última impresión completa
Número de páginas: 18
Número de palabras: 9 (aprox.)
Número de caracteres:53 (aprox.)